



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Der Nachweis von Umweltschadstoffen in Pflanzen mit
Hilfe der Infrarotphotographie –
am Beispiel von Standorten in Bad Fischau-Brunn“

Verfasserin

Sabrina Stocker

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer.nat.)

Wien, im Mai 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 190 445 344

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Lehramtstudium UF Biologie und Umweltkunde, UF Englisch

Betreuerin / Betreuer:

Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Peter Peduzzi

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Material und Methode	2
2.1. Standortwahl und Beschreibung	2
2.1.1. Standort Nord	3
2.1.2. Standort Nord-Ost	4
2.1.3. Standort Ost	4
2.1.4. Standort Süd-Ost	4
2.1.5. Standort Süd	4
2.1.6. Standort Süd-West	4
2.1.7. Standort West	5
2.1.8. Standort Nord-West	5
2.1.9. Standort Zentrum	5
2.2. Schwarzkiefern als Indikatorbäume	5
2.2.1. Merkmale	6
2.3. Messgeräte – RQflex	7
2.3.1. Technische Daten	8
2.4. Chemische Analysen	10
2.4.1. Nitrit-Test	13
2.4.2. Nitrat-Test	14
2.4.3. Freie schwefelige Säure-Test	16
2.4.4. Chlor-Test	17
2.5. Phototechnik	18
2.5.1. Infrarotphotographie	18
2.5.2. Der Sperrfilter	21
2.5.3. Der Photoapparat	24
2.5.4. Das Stativ	24
3. Ergebnisse	25
3.1. Photographien der Standorte	25
3.2. Ergebnisse der chemischen Analysen	145
3.2.1. Ergebnisse der Nitritmessungen	145

3.2.2. Ergebnisse der Nitratmessungen	149
3.2.3. Ergebnisse der Schwefeldioxidmessungen	154
3.2.4. Ergebnisse der Chloridmessungen	158
3.2.5. Zusammenfassung aller Schadstoffe an den Standorten	162
3.2.6. Schadstoffmaxima von NO ₂ , NO ₃ , SO ₂ , Cl ⁻	166
4. Diskussion	169
4.1. Generelle Zielsetzung	169
4.2. Interpretation der IR-Aufnahmen	169
4.3. Optionen Infrarotphotographien von Bäumen auszuwerten	173
4.4. Interpretation der chemischen Analysen	177
4.4.1. Nitritgehalt	178
4.4.2. Nitratgehalt	180
4.4.3. Schwefeldioxidgehalt	181
4.4.4. Chloridgehalt	182
5. Zusammenfassung	184
6. Quellenangabe	186
6.1. Literaturverzeichnis	186
6.2. Internetquellen	186
6.3. Verwendete Software	188
7. Abbildungsverzeichnis	189
8. Abstract	199
Lebenslauf	201

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, jenen Menschen zu danken, die das Entstehen dieser Diplomarbeit erst möglich gemacht haben, meiner Familie und meinen Freunden.

Besonderen Dank möchte ich auch meinem Diplomarbeitsbetreuer Dr. Peter Peduzzi aussprechen für dessen konstruktive Kritik, und meinem guten Freund Stephan Holzer, der mir sein technisches Wissen nicht nur einmal zur Verfügung gestellt hat.

Der größte Dank gilt jedoch meinem Mann Karl, für seine grenzenlose Geduld. Er war es, der mir stets mit seinem Verständnis und seiner Liebe den Rücken gestärkt hat und mir so den Abschluss meines Studiums ermöglicht hat.

1. Einleitung

Pflanzen sind ein wesentlicher Bestandteil unserer Natur und aufgrund ihrer Sauerstofffreisetzung von unschätzbarem Wert für Umwelt und Lebewesen. Pflanzen selbst sind ebenfalls als Lebewesen zu betrachten und wie jedes Lebewesen haben sie bestimmte Bedürfnisse und stellen Ansprüche an den Lebensraum der sie umgibt, um wachsen und gedeihen zu können.

Da die meisten Organismen, und so auch Pflanzen, nun aber nicht in Isolation leben, sondern in Beziehungen zu anderen Lebewesen stehen, treten Wechselwirkungen auf. Dies bedeutet, dass die Bedürfnisse des einen die Lebensqualität des anderen beeinflussen können. Dabei sind in der Natur die Bedürfnisse der einzelnen Lebewesen häufig aufeinander abgestimmt, sodass sich die Organismen nicht in ihrer Lebensqualität gegenseitig behindern. Wenn dies nicht der Fall wäre, so müsste die betreffende Lebensform ausweichen und einen anderen Lebensraum besiedeln.

Das Zusammenleben von Mensch und Natur ist sehr komplex und die Grenzen zwischen den Ansprüchen der einzelnen Lebewesen in diesem Wirkungsgefüge sind dabei nicht immer sofort klar erkennbar. Die Gestaltung der Biosphäre durch den Menschen ist an dessen Bedürfnisse angepasst und diese gehen nicht immer einher mit jenen der umliegenden Flora und Fauna. Ist dies der Fall so besteht für die Tiere die Möglichkeit sich entweder an die neuen Lebensumstände anzupassen oder ihnen zu weichen. Diese Möglichkeit besteht für Pflanzen jedoch nur eingeschränkt.

Die Beeinflussung der Umwelt seitens des Menschen kann vielseitig sein, sei es durch Landwirtschaft, durch den Bau von Siedlungen oder durch das Transportwesen. Durch die Anwesenheit des Menschen werden Stoffe in die Umwelt eingebracht, welche auch auf pflanzliche Organismen eine schädigende Wirkung haben können. Können Pflanzen dem anthropogenen Einfluss nun nicht mehr kompensieren so werden sie krank, was sich unter anderem durch Schäden an den Blättern nachweisen lässt.

Die Pflanze als offenes energetisches System speichert Schadstoffe, welche sowohl aus der Luft als auch über den Boden in sie gelangen; Stoffwechselstörungen können die Folge sein; besonders wenn durch diese Störungen die Produktion von photosynthetischen Pigmenten (Chlorophyll) betroffen sind. Chlorophyllschäden bleiben den menschlichen Augen oft verborgen, außer die Pflanze ist schon derart geschädigt, dass es zu einer Verfärbung des Blattmaterials und anschließendem

Laubfall kommt. Mit Hilfe der Infrarotphotographie lassen sich Chlorophyllschäden qualitativ nachweisen. Durch die Extraktion von Blatthaltstoffen lassen sich mögliche chemische Verursacher der Schäden erkennen. Pflanzen sind folglich sehr gute Bioindikatoren für die Qualität eines Lebensraumes.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den möglichen Einfluss des Menschen auf den Lebensraum Bad Fischau-Brunn in Niederösterreich, durch die Untersuchung von Nadelproben der dort wachsenden Schwarzkiefern nachzuweisen. Das Untersuchungsgebiet erstreckte sich in einem Radius von einem Kilometer um das Ortszentrum der Gemeinde, wobei angenommen wurde, dass die Schadstoffbelastung an den betreffenden Standorten mit der Entfernung des direkten Einflusses des Menschen sinkt.

2. Material und Methode

2.1. Standortwahl und Beschreibung

Die Gemeinde Bad Fischau-Brunn liegt etwa 50 km südlich von Wien am Rande des Wiener Beckens im Industrieviertel in Niederösterreich und wurde aufgrund ihrer landschaftlichen Mannigfaltigkeit als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Die Fläche der Marktgemeinde beträgt 20,59 km². Bei einer Einwohnerzahl von 3005 Bürger und Bürgerinnen (Stand im Juli 2011) kommt man auf eine Bevölkerungsdichte von rund 145 Einwohnern pro km².

Etwa 36,22 Prozent der Fläche ist bewaldet, weitere große Flächen werden landwirtschaftlich oder als Weinbaugebiet genutzt (Quellen: offizielle homepage der Gemeinde: bad-fischau-brunn.at, sowie Statistik Austria und wikipedia.org).

Ausgehend vom Ortskern wurden im Umkreis von einem Kilometer Standorte gewählt, welche einen Schwarzkiefernbestand aufweisen. Dabei ergaben sich nun folgende neun Standorte:

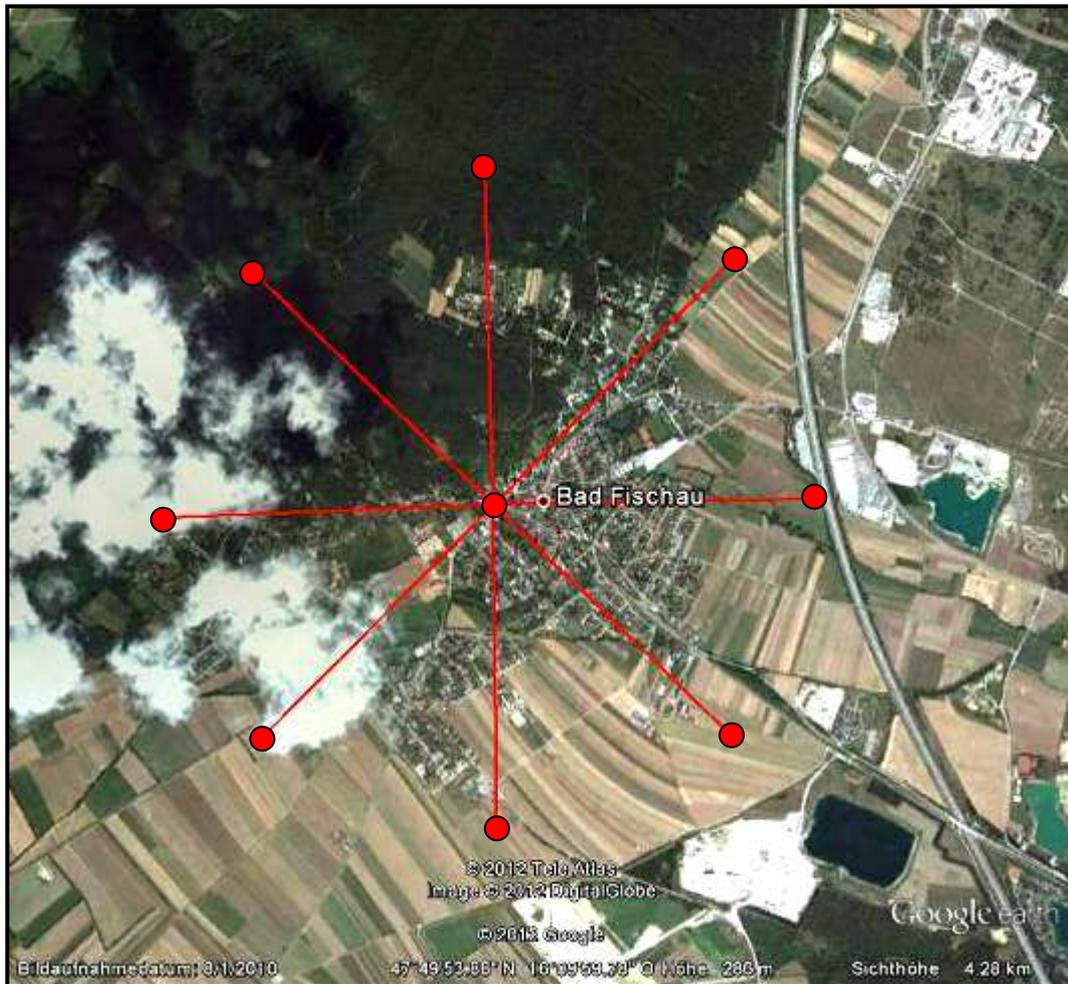


Abb. 1: Satellitenbild von Bad Fischau-Brunn mit den Standorten (Quelle: Google-Earth)

2.1.1. Standort Nord

Die zu untersuchenden Nadeln wurden von Schwarzkiefern entnommen, welche sich auf einer Waldlichtung am Malleitenberg befinden. Der Malleitenberg ist einer der vielen Erhöhungen der Fischauer Vorberge, welche wiederum ein Vorgebirge der Hohen Wand darstellen. Die Fischauer Vorberge erstrecken sich über mehrere Marktgemeinden; während an deren Ostseite die „Warme Fische“ entspringt, befindet sich an deren Nordwestseite eine Senke, welche als „Neue Welt“ bezeichnet wird. Die Fischauer Vorberge weisen eine Höhe von 500 bis 600 Meter auf und werden hauptsächlich von Kiefern besiedelt (wikipedia.org).

2.1.2. Standort Nord-Ost

Dieser Standort befindet sich bereits außerhalb des besiedelten Gebietes der Gemeinde. Die Nadelproben stammen von Schwarzkiefern, die sich einerseits in unmittelbarer Nähe von landwirtschaftlich genutzten Flächen, andererseits in Autobahnnähe (A2) befinden. Umsäumt werden die Ackerflächen von Rebanlagen.

2.1.3. Standort Ost

Parallel zur Ostseite der Marktgemeinde verläuft die Autobahn A2 Richtung Wien – Graz. Hinter einer Autobahnraststätte (Hundertwasserraststätte), welche sich auf Höhe Bad Fischau-Brunn befindet, stehen vereinzelt Schwarzkiefern. Der Abstand dieser Bäume zur Autobahn beträgt daher nur wenige Meter. Von diesen Bäumen wurden ebenfalls Nadelproben entnommen.

2.1.4. Standort Süd-Ost

Parallel zu diesem Standort verläuft in wenigen Metern Entfernung die Eisenbahnlinie Wiener Neustadt – Puchberg am Schneeberg. Jene Schwarzkiefern, welche an diesem Standort als Indikatorbäume herangezogen wurden, befinden sich am Rande einer wenig befahrenen Straße, welche rechterhand zu einer Schottergrube führt (auf dem Satellitenbild als weiße Fläche neben einem großen Schotterteich zu sehen).

2.1.5. Standort Süd

Die untersuchten Bäume an jenem Standort sind Teil einer kleinen Schwarzkieferpopulation welche linkerhand von einer landwirtschaftlich genutzten Fläche und rechterhand von einer viel befahrenen Durchzugsstraße begrenzt wird. In unmittelbarer Nähe dieses Gebietes befindet sich eine große Autospengler- und lackiererei und seit Ende 2011 auch eine Hunde-Auslaufzone.

2.1.6. Standort Süd-West

Die Indikatorbäume im Süd-Westen von Bad Fischau-Brunn befinden sich auf einer Wiese nahe der größten Weinbaufläche der Gemeinde. Von Frühjahr bis Herbst wird diese Wiese (sie ist ein bekannter Trockenrasenstandort) von zahlreichen Schafen und Ziegen abgegrast. Da sich dieses Gebiet parallel zur Weinbergstraße befindet, wird dieses auch gerne von Radfahrern und Wanderern aufgesucht.

2.1.7. Standort West

Im Westen der Gemeinde am Fuße der Fischauer Vorberge befindet sich auf einer Anhöhe nahe der für den Tourismus bedeutsamen Eisensteinhöhle eine Schwarzkieferngruppe, welche zur Entnahme von Nadelproben herangezogen wurden. Die Indikatorbäume befinden sich unweit des Wanderweges, welcher zur Höhle und zum daran angrenzenden Gasthaus führt.

2.1.8. Standort Nord-West

Dieser Standort befindet sich auf einer sonnigen Lichtung am Malleitenberg. Die verwendeten Schwarzkiefern wachsen auf steinigem Boden, der Untergrund ist von zahlreichen Sträuchern bewachsen. In unmittelbarer Nähe befindet sich das ehemalige Waldgasthaus „Zum Kürassier“ mit Nebengebäuden, welche heute als Wohnhäuser dienen. Dieser Bereich der Gemeinde ist besonders beliebt bei Mountainbikefahrern, Waldläufern, Hundeliebhabern und Touristen.

2.1.9. Standort Zentrum

Das Ortszentrum der Gemeinde bildet die Pfarre „Zum heiligen Martin“. Gleich hinter dem Kirchengebäude befindet sich ein kleiner Schotterparkplatz von wo aus ein Waldlehrpfad auf den Blumberg führt. Zu Beginn dieses Weges findet man auf der rechten Seite einen kleinen Kinderspielplatz. In unmittelbarer Nähe dieses Spielplatzes befindet sich eine Schwarzkieferngruppe direkt an der Wiener Hochquellwasserleitung, von welcher Nadelproben entnommen wurden.

2.2. Schwarzkiefern als Indikatorbäume

Das Wort „Indikator“ leitet sich vom Lateinischen *indicare* ab und bedeutet soviel wie *leiten* oder *herleiten*. Allgemein geben Indikatoren einen Hinweis auf einen gewissen Sachverhalt oder auf ein Ereignis (wikipedia.org).

Bäume sind Lebewesen und daher spricht man in diesem Fall von Bioindikatoren, folglich lebenden Anzeigern. Da, wie eingangs schon erwähnt, Bäume einen gewissen Anspruch an ihre Umgebung stellen, kann deren Vorkommen an einem bestimmten Ort Aufschluss über die dort herrschenden Umweltbedingungen geben.

Für die einjährigen Untersuchungen und Schadstoffanalysen wurden Schwarzkiefern herangezogen. Diese Entscheidung ist dadurch zu begründen, dass diese Gattung das ganze Jahr über Nadeln trägt und somit monatlich Nadeln geerntet werden

konnten. Außerdem sind Schwarzkiefern in der Gemeinde Bad Fischau-Brunn, sowie im Umland reichlich vorhanden und stellen die dominierende Baumart dar.

Die Schwarzkiefer (*Pinus nigra*; auch Schwarzföhre genannt) gehört zur Gattung *Pinus* (Kiefern) und damit zur Familie der Kieferngewächse (*Pinaceae*).

An und für sich ist die Schwarzkiefer in den Mittelmeerländern Südeuropas, sowie im westlichen Nordafrika und Kleinasien heimisch (Amann, 2002). Dennoch findet man große Bestände auch in Österreich, vorwiegend im Burgenland und Niederösterreich, entlang der Thermenlinie und westlich des Rosaliengebirges.

2.2.1. Merkmale

Pro Kurztrieb bilden die Schwarzkiefern je 2 Nadeln aus. Diese sind lang (4 – 24 cm), starr, kaum gedreht und enden in einer markanten Spitze. Durch ihre schwarz-grüne Färbung sind sie für den Baum namensgebend (Amann 2002; 114 - 115).

Die Blütezeit beginnt je nach Standort im April und endet Mitte Juni. Dabei sind die Blüten monözisch (einhäusig- getrennt geschlechtlich; männliche und weibliche Blüten auf ein und derselben Pflanze). Die 2 bis 3 mm langen männlichen Blütenzapfen sind grün gefärbt und stehen meist endständig an Langtrieben. Dagegen sind die weiblichen Blütenzapfen meist größer, rötlich gefärbt und stehen in Gruppen zusammen (Schütt et. al., 2008).

Die Zapfen hingegen reifen erst im Herbst des 2. Jahres. Sie sind zwischen 3 und 12 cm lang, kegelförmig und hellbraun glänzend gefärbt.

Die bräunlichen Samen dieser Gattung werden nur maximal 7 mm lang, sind beflügelt und werden durch den Wind verbreitet (Amann 2002; 114).

Als immergrüne Nadelbäume sind Schwarzkiefern relativ anspruchslos und unempfindlich gegenüber Trockenheit und Temperatur. Daher kommen sie in Höhenlagen von 0 bis 2000 m vor. Sie sind kälteresistent (so manche Jungbäume überstehen kurzfristig Temperaturen von bis zu -30°C) und tolerieren mangelnde Wasserversorgung. Einer der wenigen Ansprüche der Schwarzkiefer an den Standort ist ein ausreichendes Lichtangebot (Van Haverbeke; na.fs.fed.us).

Allgemein wachsen diese Nadelbäume sowohl auf lockeren sandigen, sowie auf schweren tonigen Böden. Weiters wurzeln sie sowohl auf kalkhaltigen basischen

Böden, sowie auch auf silikatreichen sauren Böden. Das Wurzelsystem der Schwarzkiefer ist weit verzweigt und recht robust. Eine feste Verankerung mit dem Untergrund wird durch eine kräftige Pfahlwurzel gewährleistet. Je nach Boden wurzeln die Bäume entweder in den oberen oder in den unteren Bodenschichten. Selbst bodenfreie Felsspalten können von den Wurzeln durchdrungen werden (Schütt et. al., 2008).

Aufgrund dieser ausgeprägten Toleranz gegenüber diverser Umweltbedingungen ist die Schwarzkiefer nur bedingt krankheitsanfällig und kann selbst bei Luftverschmutzung wachsen und gedeihen.

Für die Nadelanalysen wurden jeweils die ersten Nadeln an der Basis des jüngsten Triebes geerntet (diese sind hellgrün und unterscheiden sich dadurch deutlich von älteren Nadeln).

2.3. Messgeräte – RQflex

Der RQflex wurde von der Firma Merck entwickelt und ist als präzises Messinstrument nur eines von drei Bestandteilen des Reflectoquant[®] Analysesystems. Weitere Komponenten stellen die Reflectoquant[®] Analysestäbchen, sowie die test- und chargenspezifischen Barcode-Streifen dar.

Der RQflex misst nach dem Prinzip der Reflektometrie (Remissionsphotometrie) jenes Licht, welches an einem Analysestäbchen reflektiert wird. Unter Berücksichtigung des Verhältnisses von ausgehender und reflektierter Strahlung kann die Konzentration bestimmter Inhaltsstoffe quantitativ gemessen werden.

Der RQflex ist darauf geeicht, 25 verschiedene Substanzen in einer Probe quantitativ zu erfassen. Welche Substanz er zu erkennen vermag, ist abhängig vom verwendeten Reflectoquant[®] Analysestäbchen. Zu jedem Analysestäbchen gibt es einen entsprechenden Barcode, welcher vor Beginn der Analyse in den RQflex eingespeist werden muss. Über einen Barcodeleser im Gerät werden nun alle Daten, die für die erfolgreiche Analyse und Messung einer Substanz notwendig sind auf das Gerät übertragen. Weiters enthält der Barcode auch Informationen für eine Wellenlängenkorrektur falls erforderlich. Möchte man nun also beispielsweise Nitrat in einer Probe quantitativ erfassen, muss zunächst der Barcode für Nitrat in den RQflex eingespeist werden. Dabei ist zu beachten, dass das Gerät maximal 5

Methoden, sprich Barcodes, gleichzeitig speichern kann. Durch das Einlesen weiterer Barcodes wird ein bereits gespeicherter Barcode überschrieben und ersetzt.

Weiters ist darauf zu achten, dass die Chargenkennziffern (jeder Messmethode wurde von der Firma Merck eine Kennzahl zugeordnet) von Gerät, Stäbchen und Barcode-Streifen übereinstimmen, da diese aufeinander abgestimmt sein müssen.



Abb. 2: RQflex der Firma Merck

2.3.1. Technische Daten

Der 19 x 8 x 2 cm große RQflex benötigt für einwandfreie Messungen eine Umgebungstemperatur von 5°C – 40°C, die Luftfeuchtigkeit sollte deutlich unter 90% liegen. Mit Hilfe der recht kleinen Reflektionszone (4 x 6 mm) können 4 – 90% der relativen Remissionen quantitativ erfasst werden. Dabei beträgt die photometrische Genauigkeit 0,5 % der relativen Remissionen.

Der Speicher umfasst wie bereits erwähnt 5 Methoden, aber auch 50 Messwerte.

Wie genau in weiterer Folge der Messablauf erfolgt, ist abhängig von den verwendeten Teststäbchen. Deshalb ist es so wichtig, dem Gerät mittels Barcode-Streifen das individuelle Vorgehen mitzuteilen. Alle weiteren Arbeitsschritte sind anschließend am Display des RQflex abzulesen.

Die testspezifischen Messabläufe können im Wesentlichen in drei Kategorien eingeteilt werden:

- **Messablauf A:** Bei diesem Messablauf ist nur die Reaktionszeit des Stäbchens zu beachten. Nach dem Drücken der START-Taste erscheint die Reaktionszeit auf dem Display. Gleichzeitig soll das Stäbchen in die zu untersuchende Lösung getaucht und überschüssige Flüssigkeit abgestreift werden. Fünf Sekunden vor Ablauf der Reaktionszeit erscheint auf dem Display ein blinkendes Stäbchen (auch ein Signalton ist zu hören); dies ist die Aufforderung das Stäbchen nun bis zu Anschlag in die Messkammer einzuführen. Das Messergebnis wird nun in der entsprechenden Einheit angezeigt (diese ist auf der Packung abzulesen).
- **Messablauf B:** Neben der Reaktionszeit der Stäbchen müssen auch andere Wartezeiten berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass nachdem die START-Taste gedrückt wurde, vorerst eine gewisse Wartezeit auf dem Display erscheint. Während diese Wartezeit abläuft, bereitet man die Analysestäbchen wie in der Packungsbeilage beschrieben vor. Die Reaktionszeit wird nach Ablauf der Wartezeit eingblendet. Erst jetzt wird das Stäbchen in die zu untersuchende Lösung getaucht und die START-Taste abermals gedrückt. Fünf Sekunden nach Ablauf der Reaktionszeit wird das Stäbchen bis zum Anschlag in die Messkammer eingeführt. Auch hier wird das Messergebnis nun in der entsprechenden Einheit angezeigt.
- **Messablauf C:** Bei diesem Messablauf wird das Gerät auf das Reflectoquant® Analysestäbchen kalibriert.

Bei Messablauf C wird sichergestellt, dass die Chargennummer der gespeicherten Methode im Reflectoquanten mit der Nummer der Analysestäbchen übereinstimmt, andernfalls ist eine erfolgreiche Messung nicht möglich.

Zu Beginn des einjährigen Analysezyklus wurde diese Art der Kalibrierung für jede zu messende Substanz vorgenommen.

Im Anschluss wurden die chemischen Inhaltsstoffe Nitrit, Nitrat und Chlorid mit Hilfe des Messablaufes A, die freie schwefelige Säure mittels Messablauf B quantitativ erfasst.

Die oben stehenden Daten wurden den technischen Datenblättern der Firma Merck, sowie den Beipackzetteln der Teststäbchen entnommen und zusammengefasst.

2.4. Chemische Analyse

Nachdem von den entsprechenden Indikatorbäumen Nadelproben entnommen wurden, wurden diese je nach Feuchtigkeit in einem Dörrgerät für 5 bis 10 Minuten getrocknet. Die Nadeln wurden dabei solange mit Wärme behandelt, bis jener Trockenheitsgrad erreicht wurde, bei welchem sich die Nadeln problemlos brechen ließen. In weiterer Folge wurden die zerkleinerten Schwarzkiefernadeln mit einer (ungebrauchten) Kaffeemühle pulverisiert. Jedes Monat wurden die Proben von jedem der neun Standorte auf diese Weise aufbereitet.



Abb. 3: Pulverisieren der Nadelprobe

Jeweils 2 g des pulverisierten Trockenmaterials der diversen Standorte wurden einerseits mit 30 ml destilliertem Wasser, andererseits mit 30 ml 96%igem Weingeist vermengt. Dabei hat sich gezeigt, dass sich, abhängig von der verwendeten Flüssigkeit (Alkohol oder destilliertes Wasser), die Inhaltsstoffe der Nadeln unterschiedlich gut herauslösen ließen. Das Anfertigen einer flüssigen Lösung (Lösungsmittel und Nadelprobe) ist für die weitere chemische Analyse essentiell.

Das Abwiegen der jeweils benötigten Probemenge erfolgte mit einer elektronischen Feinwaage des Typs Almasa MT – 3.

Technische Daten

Kapazität: 200 Gramm

Messgenauigkeit: 0,01 Gramm



Abb. 4: Abwiegen der Probenmenge mit der Waage Almasa MT – 3



Abb. 5: Ansetzen der Nadelprobe in Ethanol (96%ig)

2 g des Trockenmaterials wird mit jeweils 30 ml Weingeist oder 30 ml destilliertem Wasser vermengt. Die Einwirkdauer beträgt von da weg 5 Minuten. Anschließend wird die Lösung über einen Trichter mit Papierfilter in ein anderes Gefäß filtriert. Dabei muss beachtet werden, dass keinerlei Rückstände der Nadelproben in dieses Gefäß gelangen sollen. Vorversuche haben gezeigt, dass eine längere Einwirkdauer nicht zwangsläufig eine höhere Konzentration der gesuchten Inhaltsstoffe erbracht hat, weshalb einheitlich eine Lösungszeit von fünf Minuten gewählt wurde. Nach Ablauf dieser Zeitspanne wurde durch Filtration eine Rohchlorophylllösung gewonnen, welche die Ausgangsbasis für die chemischen Nachweise der gesuchten Schadstoffe bildete.



Abb. 6 und 7: Anfertigen eines Chlorophyllfiltrats



Abb. 8: chemische Analyse der Chlorophyllproben entsprechend der Betriebsanleitung des RQflex und der technischen Anweisungen der Beipacktexte der jeweiligen Testreagenzien der Firma Merck

2.4.1. Nitrit-Test

Als Nitrite (NO_2^-) werden die stabilen Salze der Salpetrigen Säure (HNO_2) bezeichnet. Eine natürliche Bildung von Nitriten findet statt, wenn Nitritbakterien (wie zum Beispiel Nitrosomonas), welche vorwiegend im Boden oder in Gewässern (auch in Gewässern von Kläranlagen) vorkommen, Ammoniumionen (NH_4^+) unter Sauerstoffverbrauch oxidieren. Im Grunde genommen ist Nitrit nur das Zwischenprodukt, welches bei der vollständigen Oxidation von Stickstoff (N) zu Nitrat (NO_3^-) anfällt. Dieser Vorgang wird auch als Nitrifikation bezeichnet.

Natürlich kann Nitrit auch durch die bakterielle Reduktion von Nitraten entstehen (Nitratreduktase). Dieser Prozess läuft unter anaeroben Bedingungen ab (Gutkunst, 1991).

Nitrit kann aber auch durch den Menschen in die Umgebung eingebracht werden, so können bei der industriellen Behandlung von Metalloberflächen oder bei der Reinigung stickoxidhaltiger Abgase nitrithaltige Abwässer entstehen. Da diese Abwässer mitunter giftig sind, müssen sie vor der Entsorgung aufbereitet werden.

Da Nitriten mit den Eisenatomen in eisenhaltigen Enzymen der Zellatmung sowie des Hämoglobins reagieren, können sie sowohl auf einen pflanzlichen als auch auf einen menschlichen Organismus schädigend wirken. Vor allem wenn durch das Einwirken von Nitrat Hämoglobin zu Methämoglobin oxidiert wird, kann die Fähigkeit des Organismus Sauerstoff zu transportieren verloren gehen.

Daher war es essentiell, die verwendeten Nadelproben auf deren Nitritgehalt zu untersuchen (Glaser, 2008).

Dabei wurden Testreagenzien sowie Teststäbchen (Merckoquant[®] Nitrit-Test, Art. 110007; Messbereich: 0,5 – 25,0 mg/l NO_2^-) der Firma Merck verwendet. Bei diesem Verfahren werden Nitriten in den Nadelproben reflektometrisch bestimmt und nachgewiesen. Die Anwesenheit von Nitriten kann reflektometrisch nachgewiesen werden, wenn Nitriten in Gegenwart eines sauren Puffers mit einem aromatischen Amin ein Diazoniumsalz bilden, welches wiederum mit einem N-(1-Naphthyl)-ethylendiamin zu einem roten Azofarbstoff reagiert (Quelle der angegebenen Informationen ist die Gebrauchsanweisung der Teststäbchen, welche von der Firma Merck beigelegt wurde).

Durchführung

Für die chemische Analyse wird das reine flüssige Filtrat verwendet. Das Teststäbchen wird nun mit den Reaktionszonen für zwei Sekunden in das Filtrat getaucht. Gleichzeitig wird die START-Taste des Reflektometers betätigt. Überschüssige Flüssigkeit wird abgestreift bevor das Stäbchen mit den Reaktionszonen zum Display hin bis zum Anschlag in den RQ-flex eingeführt wird. Nach Ablauf der Reaktionszeit kann der Messwert in mg/l NO_2^- am Display abgelesen werden (Beipackzettel der Teststäbchen).

2.4.2. Nitrat-Test

Nitrate sind die Salze der Salpetersäure (HNO_3) und entstehen bei allen Verwesungsprozessen organischer Körper bei Anwesenheit von Basen (Latscha et al., 2005). Aufgrund ihrer guten Löslichkeit in Wasser nehmen Nitrate eine wichtige Rolle in der Nährstoffversorgung von Pflanzen ein. Ein Überschuss an Nitrat im Boden kann allerdings zu Störungen der Osmoseregulation von Pflanzen führen und diese dadurch schädigen.

Natürlich kommen Nitrate in der Biosphäre und Hydrosphäre vor, meist in Form von Natriumnitrat. Nitrate können aber auch durch die so genannte bakterielle Nitrifikation gebildet werden. Dabei werden eiweißhaltige Strukturen von Bakterien (unter anderem von Nitrosomonas) zersetzt (Verwesung), wodurch Ammonium (NH_4^+) freigesetzt wird. In weiterer Folge wird das Ammonium oxidiert; dabei entsteht das Zwischenprodukt Nitrit. Bakterien zum Beispiel der Gattung Nitrobacter oxidieren das Nitrit nun weiter zu Nitrat. Dieser Vorgang ist abhängig vom Sauerstoffangebot; bei Sauerstoffmangel wird das entstandene Nitrat durch Denitrifikation zu elementarem Stickstoff (N) umgewandelt. Die Transformation von Ammonium zu Nitrat wird auch als Nitratzyklus bezeichnet (Rohmann, 1985).

Der Nitratgehalt im Boden hat besonders für Pflanzen einen hohen Stellenwert, denn diese verwerten die Salze als Nährstoffe. Nitratarme Böden werden in der Landwirtschaft gedüngt, um die ausreichende Nährstoffaufnahme der Pflanzen zu gewährleisten. Die Salze der Salpetersäure stellen für pflanzliche Organismen eine wertvolle Stickstoffquelle dar, welche direkt aufgenommen und verwertet werden kann.

So essentiell Nitrat im Boden auch ist, so schädigend kann ein Überschuss dieses Salzes auf den Organismus wirken. Bei Überdüngung droht weiters das Versickern des Nitrates ins Grundwasser. Die Aufnahme von nitrathältigem Wasser ist besonders für Kleinkinder gesundheitsschädigend. Aber auch für Erwachsene kann ein Nitratgehalt im zweistelligen Bereich gefährdend sein. Dabei liegt das eigentliche Problem nicht im Nitrat selbst, sondern in der Reduktion des Nitrates zu Nitrit. Im Körper, vor allem im Darm durch die Einwirkung von Darmbakterien, kann Nitrit zu Nitrosaminen umgebildet werden und diese Stoffe sind kanzerogen (Rohmann, 1985).

Selbst wenn keine Nitrosamine gebildet werden hat Nitrit eine gesundheitsschädigende Wirkung. Wie oben bereits erwähnt oxidiert Nitrit das Hämoglobin im Körper zu Methämoglobin, welches den Sauerstofftransport im Blut stört. Bei Erwachsenen besteht die Möglichkeit einer Rückreduktion des Methämoglobins zu Hämoglobin. Da bei Säuglingen aber die Reduktionskapazität noch nicht ausgereift ist, droht der Säugling von innen her zu ersticken.

Da Nitrat, vor allem aber Nitrit, diese gesundheitsschädigenden Wirkungen aufweisen, gibt es für beide sowohl in Lebensmitteln, als auch im Trinkwasser festgelegte Grenzwerte (Ledig, 1994).

Durchführung

Der Nitratgehalt der Nadelproben kann ebenfalls reflektometrisch bestimmt werden. Dabei müssen zunächst die Nitrationen durch ein Reduktionsmittel zu Nitritionen reduziert werden. Der weitere Reaktionsverlauf wurde bereits beim Nitrit-Test beschrieben.

Für die chemische Analyse wurden Testreagenzien sowie Teststäbchen (Merckoquant[®] Nitrat-Test, Art. 110020; Messbereich: 3 – 90,0 mg/l NO₃⁻) der Firma Merck verwendet. Die weitere Durchführung entspricht jener des Nitrit-Tests. Unterschiedlich ist nur der Zeitpunkt des Einführens der Stäbchen in den Stäbchenadapter, denn dies muss bereits 10 Sekunden vor Ablauf der Reaktionszeit erfolgen. Anschließend kann wieder nach Ablauf der Reaktionszeit der Messwert in mg/l NO₃⁻ am Display abgelesen werden. (Quelle der angegebenen Informationen ist die Gebrauchsanweisung der Teststäbchen, welche von der Firma Merck beigelegt wurde).

2.4.3. Freie schwefelige Säure-Test

Die schwefelige Säure, oder auch Dihydrogensulfit genannt (nach der Nomenklatur der IUPAC), ist eine relativ schwache Säure, welche beim Lösen von Schwefeldioxid in Wasser entsteht. Sie kann nur in wässriger Lösung existieren und ist sehr unbeständig (Holleman, 1995).

Um die freie schwefelige Säure in den Nadelproben nachweisen zu können, muss zunächst die sulfithaltige Probe angesäuert werden, damit Schwefeldioxid (SO_2) freigesetzt werden kann. Erst wenn sich das SO_2 mit einem Gemisch aus Kaliumhexacyanoferrat (II), Zinksulfat und Nitroprussid-Natrium vermischt, entsteht eine rote Verbindung, welche reflektometrisch bestimmt werden kann (Beipackzettel der Teststäbchen).



Abb. 9: Testansatz zur Feststellung von Schwefeldioxid in der Chlorophylllösung

Durchführung

Bei diesem Testverfahren werden sowohl Teststäbchen (Reflectoquant[®], Art. 116137; Messbereich: 1,0– 40,0 mg/l SO_2) als auch die Reagenzien SO_2 -1 und SO_2 -2 verwendet.

Zunächst wird ein Filtrat der Nadelproben angefertigt (siehe oben). Anschließend gießt man 1 ml der Probe in das dafür vorgesehene Testglas und versetzt das Filtrat weiters mit 5 Tropfen des Reagenz SO_2 -2, bevor das Testglas mit einem Stopfen verschlossen wird. Auf die Reaktionszonen des Teststäbchens gibt man vorsichtig einen Tropfen des Reagenz SO_2 -1 und streift überschüssige Flüssigkeit ab. Das Teststäbchen wird nun in das wieder geöffnete Testglas mittig eingeführt, sodass die

Reaktionszone des Stäbchens zur Mitte des Testglases hinweist. Dabei ist zu beachten, dass das Stäbchen unter keinen Umständen mit der Probe im Testglas benetzt werden kann. Das Stäbchen wird nun mit Hilfe des Stopfens in dieser Position fixiert. Das Testglas wird nun vorsichtig geschwenkt; gleichzeitig wird die START-Taste des Reflektometers gedrückt. Die Wartezeit beträgt nun 300 Sekunden. Nach Ablauf der Wartezeit wird das Stäbchen aus dem Testglas genommen und sofort mit den Reaktionszonen zum Display hin bis zum Anschlag in den Stäbchenadapter eingeführt. Nach Ablauf der Reaktionszeit von 5 Sekunden kann der Messwert in mg/l SO₂ am Display abgelesen werden. (Quelle der angegebenen Informationen ist die Gebrauchsanweisung der Teststäbchen, welche von der Firma Merck beigelegt wurde).

2.4.4. Chlor-Test

Bei diesem Verfahren oxidiert Chlor eine organische Verbindung zu einem violetten Farbstoff, der wiederum reflektometrisch bestimmt werden kann. Um den Chlorgehalt in den Nadelproben nachweisen zu können benötigt man einerseits Teststäbchen Merckoquant[®] Chlor-Test, Art. 1.17925.0001; Messbereich: 0,5 – 10,0 mg/l Cl₂), andererseits das Reagenz Cl₂-1.



Abb. 10: Nachweis von Chlor in der Chlorophylllösung

Durchführung

Das Anfertigen des Filtrats erfolgt in gewohnter Manier. Für die Analyse benötigt man 10 ml der Probe, welche in ein dafür vorgesehenes Testglas gefüllt werden. Anschließend werden 5 Tropfen des Reagenz Cl_2 -1 hinzugefügt und das Testglas mit einem Stopfen verschlossen. Das Testglas wird nun kurz geschwenkt und während man die START-Taste des Reflektometers betätigt, wird das Testglas wieder geöffnet und ein Teststäbchen mit beiden Reaktionszonen für 2 Sekunden in die Messprobe eingetaucht. Nachdem überschüssige Flüssigkeit abgestreift wurde, führt man das Stäbchen wieder bis zum Anschlag in den Stäbchenadapter ein. Nach Ablauf der Reaktionszeit von 15 Sekunden kann der Messwert in mg/l Cl_2 am Display abgelesen werden. (Quelle der angegebenen Informationen ist die Gebrauchsanweisung der Teststäbchen, welche von der Firma Merck beigelegt wurde).

2.5. Phototechnik

2.5.1. Infrarotphotographie

Mit Hilfe der Infrarotphotographie (kurz IR-Photographie) kann das für das menschliche Auge nicht sichtbare, langwellige Licht sichtbar gemacht werden.

Unter Licht versteht man generell eine Form der elektromagnetischen Energie („Strahlung“), welche in rhythmischen Wellenbewegungen wandert. Den Abstand zwischen den Kämmen der Wellen bezeichnet man als Wellenlänge, wobei das

Spektrum dieser Längen recht unterschiedlich sein kann (reicht von unter einem Nanometer bis zu mehreren Kilometern).

Die Gesamtheit aller Wellenlängen wird auch als *elektromagnetisches Spektrum* bezeichnet,

wobei vom menschlichen Auge nur ein kleiner Abschnitt

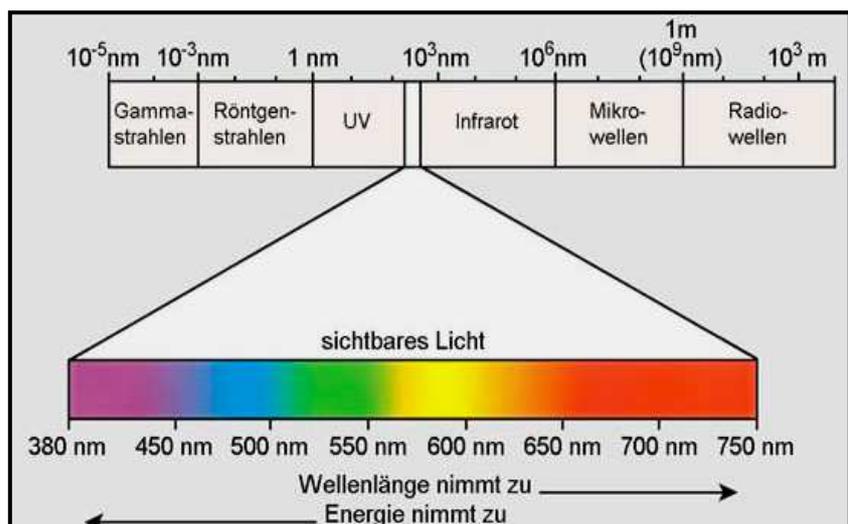


Abb. 11: Elektromagnetisches Spektrum (Campbell, 2006)

dieses Spektrums erfasst werden kann. Dieses Strahlungsfenster umfasst Wellenlängen zwischen 380 und 750 nm und wird als „sichtbares Licht“ bezeichnet, wobei das menschliche Auge die unterschiedlichen Wellenlängen in diesem Bereich als unterschiedliche Farben wahrnimmt.

Alle Wellenlängen, die das Spektrum des sichtbaren Lichtes über- oder unterschreiten, werden vom Auge nicht mehr erfasst (Campbell et. al., 2006).

Mit Hilfe von bestimmter Phototechnik lassen sich die Grenzen der Wahrnehmungsfähigkeiten ein wenig weiter nach außen verschieben. Auf diese Weise kann auch Infrarotstrahlung sichtbar gemacht werden, da ein Sensor in der Kamera unsichtbares Licht so „übersetzen“ kann, dass es vom menschlichen Auge verarbeitet werden kann. Welche Wellenlängen sichtbar gemacht werden können ist abhängig vom verwendeten Filter, daher gibt es auch nicht die Infrarotphotographie schlechthin, sondern viele Varianten davon (Mangold 2012; eye.de).

Der hier verwendete IR-Filter wird auch als Schwarzfilter bezeichnet, da er dem menschlichen Auge fast undurchsichtig und somit schwarz erscheint. Dieser ist notwendig, um beim Photographieren das sichtbare Licht auszublenden, denn nur dann kann ein IR-Photo entstehen (Frantzen, 2010).

Diese Art von Technik ist dabei keineswegs neu. IR-Filter wurden schon lange vor der Erfindung von Digitalkameras verwendet, nur musste man damals auch einen passenden IR-Film in den Photoapparat einlegen.

Das Um und Auf dieser Photographietechnik ist jedoch der Einsatz des IR- oder Schwarzfilters. Ziel ist es, nur die gewünschten Wellenlängen durchzulassen und alles andere auszufiltern. Licht im IR-Bereich hat eine Wellenlänge von mindestens 750 nm (1 Nanometer = 1 Millionstel Millimeter) und liegt daher über dem sichtbaren Bereich.

Die meisten Sensoren von Digitalkameras haben ursprünglich eine hohe Lichtempfindlichkeit und wären daher gut geeignet für Aufnahmen sowohl im UV- als auch im IR-Bereich. Zu Beginn dieser Testreihe wurde daher überprüft, ob die zum Einsatz kommende Kamera überhaupt IR-tauglich ist. Dies ist relativ einfach herauszufinden, nämlich indem man einen Knopf einer Fernbedienung drückt, wobei nun die IR-Diode der Fernsteuerung aufleuchtet (für das menschliche Auge nicht sichtbar). Photographiert man nun mit der Kamera diese IR-Diode und diese

erscheint leuchtend auf dem Display des Photoapparates, so kann man davon ausgehen, dass die Kamera IR-tauglich ist. Bleibt das Bild jedoch schwarz, ist die Kamera für IR-Photographie eher ungeeignet (Frantzen, 2010).

Da jedoch von den Herstellern das Erstellen von möglichst natürlichen Bildern angestrebt wird, sind häufig vor den Sensoren Filter eingebaut, die das durchgelassene Licht auf den sichtbaren Bereich von 400 bis 750 nm beschränken (eine Überlagerung des sichtbaren Lichtes durch IR-Licht brächte einen Schärfeverlust). Es ist daher erforderlich, die verwendete Kamera auf IR-Tauglichkeit zu überprüfen. Die vom Hersteller eingebauten Sperrfilter können nicht immer entfernt werden, daher muss man auf eine andere Möglichkeit zurückgreifen. Da die meisten fix installierten Filter vor dem Sensor eine geringere Dichte aufweisen, wie ein Schwarzfilter der vor die Linse gesetzt wird, kann man die Kamera sozusagen „überlisten“. Indem man außerdem die Belichtungszeit des Photoapparates deutlich verlängert (kann manuell eingestellt werden), kann infrarote Strahlung nun wieder erfasst werden (Mangold 2012; eye.de).



Abb. 12: Blick auf den inaktiven Infrarotsender einer Fernbedienung



Abb. 13: Blick auf den aktivierten Infrarotsender einer Fernbedienung; gut zu erkennen ist das Leuchten der Infrarotdiode, womit der Nachweis der Infrarottauglichkeit der verwendeten Digitalkamera erbracht ist

2.5.2. Der Sperrfilter:

Die japanische Firma HOYA stellte bis vor wenigen Jahren diesen Glasfilter her, mit welchem man nur Licht mit gewünschter Wellenlänge durchlassen kann, wobei alle weiteren Wellenlängen ausgesperrt werden.



Abb. 14: Hoya-Filter
(hoyafilter.com)

HOYA-Filter Infrarot (R72)

Dieser Filter lässt nur Infrarotstrahlen mit einer Wellenlänge von über 720 nm durch. Schraubt man vor dem Photographieren diesen Filter auf das Objektiv der Kamera, so werden etwa 90% des sichtbaren Lichtes mit Wellenlängen von bis zu 720nm ausgefiltert. Das bedeutet, dass ein 10%iger Rest des sichtbaren Lichtes noch durchgelassen wird. Bei entsprechend langer Belichtungszeit können so farbige IR-Aufnahmen von der Umgebung hergestellt werden (digitalkamera.de).

Nun war die Kamera für die IR-Photographie umgerüstet und die ersten Probephotos von Pflanzen konnten angefertigt werden. Nachweisbar war, dass das Chlorophyll in Pflanzen stark im IR-Frequenzbereich reflektiert und dabei auf der Aufnahme sehr hell bis nahezu weiß erscheinen (hoyafilter.com). Dieses Phänomen nennt man „Wood-Effekt“ und er ist ein wesentlicher Bestandteil bei künstlerischen Landschaftsaufnahmen (beschrieben wurde dieser Effekt erstmals im Jahre 1919 durch den amerikanischen Physiker Robert Williams Wood, der diesem Phänomen auch seinen Namen gab) (Williams & Williams; msp.rmit.edu.au/Article).

Das Anwendungsgebiet der Infrarotphotographie erstreckt sich vom Militärwesen über die Medizin bis hin zur Wohnraumisolierung. Auch eignet sie sich, um etwaige Waldschäden aufzuzeigen und zu dokumentieren. Unter dem Begriff der Fernerkundung findet diese Technik Verwendung an Universitäten, in der Land- und Forstwirtschaft, wie auch in der ESA (European Space Agency).

An der Technischen Universität in Dresden ist die Lehre der Fernerkundung fester Bestandteil des Studienangebotes. Die Fernerkundung macht sich das Reflexionspotential, über welches jedes Objekt abhängig von seiner Oberflächenstruktur verfügt, zu Nutze. Jede Objektart weist im infraroten Bereich

eine charakteristische Reflexion (das heißt ein Frequenzmuster der elektromagnetischen Strahlung, das vom Objekt reflektiert wird) auf, wodurch man von jedem Objekt einen „spektralen Fingerabdruck“ anfertigen kann, welcher wiederum Grundlage für die Interpretation von Fernerkundungsbildern darstellt.

Der spektrale Fingerabdruck von Pflanzenblättern ist dabei stark abhängig von der Pigmentabsorption (damit ist das Absorptionsspektrum von Chlorophyll A und B gemeint), der Zellstruktur des Blattes und der Lichtabsorption durch das Wasser. Mit Hilfe dieses Wissens lässt sich für jeden Baum eine „spektrale Signatur“ erstellen. Ist der Baum aber nun geschädigt, so nimmt die Reflexion im sichtbaren Bereich zu, der Reflexionsgrad im nahen Infrarotbereich jedoch ab, was auf die veränderte Zellstruktur zurück zu führen ist (Arbeitsblatt zur Vorlesung Fernerkundung 1; Technische Universität Dresden).

Die staatliche Forschungsanstalt für Gartenbau in Weihenstephan nutzt die Photographie im infrarotnahen Bereich, um Aussagen über die Vitalität der Pflanzen sowie deren Photosyntheseaktivität treffen zu können. Dabei richten sie das Augenmerk auf das Reflexionsverhalten von Pflanzen im sichtbaren Bereich und vergleichen dieses mit dem Reflexionsverhalten im infraroten Bereich, wobei gesunde, vitale Pflanzen im infraroten Bereich deutlich stärker reflektieren sollten.

Die nachstehende Grafik der Forschungsanstalt zeigt das unterschiedliche Reflexionsverhalten von Wasser, Pflanzen und trockenem Boden im sichtbaren wie auch im Infrarotbereich.

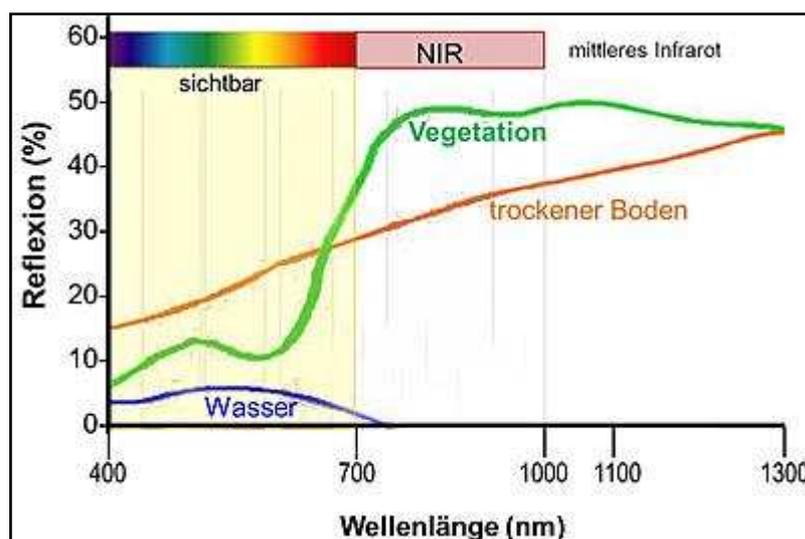


Abb. 15: Reflexionsverhalten von Vegetation, Wasser und trockenem Boden zwischen 400–1300 nm (hswt.de)

Um nun qualifizierte Aussagen über den Vitalzustand einer Pflanze machen zu können, muss das Reflexionsverhalten im nahen Infrarotbereich in Relation gesetzt werden mit jenem im sichtbaren Spektrum. Wenn Daten in beiden Spektralbereichen erhoben wurden, werden diese „über eine spezielle Software zum "normalisierten differenzierten Vegetationsindex" (NVDI, Normalized Difference Vegetation Index) verrechnet, der stark mit Dichte und Vitalität der Vegetationsdecke korreliert“ (Kell 2012; hswt.de).

Im Jahre 1992 führte ein Wissenschaftler aus Kanada, J.A. Williams, eine groß angelegte Untersuchung von Parkbäumen im Peter Lougheed Provincial Park in Kananaskis Valley durch, mit dem Ziel, die dort vorherrschende Vegetation mit Hilfe der Fernerkundung durch Infrarotphotographie zu klassifizieren. Diese Methode stellte sich als sehr wertvoll heraus, da sie eine gute Möglichkeit bot, Vorkommen und Verteilung sowie ökologische Aspekte der Vegetation zu dokumentieren.

Nachdem zahlreiche Fernerkundungs- und Satellitenbilder von dieser Gegend aufgenommen wurden, konnten die Wissenschaftler die Bilder interpretieren und auswerten. Die Reflexionswerte dieses Gebietes ließen eine schnelle Dokumentation der Topographie dieses Gebietes zu (Williams 1992; ucalgary.ca).

Auch der Europäischen Raumfahrtbehörde (ESA) ist das Wissen um Infrarotaufnahmen für Fernerkundungsbilder bekannt. Wie bereits oben erwähnt ergibt sich aus der Relation der Reflexion im Infrarotbereich und der Reflexion im sichtbaren Bereich der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), mit welchem das „Ausmaß der Vegetationsfläche in Fernerkundungsbildern angegeben“ werden kann. Nicht nur, dass aufgrund dieses spektralen Fingerabdrucks eine Unterscheidung zwischen bewachsener Fläche und kahlem Boden auf Satellitenbildern recht einfach erfolgen kann, gibt dieser Reflexionsunterschied auch Auskunft über die photosynthetische Aktivität der Pflanzen und auch die Biomasse kann aufgrund dieser Methode bestimmt werden.

Ein Blatt wird vom menschlichen Auge deshalb als grün wahrgenommen, da es hauptsächlich Strahlung aus dem grünen Bereich des sichtbaren Spektrums reflektiert. Rot und Blau werden hingegen nicht so stark reflektiert. Die spektrale Signatur eines Blattes beinhaltet also auch Informationen über die emittierende oder reflektierende Oberfläche.

Zur Kartografierung der Erdoberfläche müssen Satelliten die spektralen Signaturen verschiedener Oberflächen unterscheiden können.

Das menschliche Auge nimmt nur einen Teil des elektromagnetischen Spektrums wahr. Die Fernerkundungsgeräte messen auch für den Menschen unsichtbare Wellenlängen und vermitteln uns so zusätzliche Informationen über unsere Umwelt.

(European Space Agency 2011; esa.int)

2.5.3. Der Photoapparat

Bei der verwendeten digitalen Spiegelreflexkamera handelt es sich um das Modell Nikon D 60 (Boeres 2008; digitalkamera.de/Testbericht).



Abb. 16: Nikon D 60 (Foto: MediaNord; digitalkamera.de)

Technische Daten

Auflösung:	10,2 Megapixel
Maximale Bildauflösung:	3.872 x 2.592
Seitenverhältnis:	3 : 2
Objektiv:	AF – S Nikkor 18 – 55mm
Filtergewinde:	52mm

2.5.4. Das Stativ

Um verwackelungsfreie Aufnahmen sowohl im sichtbaren Bereich des Lichts als auch im Infrarotbereich zu gewährleisten wurde ein Photostativ verwendet (edugroup.at).



Abb. 17: Giotto's VT 805 (onyougo.com)

Technische Daten

Giotto's VT 805

Stativtyp:	Dreibeinstativ
Gewicht:	1,1 Kg
Stativkopftyp:	Schwenkkopf
Betriebshöhe:	59cm–152cm
Stativmittelsäule:	Kurbelstativ
Merkmale:	integrierte Wasserwaage, Beinklammern (Schnellverschlüsse)

3. Ergebnisse

3.1. Photographien der Standorte (digitaloptisch und mit Infrarot-Filter):

Standort NORD – August 2010



Abb. 18: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 19: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort NORDOST – August 2010



Abb. 20: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 21: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort OST – August 2010

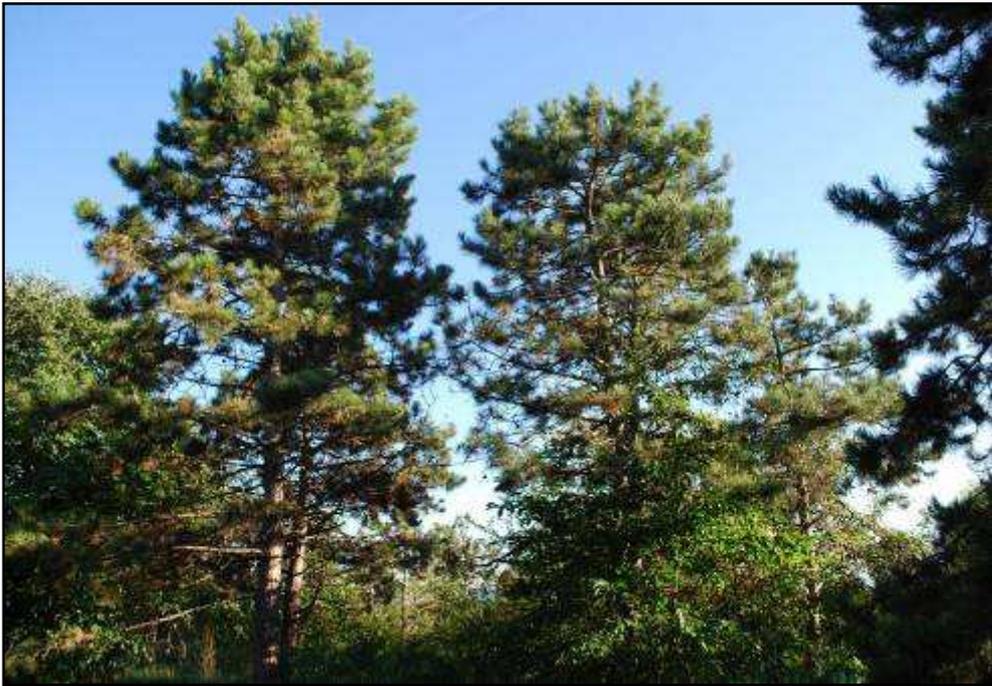


Abb. 22: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 23: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜDOST – August 2010



Abb. 24: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 25: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜD – August 2010



Abb. 26: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 27: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜDWEST – August 2010



Abb. 28: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 29: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 0,5 sec.; abgestorbene Nadelareale erscheinen dunkel

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 30: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.

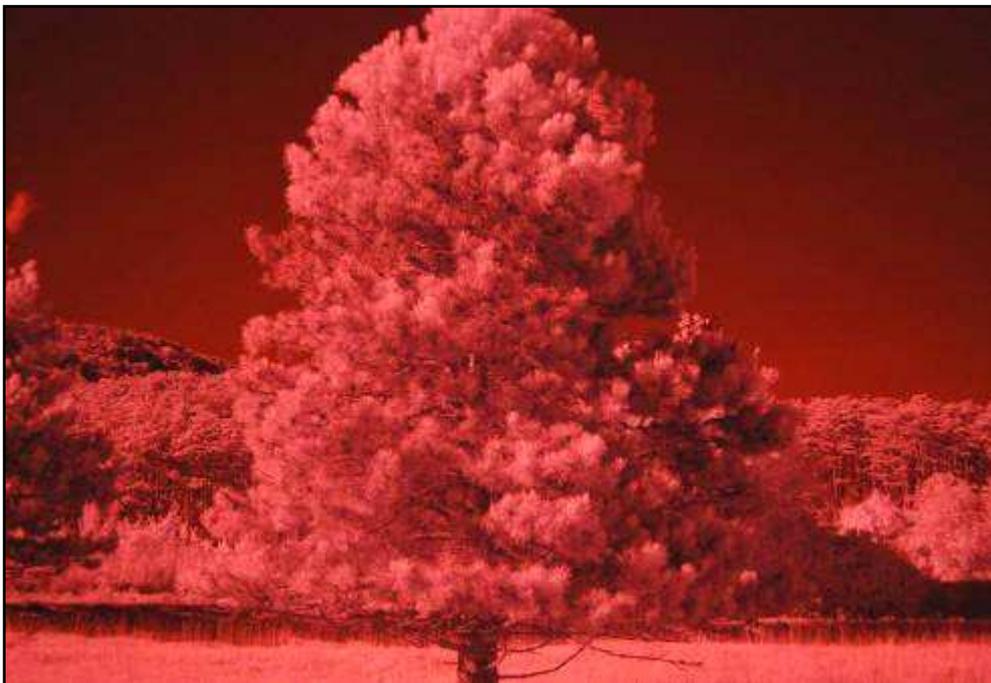


Abb. 31: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 1 sec.

Standort WEST – August 2010



Abb. 32: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.

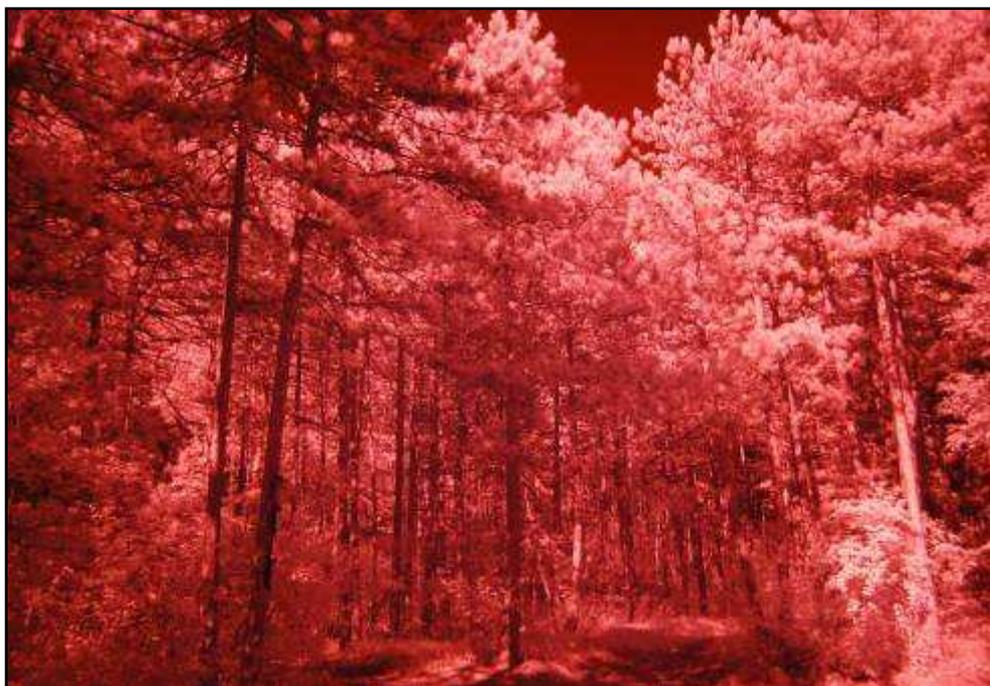


Abb. 33: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort NORDWEST – August 2010



Abb. 34: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/125 sec.

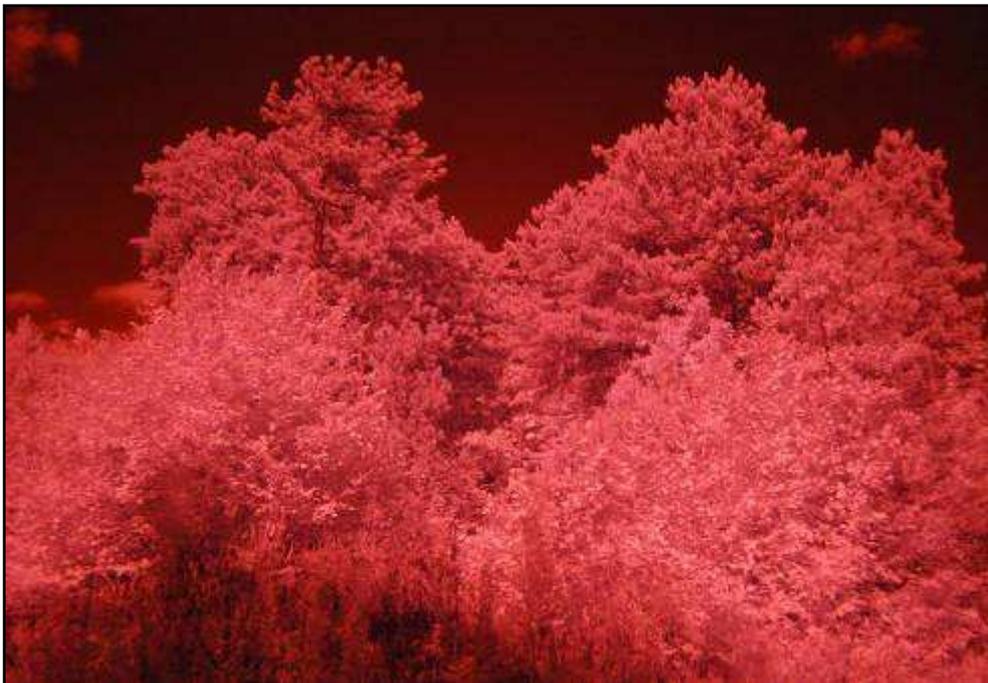


Abb. 35: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 0,5 sec.

Standort ZENTRUM – August 2010

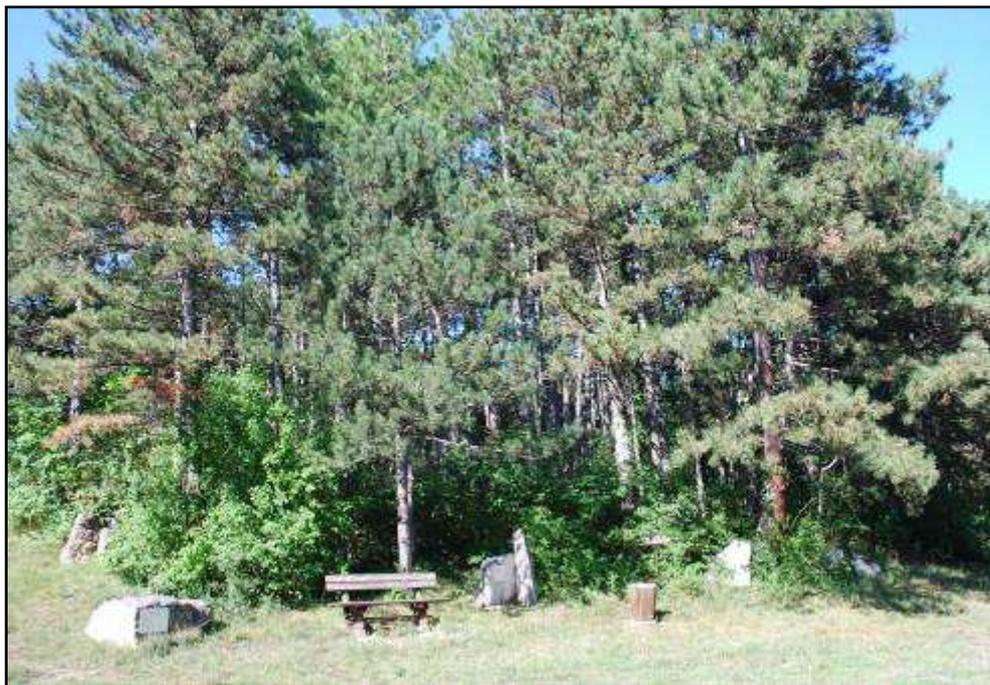


Abb. 36: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/80 sec.



Abb. 37: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort NORD – September 2010



Abb. 38: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/60



Abb. 39: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort NORDOST – September 2010



Abb. 40: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 41: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort OST – September 2010



Abb. 42: digital optisch bei Blende 9,0; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 43: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜDOST – September 2010



Abb. 44: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 45: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort SÜD – September 2010



Abb. 46: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 47: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort SÜDWEST – September 2010



Abb. 48: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 49: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 50: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 51: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort WEST – September 2010



Abb. 52: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/50 sec.



Abb. 53: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 15 sec.

Standort NORDWEST – September 2010



Abb. 54: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 55: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort ZENTRUM – September 2010



Abb. 56: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/60 sec.



Abb. 57: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.

Standort NORD – Oktober 2010



Abb. 58: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 59: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort NORDOST – Oktober 2010



Abb. 60: digital optisch bei Blende 7,5; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 61: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort OST – Oktober 2010



Abb. 62: digital optisch bei Blende 7,5; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 63: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort SÜDOST – Oktober 2010



Abb. 64: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 65: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.

Standort SÜD – Oktober 2010



Abb. 66: digital optisch bei Blende 4,8; Belichtungszeit 1/80 sec.



Abb. 67: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.

Standort SÜDWEST – Oktober 2010



Abb. 68: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 69: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 70: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 71: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 15 sec.

Standort WEST – Oktober 2010



Abb. 72: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 73: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.

Standort NORDWEST – Oktober 2010



Abb. 74: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 75: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort ZENTRUM – Oktober 2010



Abb. 76: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 77: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort NORD – November 2010



Abb. 78: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/60 sec.



Abb. 79: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.

Standort NORDOST – November 2010



Abb. 80: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 81: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 15 sec.

Standort OST – November 2010



Abb. 82: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 83: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 13 sec.

Standort SÜDOST – November 2010



Abb. 84: digital optisch bei Blende 4,5; Belichtungszeit 1/80 sec.



Abb. 85: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort SÜD – November 2010



Abb. 86: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/60 sec.



Abb. 87: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort SÜDWEST – November 2010



Abb. 88: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.

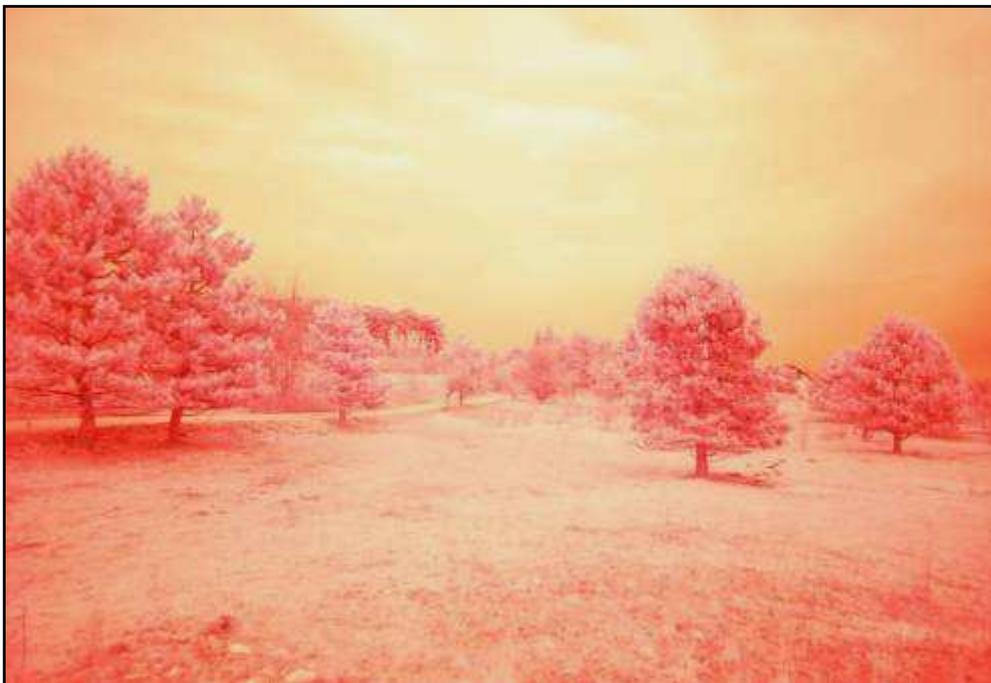


Abb. 89: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 13 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 90: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 91: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 15 sec.

Standort WEST – November 2010



Abb. 92: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/60 sec.



Abb. 93: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 20 sec.

Standort NORDWEST – November 2010



Abb. 94: digital optisch bei Blende 3,8; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 95: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 13 sec.

Standort ZENTRUM – November 2010



Abb. 96: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/60 sec.



Abb. 97: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 20 sec.

Standort NORD – Dezember 2010



Abb. 98: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/60 sec.



Abb. 99: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort NORDOST – Dezember 2010



Abb. 100: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 101: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort OST – Dezember 2010

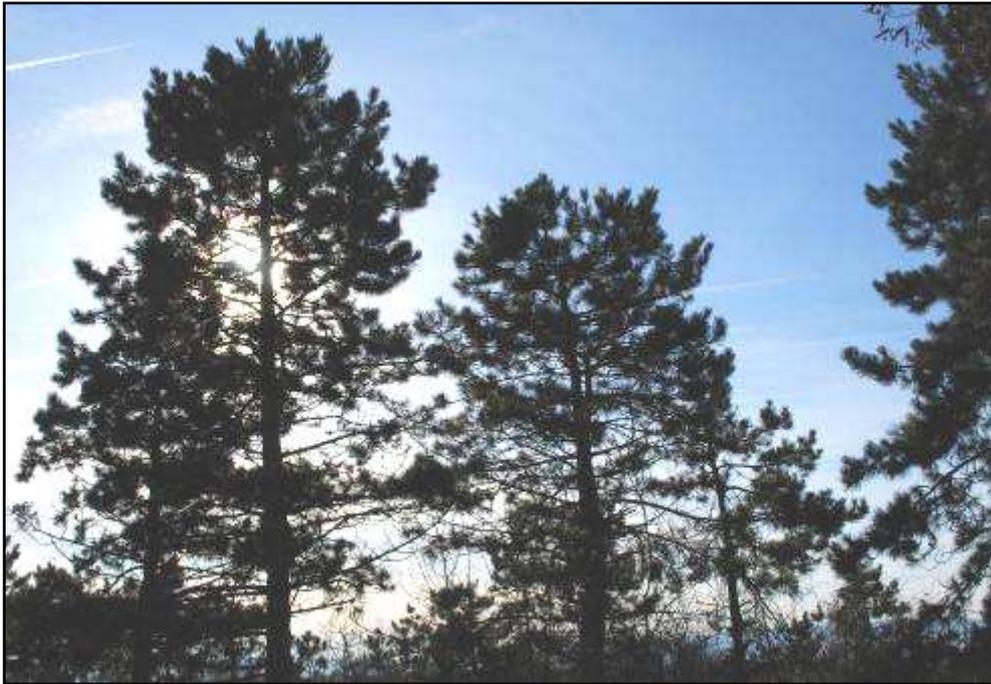


Abb. 102: digital optisch bei Blende 9,0; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 103: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort SÜDOST – Dezember 2010



Abb. 104: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/200 sec.

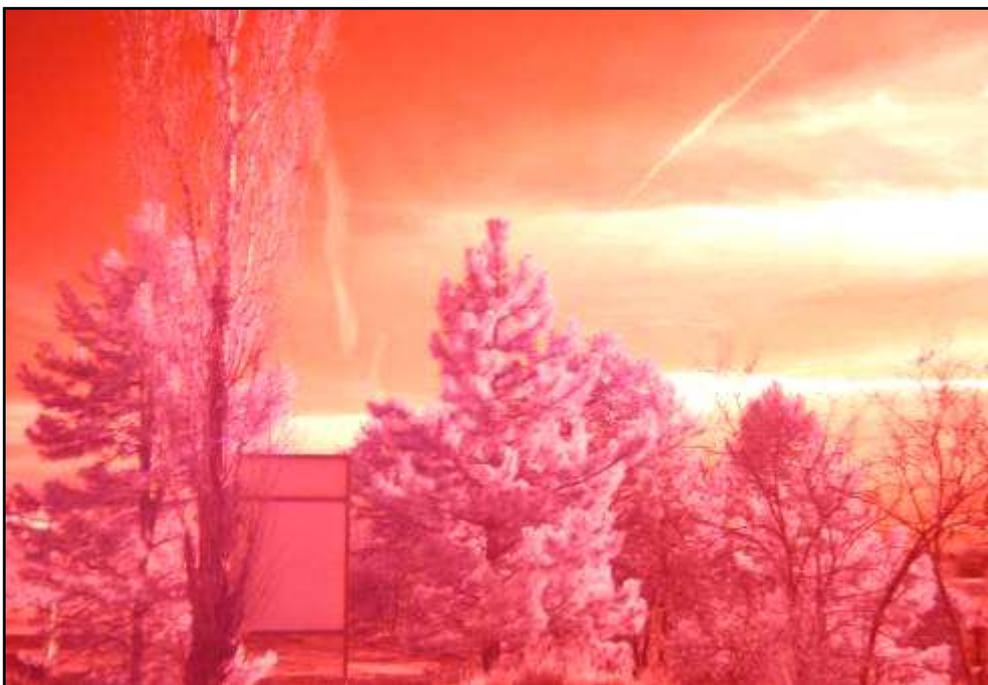


Abb. 105: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort SÜD – Dezember 2010



Abb. 106: digital optisch bei Blende 3,6; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 107: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort SÜDWEST – Dezember 2010



Abb. 108: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 109: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 110: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 111: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort WEST – Dezember 2010



Abb. 112: digital optisch bei Blende 4,5; Belichtungszeit 1/80 sec.



Abb. 113: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.

Standort NORDWEST – Dezember 2010



Abb. 114: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 115: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort ZENTRUM – Dezember 2010



Abb. 116: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 117: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort NORD – Jänner 2011



Abb. 118: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 119: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort NORDOST – Jänner 2011



Abb. 120: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 121: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort OST – Jänner 2011



Abb. 122: digital optisch bei Blende 9,0; Belichtungszeit 1/250 sec.

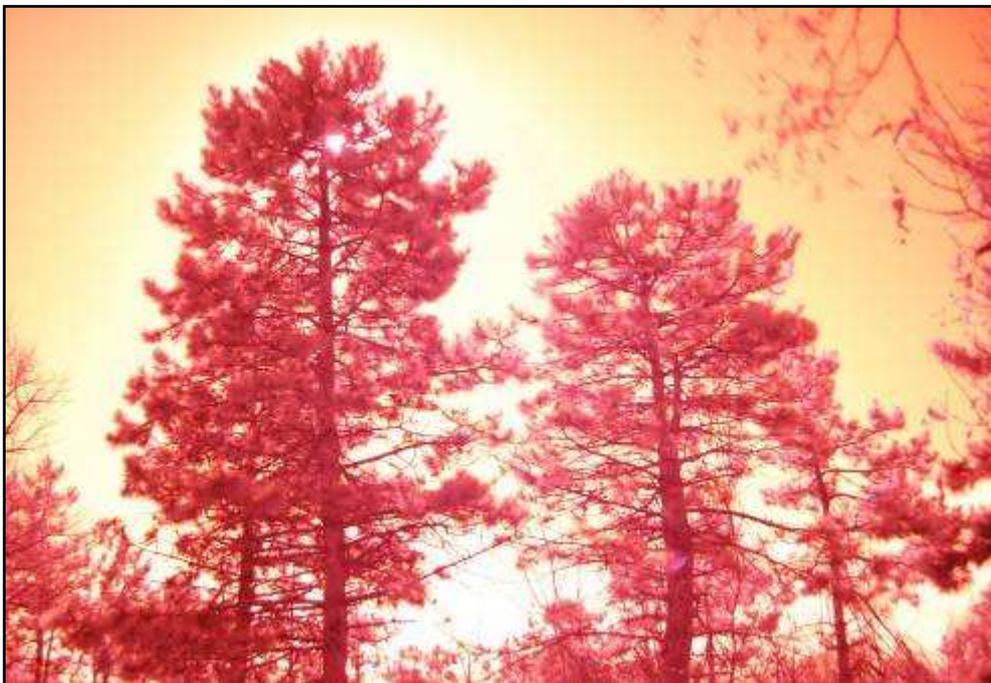


Abb. 123: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort SÜDOST – Jänner 2011



Abb. 124: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 125: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort SÜD – Jänner 2011



Abb. 126: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 127: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort SÜDWEST – Jänner 2011



Abb. 128: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 129: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht

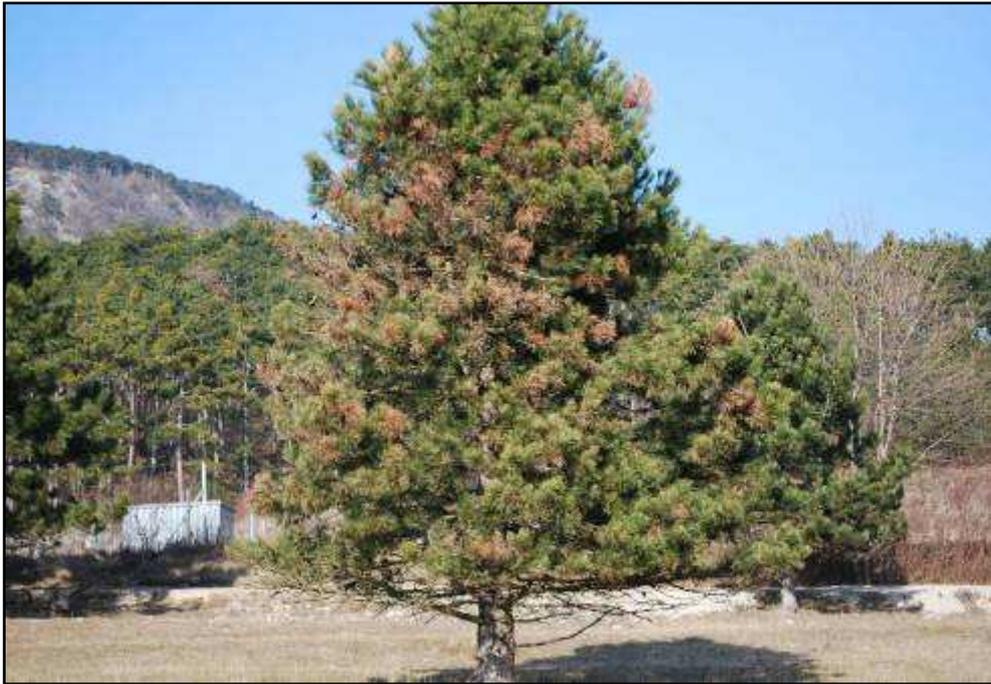


Abb. 130: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 131: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort WEST – Jänner 2011



Abb. 132: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 133: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort NORDWEST – Jänner 2011



Abb. 134: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/125 sec.

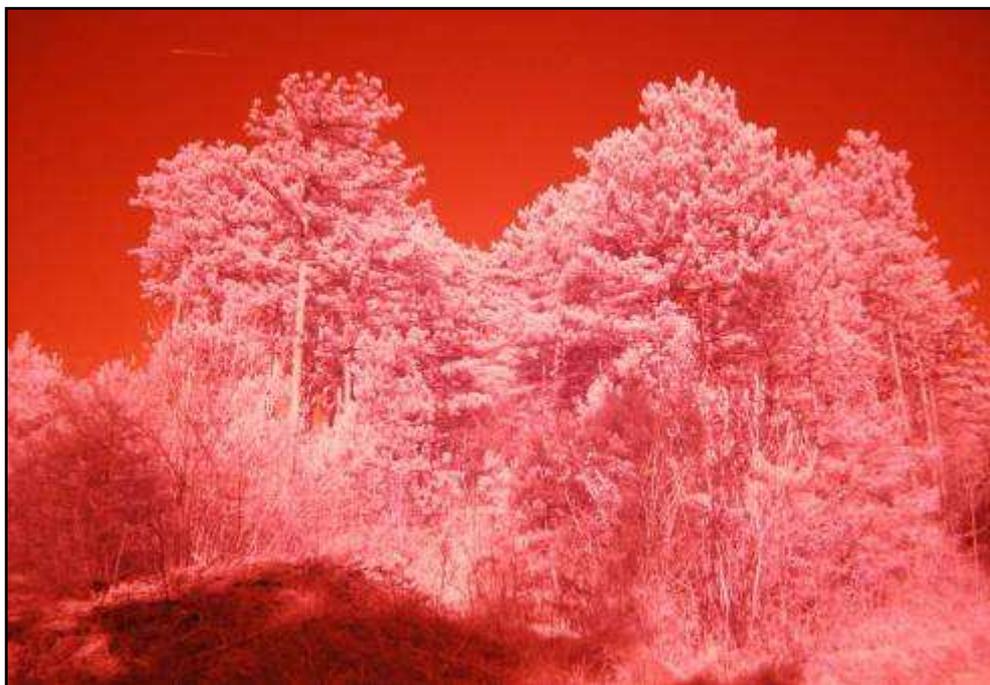


Abb. 135: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort ZENTRUM – Jänner 2011

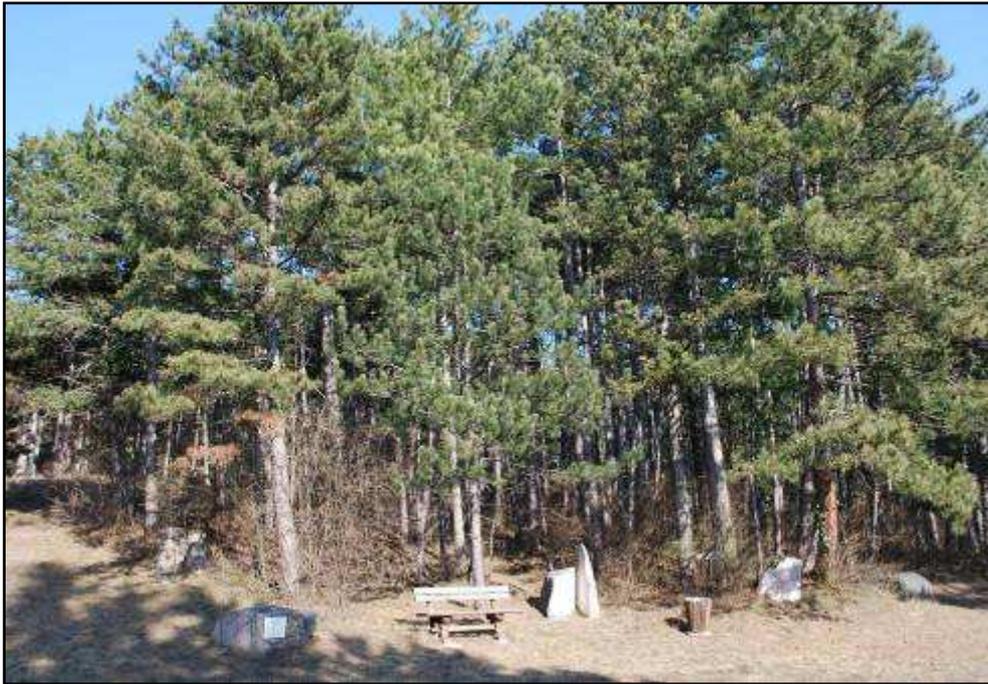


Abb. 136: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 137: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort NORD – Februar 2011



Abb. 138: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 139: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort NORDOST – Februar 2011



Abb. 140: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 141: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort OST – Februar 2011



Abb. 142: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 143: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜDOST – Februar 2011



Abb. 144: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 145: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort SÜD – Februar 2011



Abb. 146: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 147: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort SÜDWEST – Februar 2011



Abb. 148: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 149: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 1,3 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 150: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 151: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort WEST – Februar 2011



Abb. 152: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 153: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec,

Standort NORDWEST – Februar 2011



Abb. 154: digital optisch bei Blende 3,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 155: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort ZENTRUM – Februar 2011



Abb. 156: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 157: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort NORD – März 2011



Abb. 158: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/60 sec.



Abb. 159: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort NORDOST – März 2011



Abb. 160: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 161: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort OST – März 2011



Abb. 162: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/250 sec.



Abb. 163: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort SÜDOST – März 2011



Abb. 164: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 165: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort SÜD – März 2011



Abb. 166: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 167: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort SÜDWEST – März 2011



Abb. 168: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 169: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 170: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 171: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort WEST – März 2011



Abb. 172: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 173: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort NORDWEST – März 2011



Abb. 174: digital optisch bei Blende 3,8; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 175: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort ZENTRUM – März 2011



Abb. 176: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 177: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort NORD – April 2011



Abb. 178: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/60 sec.



Abb. 179: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort NORDOST – April 2011



Abb. 180: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 181: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort OST – April 2011



Abb. 182: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/250 sec.



Abb. 183: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort SÜDOST – April 2011



Abb. 184: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 185: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort SÜD – April 2011



Abb. 186: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 187: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort SÜDWEST – April 2011



Abb. 188: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 189: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 190: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 191: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort WEST – April 2011



Abb. 192: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 193: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort NORDWEST – April 2011



Abb. 194: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 195: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort ZENTRUM – April 2011



Abb. 196: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 197: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort NORD – Mai 2011



Abb. 198: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 199: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort NORDOST – Mai 2011



Abb. 200: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 201: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort OST – Mai 2011



Abb. 202: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 203: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort SÜDOST – Mai 2011



Abb. 204: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 205: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort SÜD – Mai 2011



Abb. 206: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 207: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec. bei 800 ASA

Standort SÜDWEST – Mai 2011



Abb. 208: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 209: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 210: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.

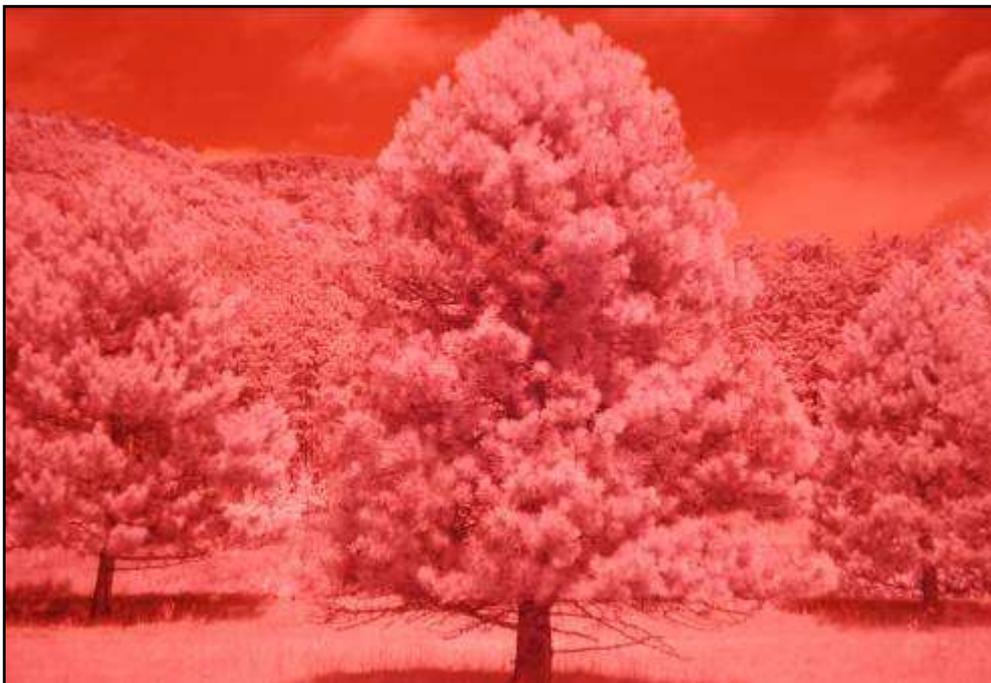


Abb. 211: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort WEST – Mai 2011



Abb. 212: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 213: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort NORDWEST – Mai 2011



Abb. 214: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 215: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort ZENTRUM – Mai 2011



Abb. 216: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 217: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort NORD – Juni 2011



Abb. 218: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 219: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort NORDOST – Juni 2011



Abb. 220: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 221: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort OST – Juni 2011



Abb. 222: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 223: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort SÜDOST – Juni 2011



Abb. 224: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 225: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort SÜD – Juni 2011



Abb. 226: digital optisch bei Blende 4,8; Belichtungszeit 1/100 sec.



Abb. 227: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort SÜDWEST – Juni 2011



Abb. 228: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 229: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 230: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 231: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort WEST – Juni 2011



Abb. 232: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 233: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort NORDWEST – Juni 2011



Abb. 234: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 235: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort ZENTRUM – Juni 2011



Abb. 236: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 237: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.

Standort NORD – Juli 2011



Abb. 238: digital optisch bei Blende 4,5; Belichtungszeit 1/80 sec.



Abb. 239: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.

Standort NORDOST – Juli 2011



Abb. 240: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 241: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort OST – Juli 2011



Abb. 242: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 243: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort SÜDOST – Juli 2011



Abb. 244: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 245: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

Standort SÜD – Juli 2011



Abb. 246: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 247: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.

Standort SÜDWEST – Juli 2011



Abb. 248: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.



Abb. 249: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 1 sec.

Standort SÜDWEST – Detailansicht



Abb. 250: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/160 sec.



Abb. 251: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort WEST – Juli 2011



Abb. 252: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 253: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.

Standort NORDWEST – Juli 2011



Abb. 254: digital optisch bei Blende 3,8; Belichtungszeit 1/125 sec.



Abb. 255: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.

Standort ZENTRUM – Juli 2011



Abb. 256: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.

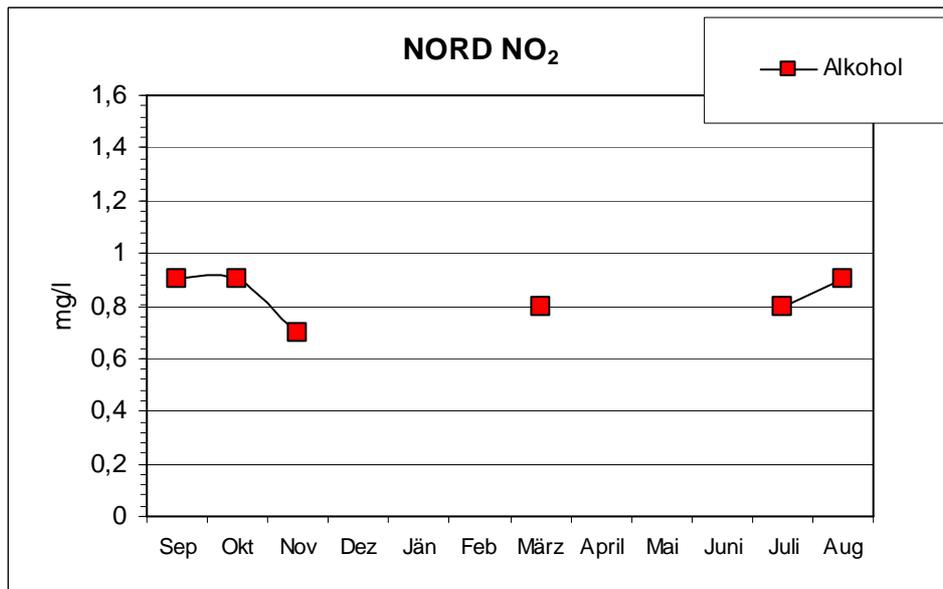


Abb. 257: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.

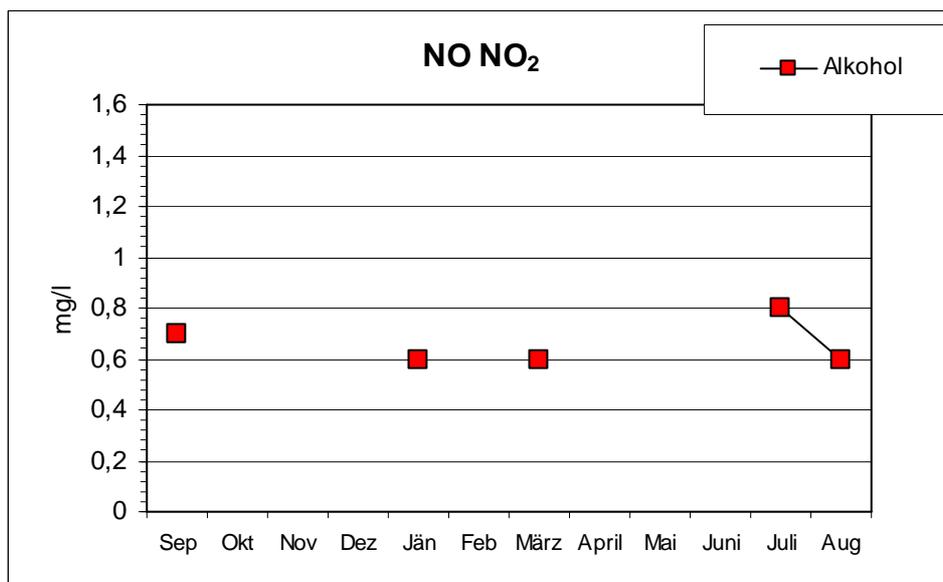
3.2. Ergebnisse der chemischen Analysen

3.2.1. Ergebnisse der Nitritmessungen

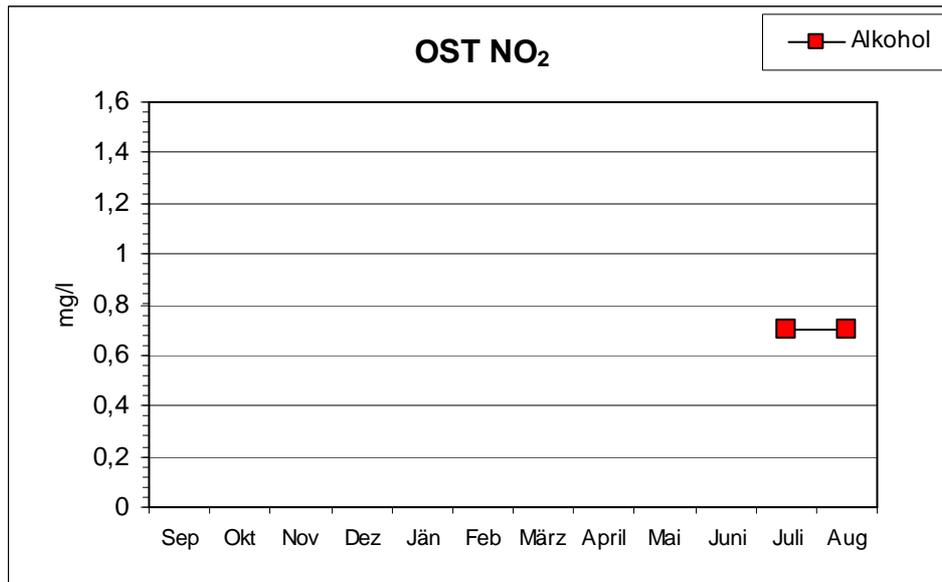
Die nachstehenden Grafiken zeigen die gemessenen Nitritkonzentrationen an den diversen Standorten im Jahresverlauf. Da sich Nitrit in Wasser nur schlecht bis gar nicht lösen lässt, wurden nur jene Konzentrationen grafisch dargestellt, welche mit Hilfe des Lösungsmittels Alkohol aus dem Pflanzenmaterial extrahiert und gemessen werden konnte.



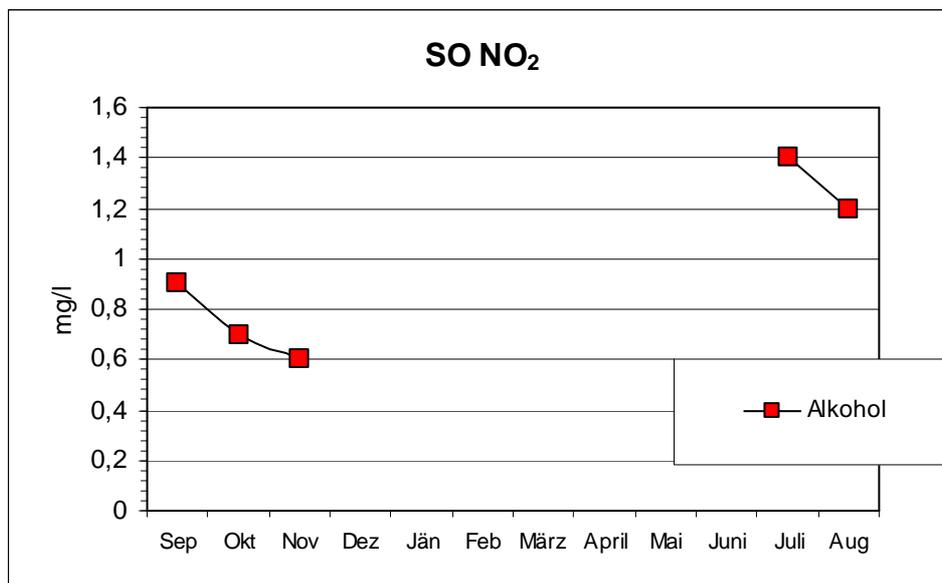
Grafik 1: Nitritkonzentration am Standort Nord; Lösungsmittel Alkohol



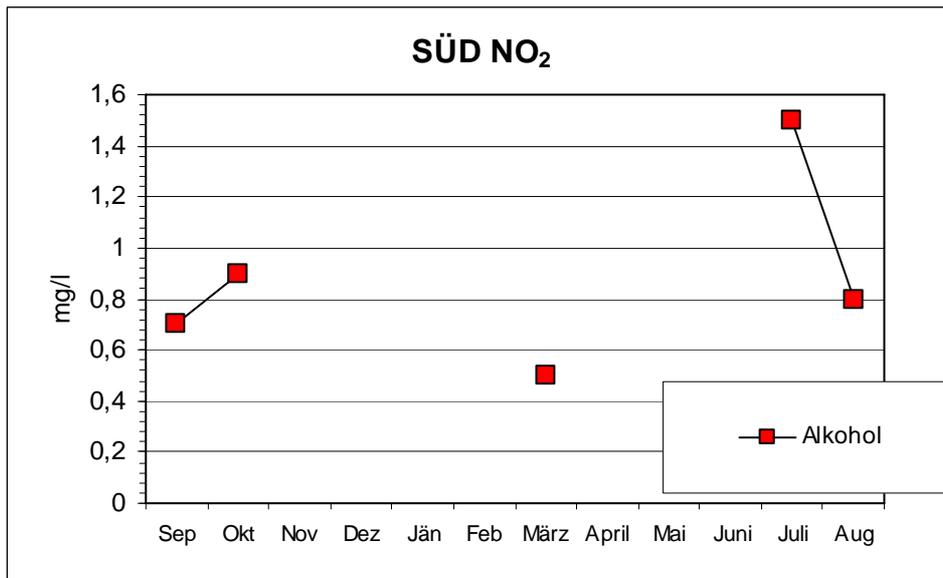
Grafik 2: Nitritkonzentration am Standort Nordost; Lösungsmittel Alkohol



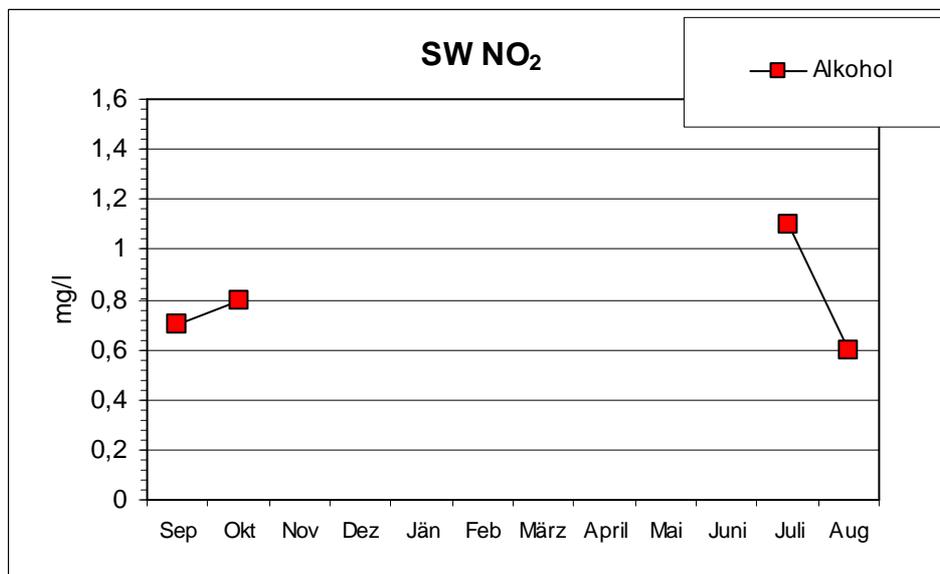
Grafik 3: Nitritkonzentration am Standort Ost; Lösungsmittel Alkohol. In den Monaten September 2010 bis Juni 2011 lagen die Nitritkonzentrationen jeweils unter dem messbaren Bereich der Teststäbchen.



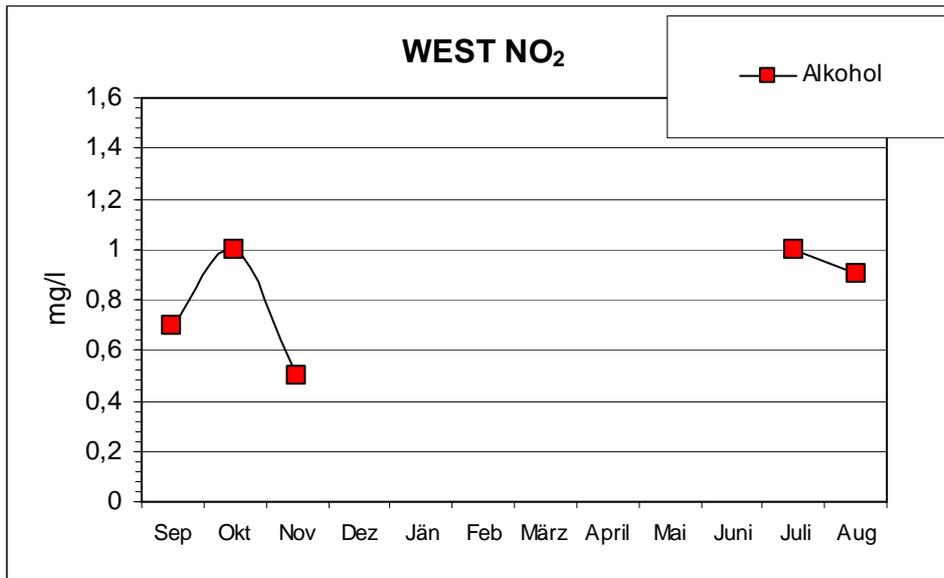
Grafik 4: Nitritkonzentration am Standort Südost; Lösungsmittel Alkohol



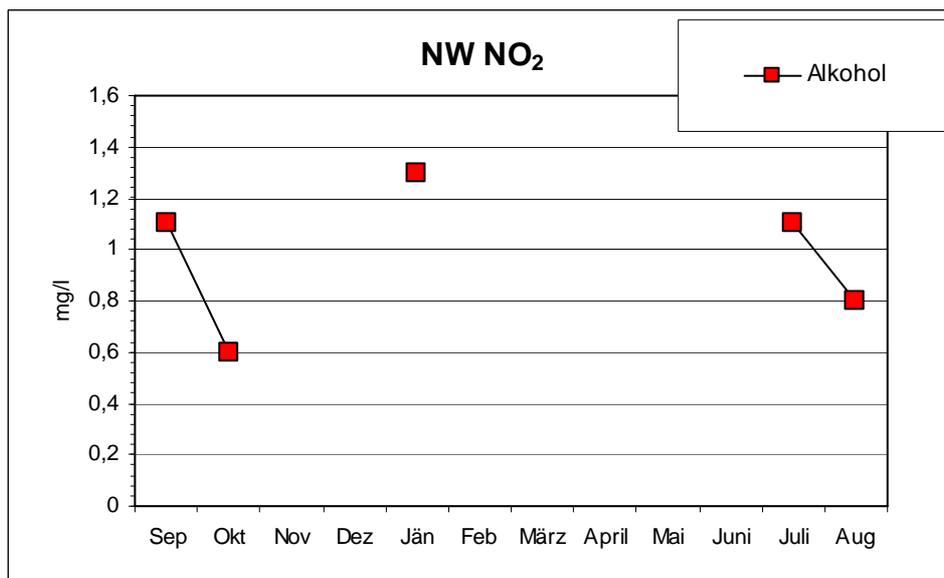
Grafik 5: Nitritkonzentration am Standort Süd; Lösungsmittel Alkohol. Die Grafik zeigt, dass die Nitritkonzentration während der Wintermonate rapide abnimmt.



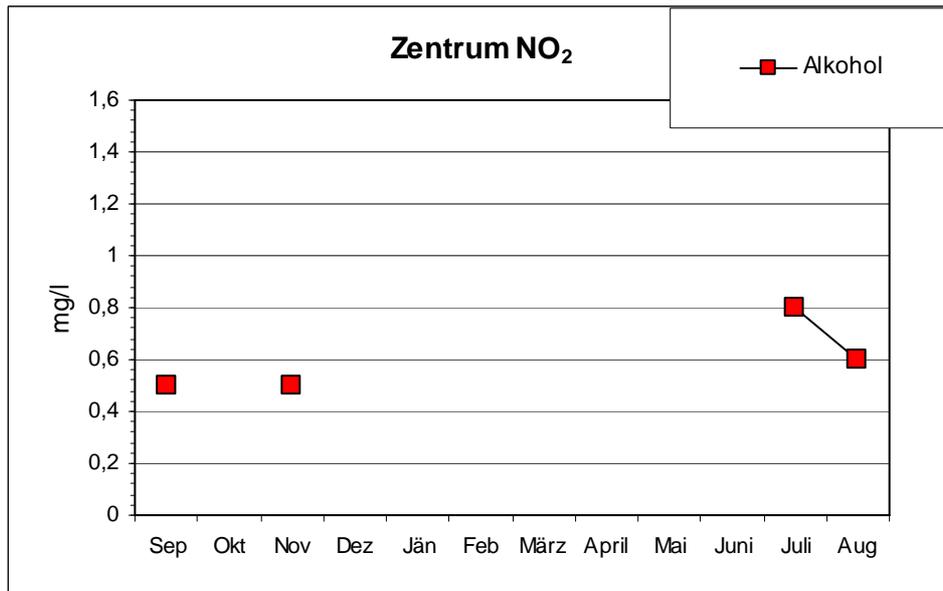
Grafik 6: Nitritkonzentration am Standort Südwest; Lösungsmittel Alkohol. Auch an diesem Standort konnte Nitrit während der Wintermonate nicht nachgewiesen werden.



Grafik 7: Nitritkonzentration am Standort West; Lösungsmittel Alkohol



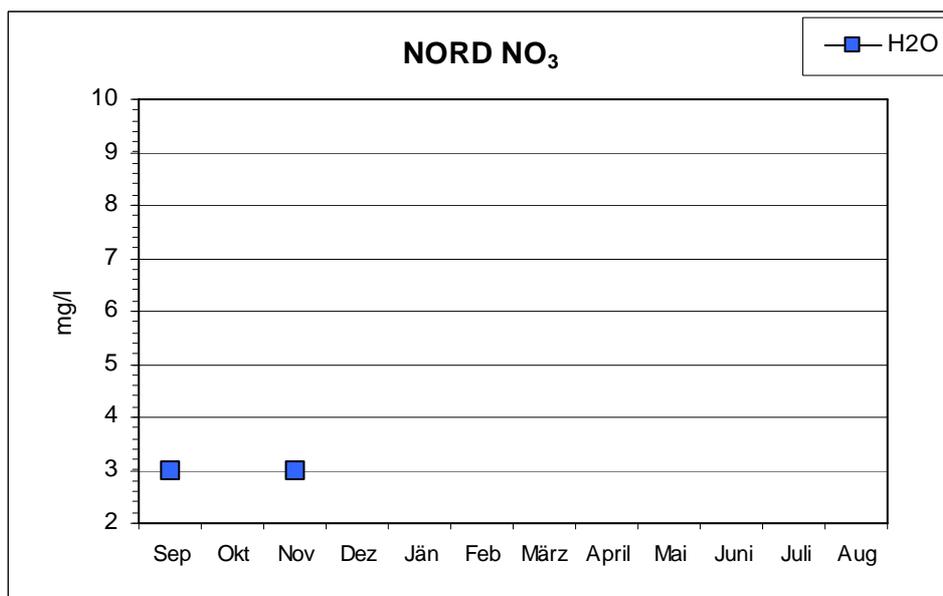
Grafik 8: Nitritkonzentration am Standort Nordwest; Lösungsmittel Alkohol. Obwohl Nitrit hauptsächlich in den Frühlings- und Sommermonaten nachgewiesen werden konnte, wurde am Standort Nordwest auch im Jänner eine relativ hohe Konzentration gemessen.



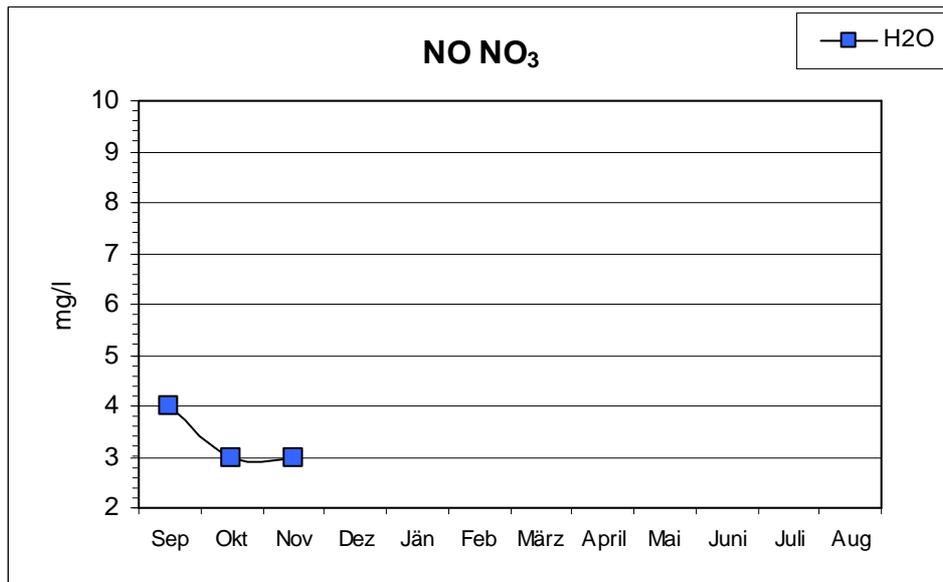
Grafik 9: Nitritkonzentration am Standort Zentrum; Lösungsmittel Alkohol

3.2.2. Ergebnisse der Nitratmessungen

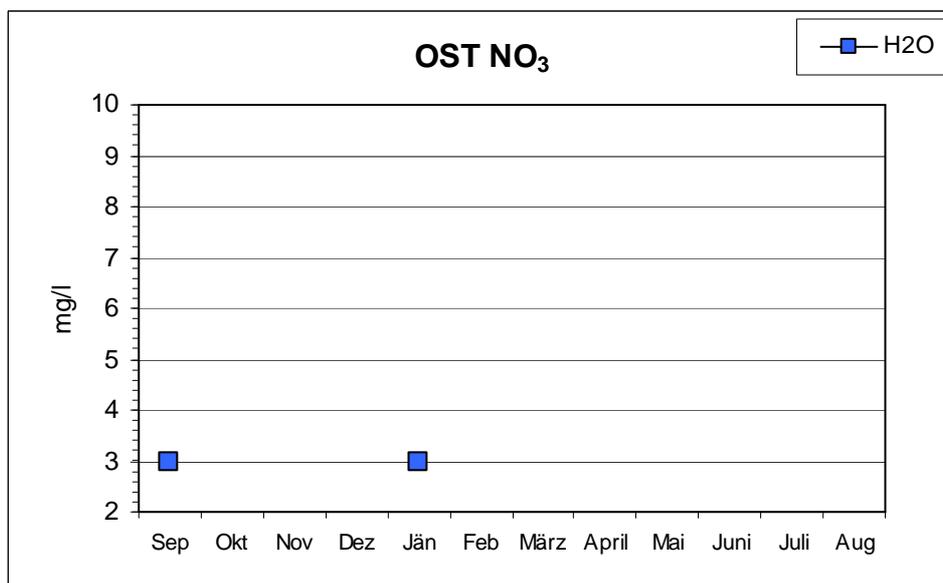
Nitratkonzentration im Jahreslauf: Nitrat ist im Gegensatz zu Nitrit besser in Wasser löslich. In Alkohol ist es nur schwer bis gar nicht löslich. Daher zeigen die nachstehenden Grafiken nur jene Konzentrationen an, welche mit Hilfe von destilliertem Wasser als Lösungsmittel ermittelt werden konnten.



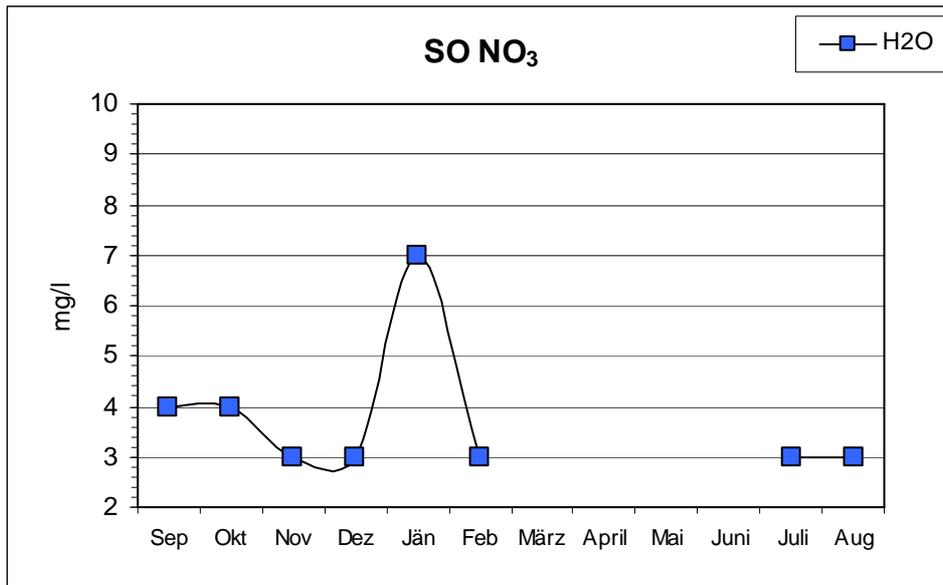
Grafik 10: Nitratkonzentration am Standort Nord; Lösungsmittel Aqua dest.



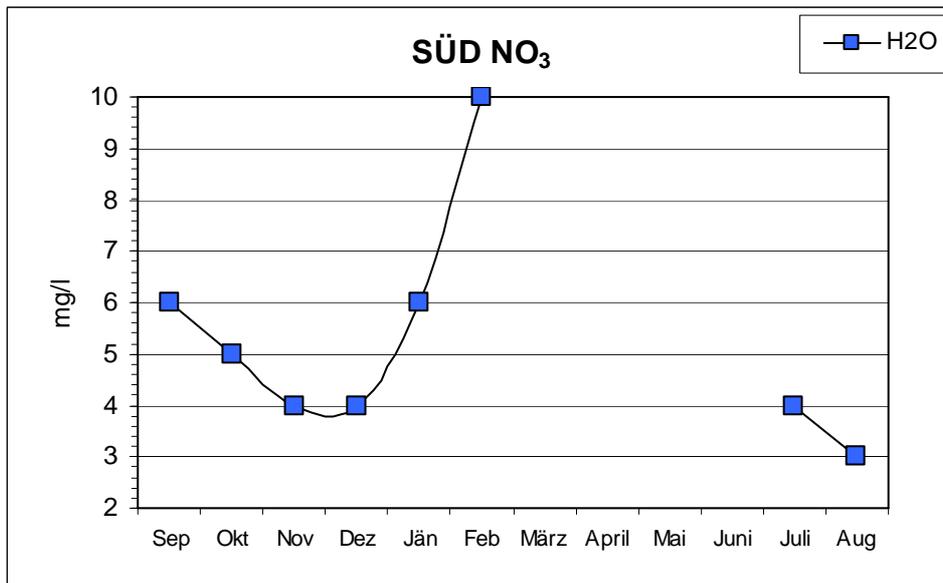
Grafik 11: Nitratkonzentration am Standort Nordost; Lösungsmittel Aqua dest.; geringe Mengen von Nitrat ließen sich im Nordosten nur in den Spätsommer- und Herbstmonaten nachweisen.



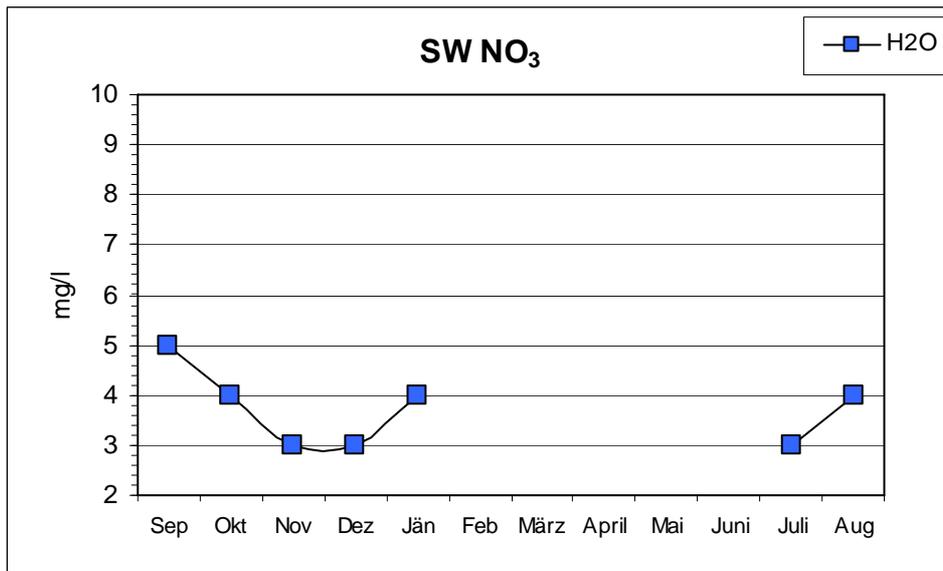
Grafik 12: Nitratkonzentration am Standort Ost; Lösungsmittel Aqua dest.; über das gesamte Jahr hinweg, ließ sich Nitrat nur im September 2010 und im Jänner 2011 nachweisen.



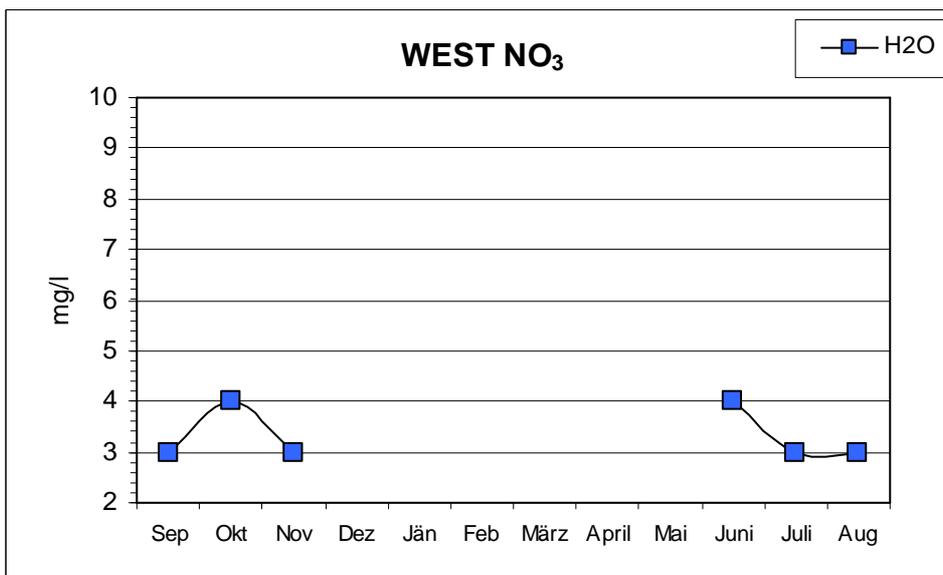
Grafik 13: Nitratkonzentration am Standort Südost; Lösungsmittel Aqua dest.; an diesem Standort erreichte die NO_3 -Konzentration in den Wintermonaten ein Maximum.



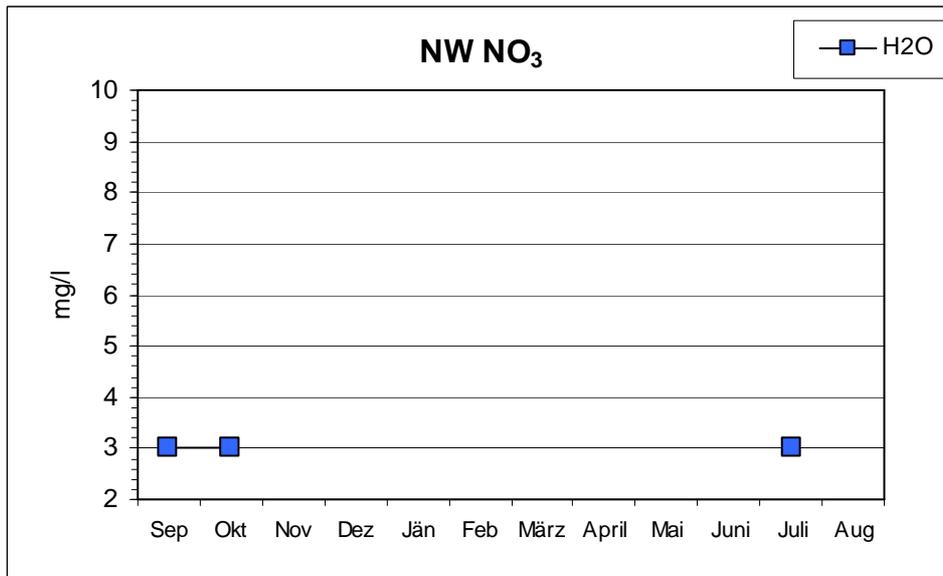
Grafik 14: Nitratkonzentration am Standort Süd; Lösungsmittel Aqua dest.; Auch hier wurde ein Konzentrationsmaximum im Winter erreicht.



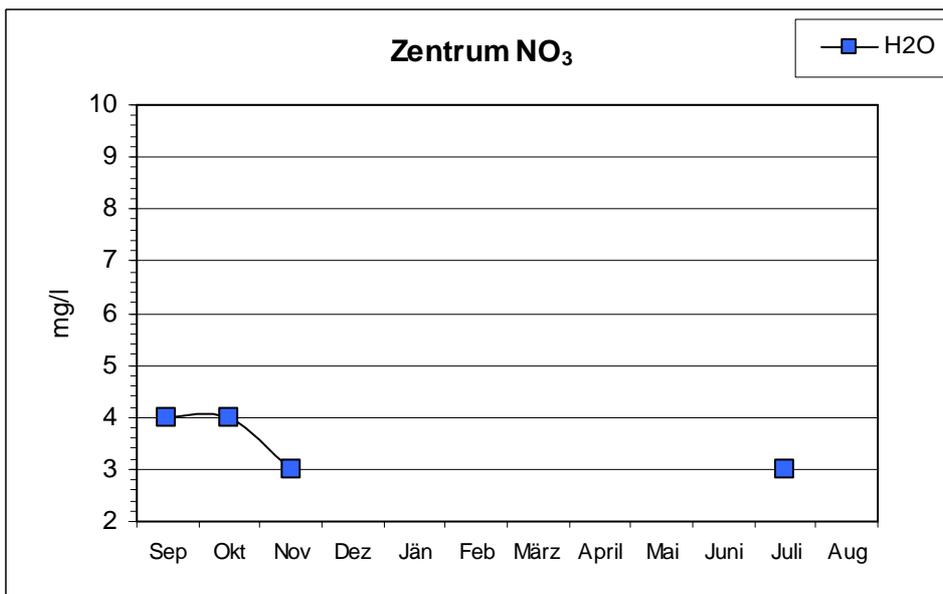
Grafik 15: Nitratkonzentration am Standort Südwest; Lösungsmittel Aqua dest.



Grafik 16: Nitratkonzentration am Standort West; Lösungsmittel Aqua dest.; an diesem Standort ließen sich gerade in den Wintermonaten keine Konzentrationen nachweisen.



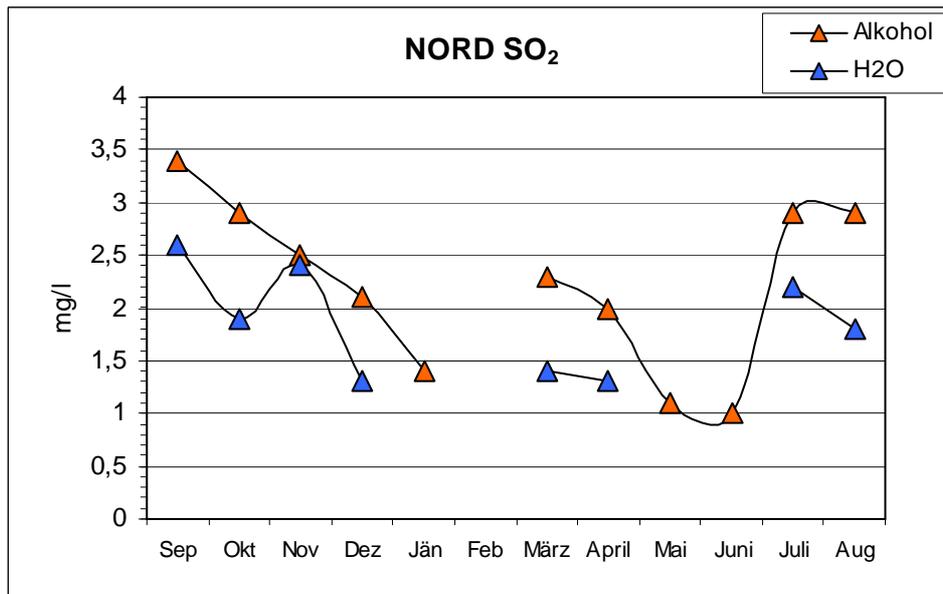
Grafik 17: Nitratkonzentration am Standort Nordwest; Lösungsmittel Aqua dest.



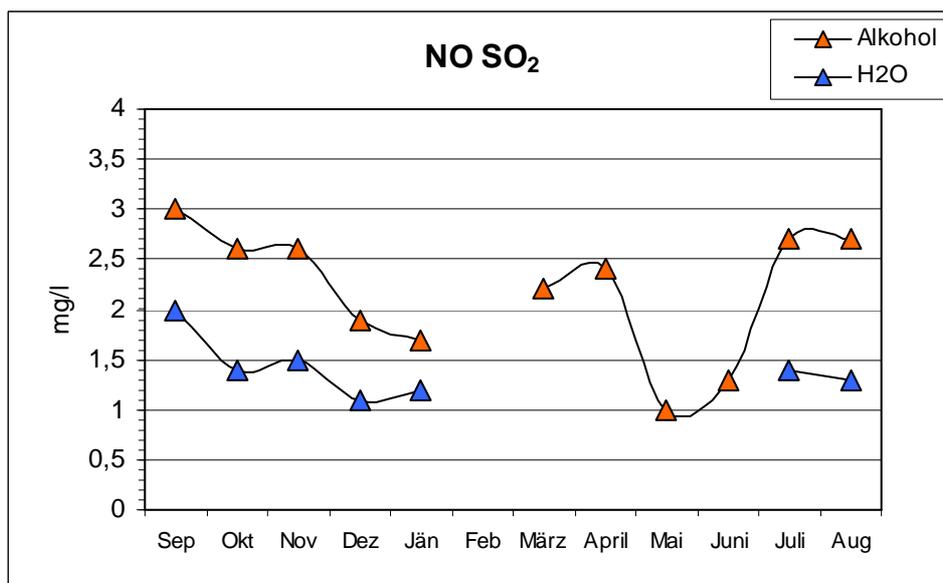
Grafik 18: Nitratkonzentration am Standort Zentrum; Lösungsmittel Aqua dest.

3.2.3. Ergebnisse der Schwefeldioxidmessungen

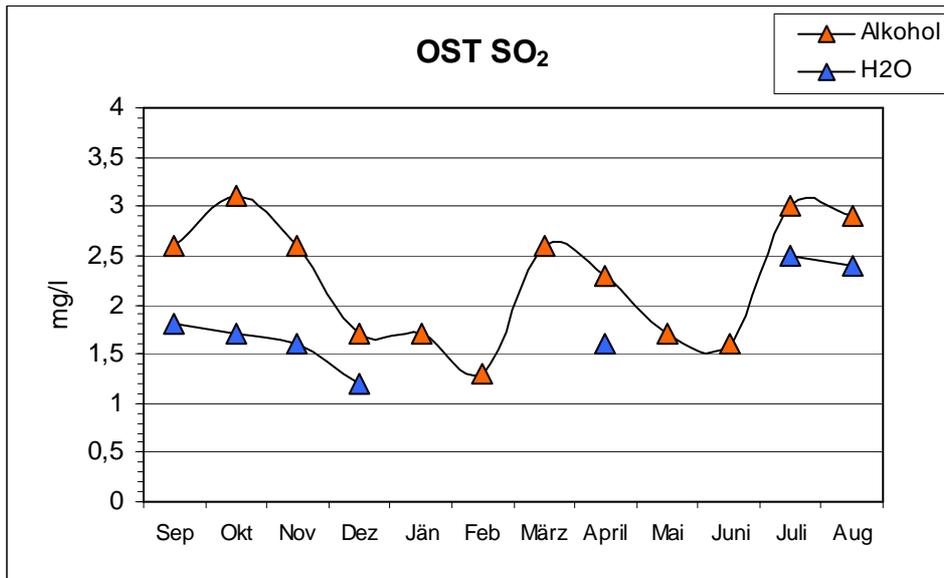
Die Grafiken zeigen die gemessenen Schwefeldioxidkonzentrationen im Jahreslauf. Da sich SO_2 sowohl in Alkohol als auch in Wasser lösen lässt, wurden beide Lösungsmittel grafisch verarbeitet, um das unterschiedliche Lösungsverhalten von SO_2 aufzuzeigen. Dabei wird ersichtlich, dass sich SO_2 in Alkohol deutlich besser lösen lässt als in destilliertem Wasser.



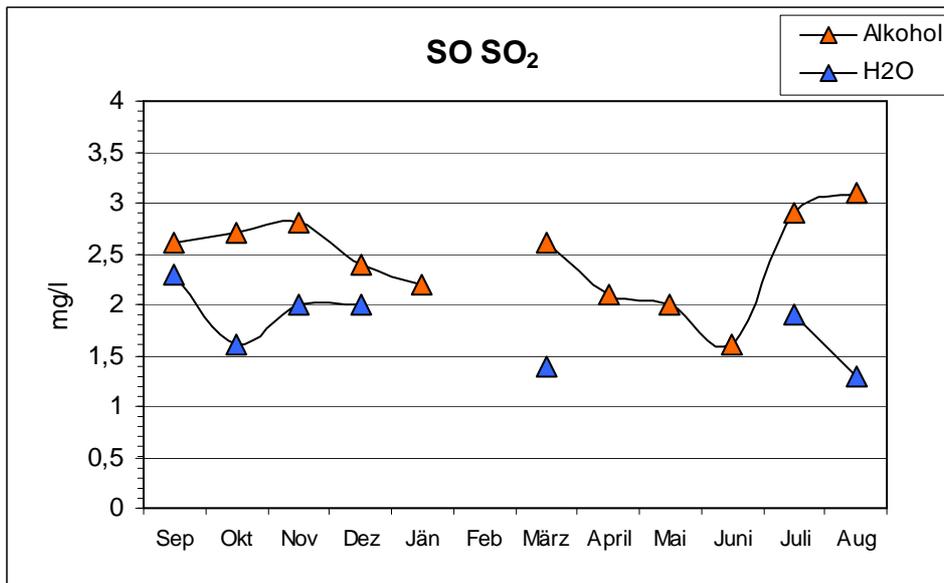
Grafik 19: SO_2 -Konzentration am Standort Nord; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest.



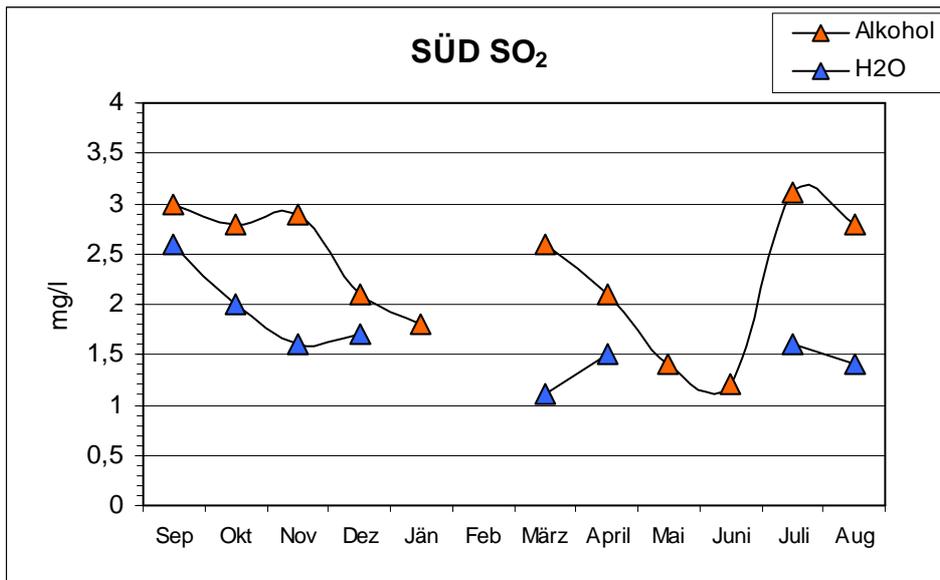
Grafik 20: SO_2 -Konzentration am Standort Nordost; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest. im Vergleich



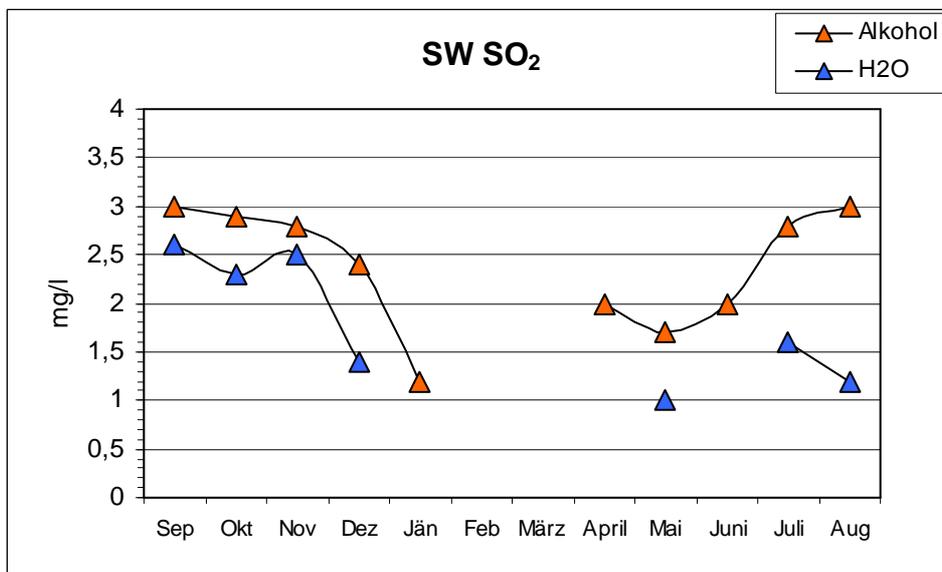
Grafik 21: SO₂-Konzentration am Standort Ost; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest. im Vergleich



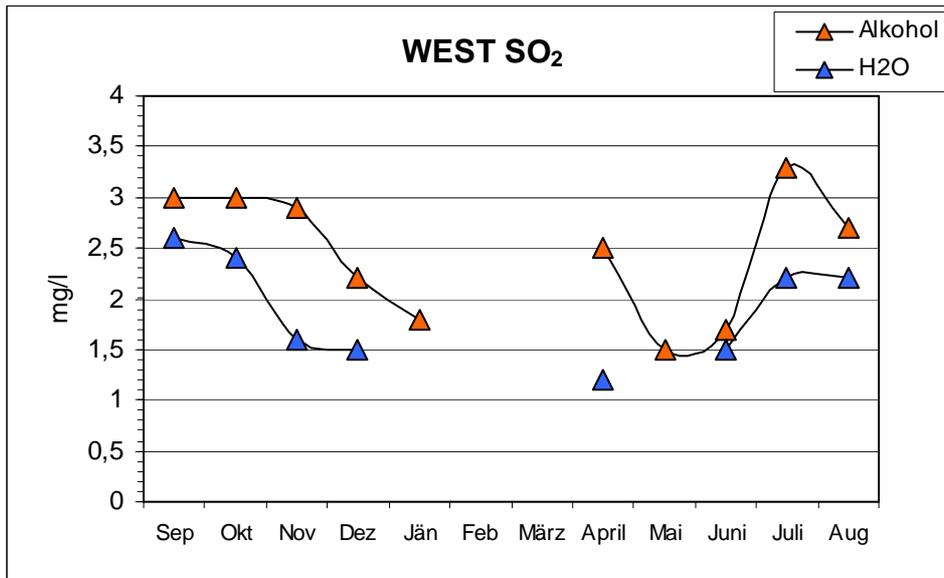
Grafik 22: SO₂-Konzentration am Standort Südost; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest. im Vergleich



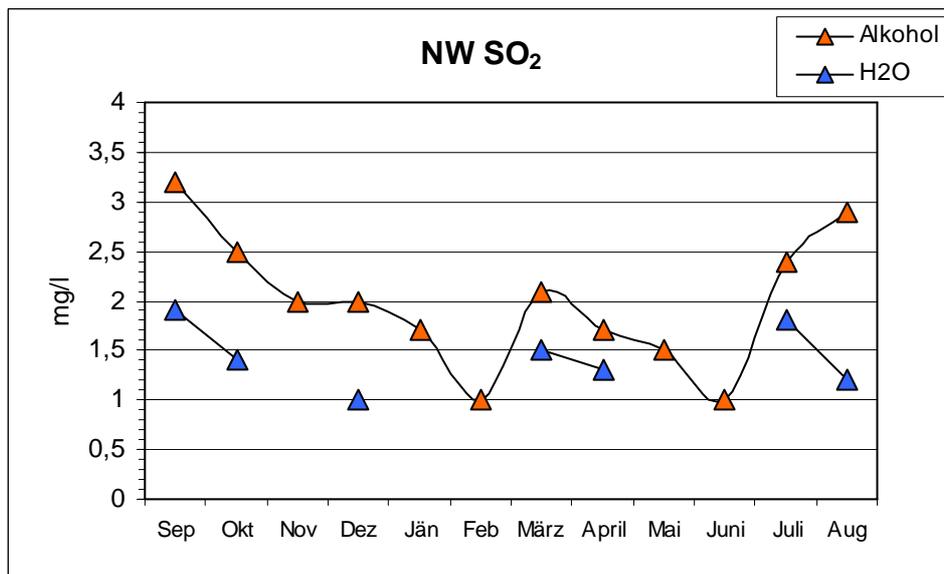
Grafik 23: SO₂-Konzentration am Standort Süd; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest. im Vergleich



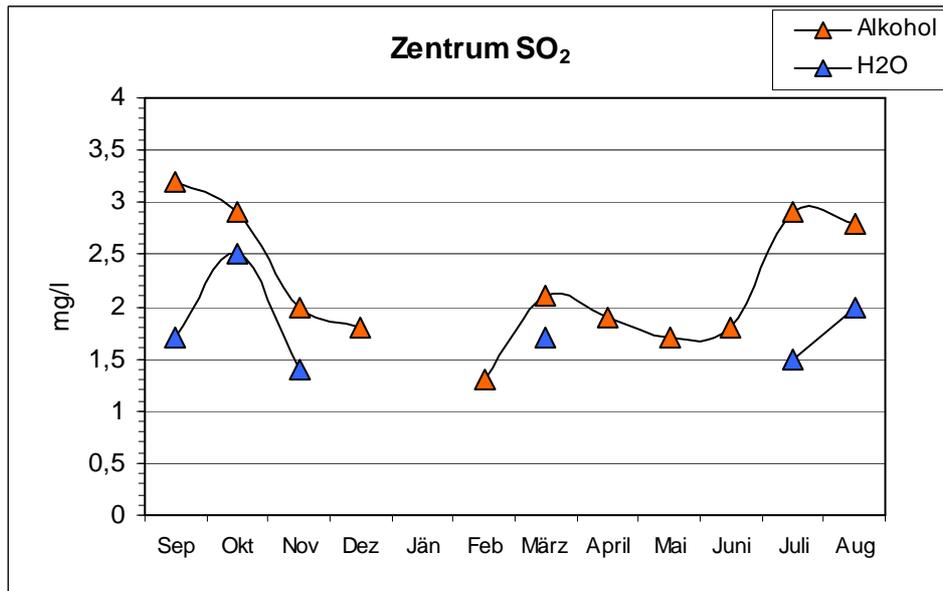
Grafik 24: SO₂-Konzentration am Standort Südwest; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest. im Vergleich. In der Grafik wird deutlich, dass SO₂-Konzentratione während der Wintermonate nicht nachgewiesen werden konnten.



Grafik 25: SO₂-Konzentration am Standort West; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest. im Vergleich



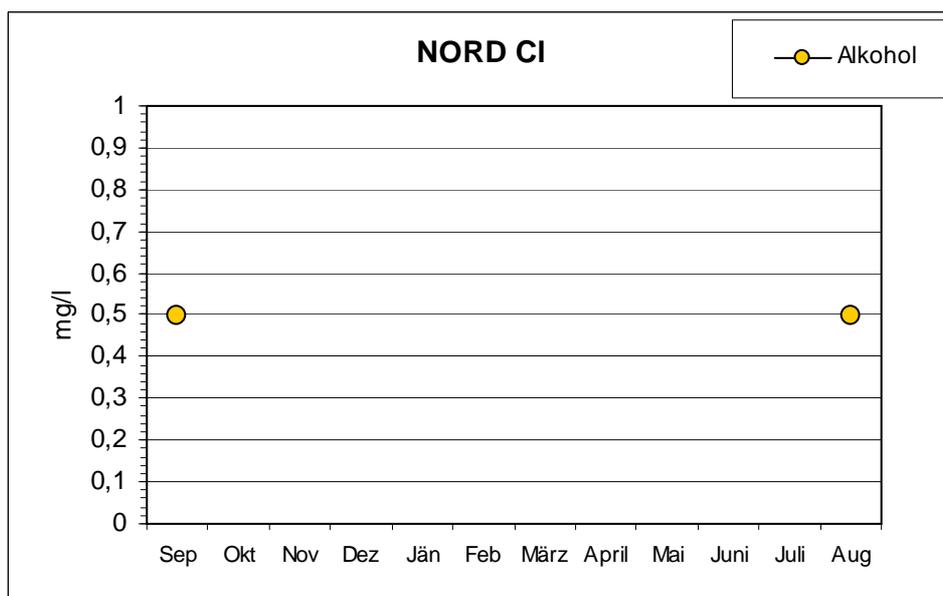
Grafik 26: SO₂-Konzentration am Standort Nordwest; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest. im Vergleich



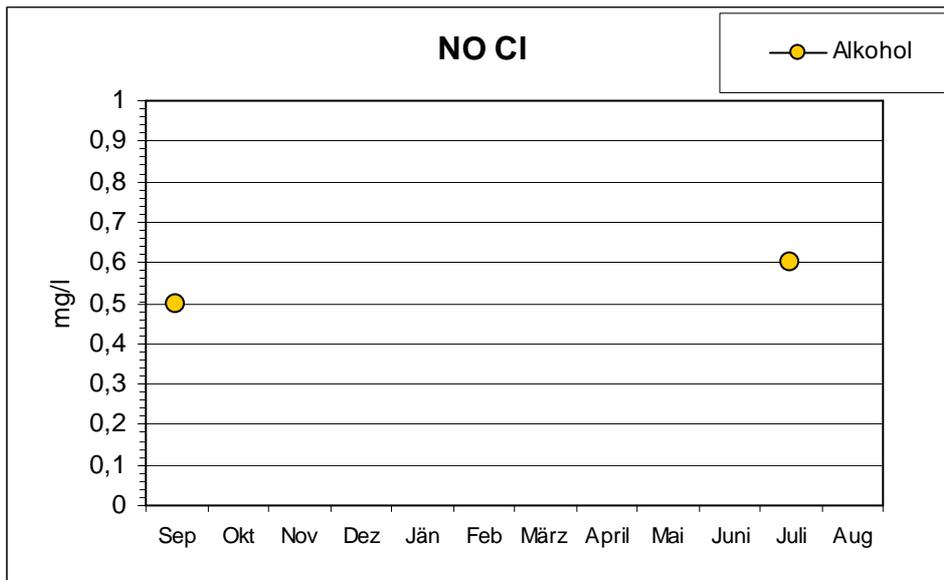
Grafik 27: SO₂-Konzentration am Standort Zentrum; Lösungsmittel Alkohol und Aqua dest. im Vergleich

3.2.4. Ergebnisse der Chloridmessungen

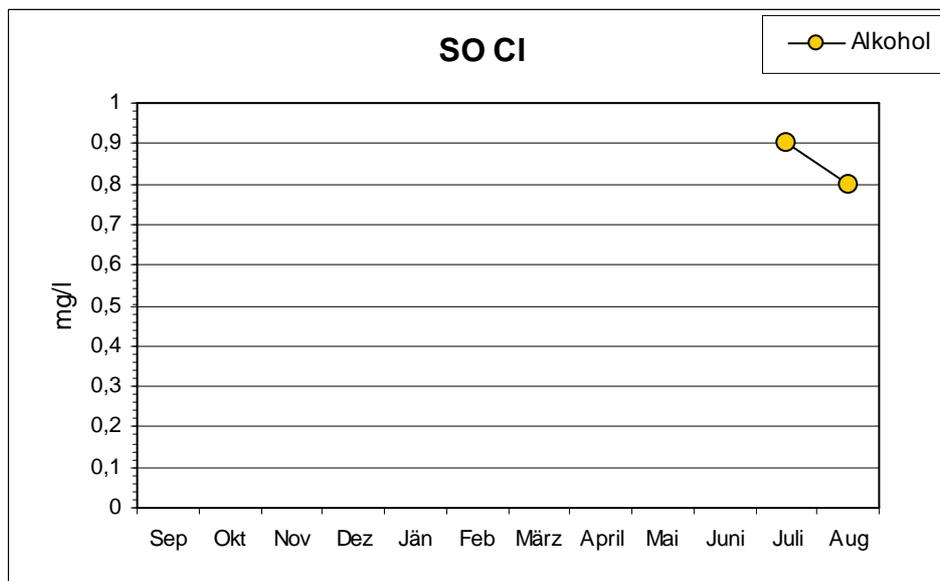
Chloridkonzentration im Jahreslauf: Am Standort Ost waren die Messwerte zu gering (d.h. sie lagen unter dem Messbereich der Teststäbchen) und konnten daher nicht grafisch dargestellt werden.



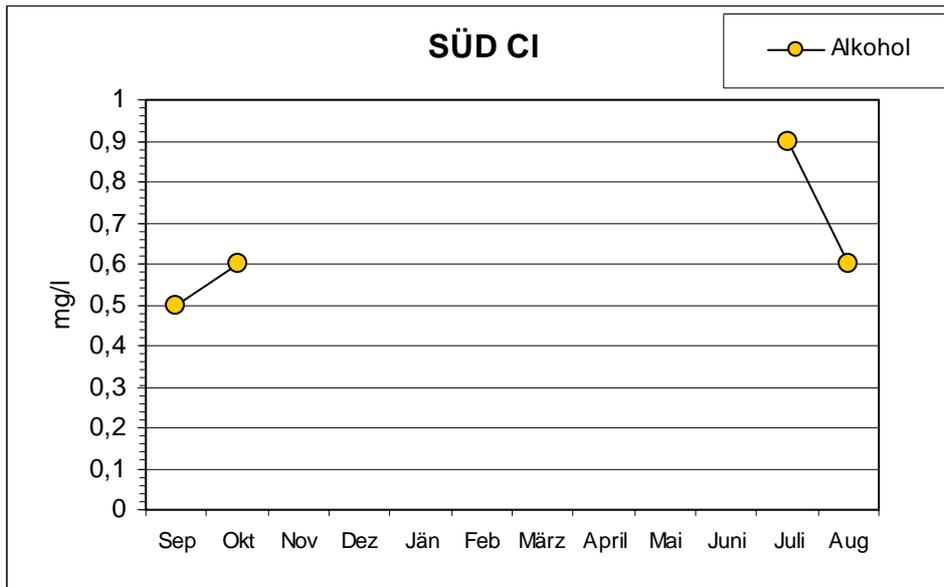
Grafik 28: Chloridkonzentration am Standort Nord; Lösungsmittel Aqua dest.



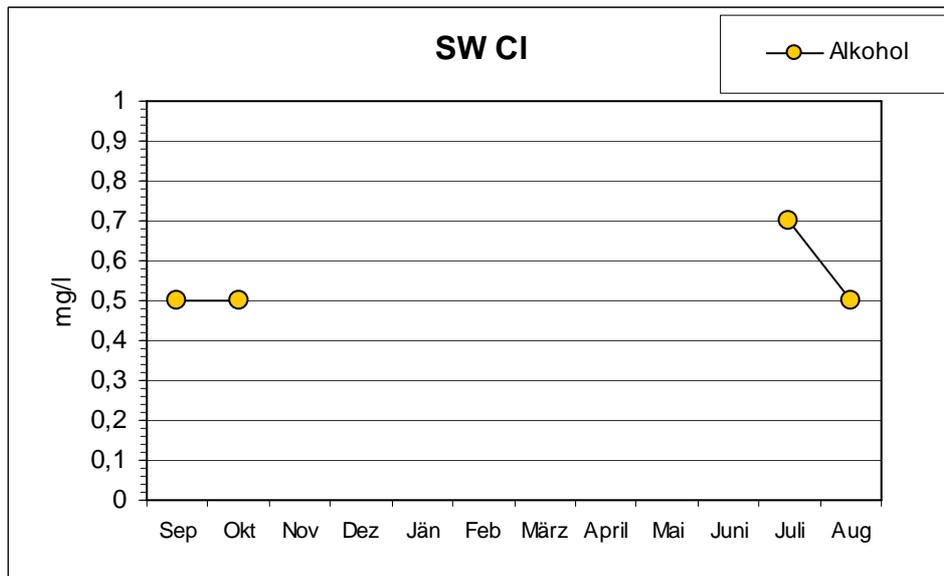
Grafik 29: Chloridkonzentration am Standort Nordost; Lösungsmittel Aqua dest.; Chlorid konnte im Zeitraum von einem Jahr nur zweimal nachgewiesen werden.



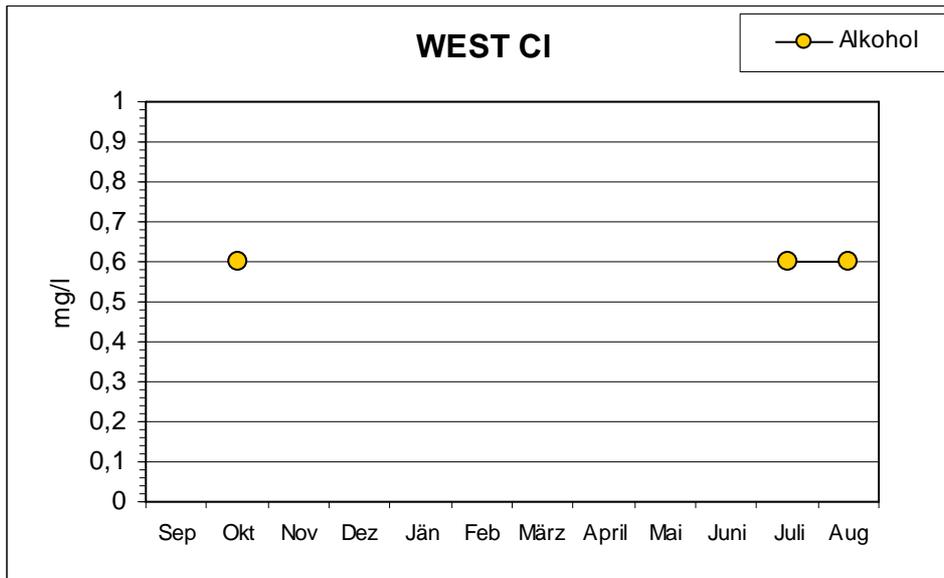
Grafik 30: Chloridkonzentration am Standort Südost; Lösungsmittel Aqua dest.; Die Grafik zeigt, dass die Konzentrationen häufig zu gering waren um quantitativ erfasst werden zu können.



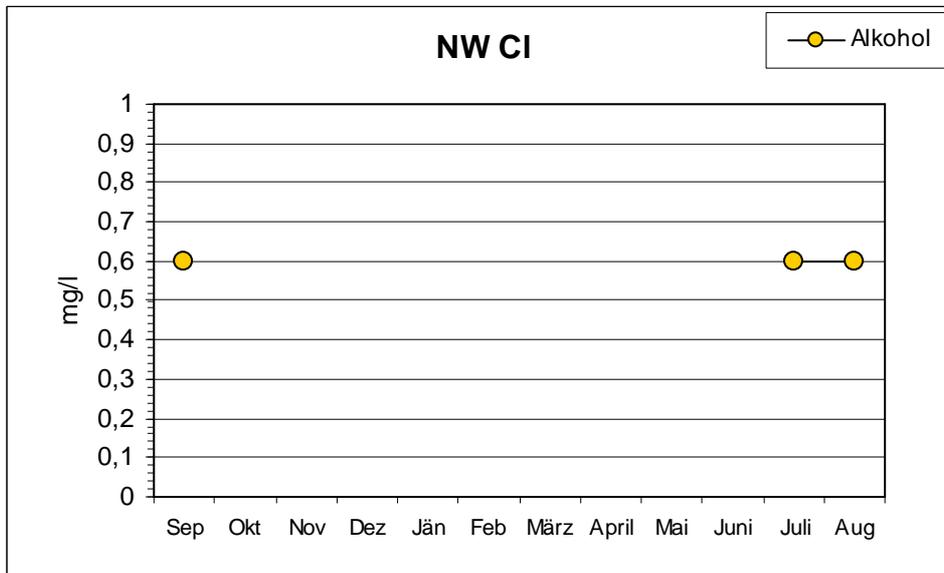
Grafik 31: Chloridkonzentration am Standort Süd; Lösungsmittel Aqua dest.; an diesem Standort konnte Chlorid viermal über das Jahr nachgewiesen werden.



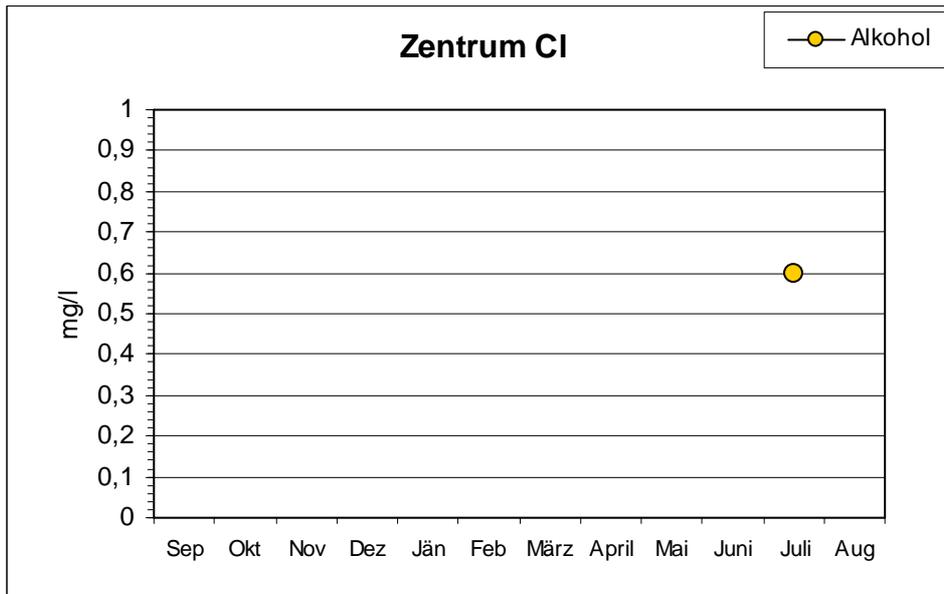
Grafik 32: Chloridkonzentration am Standort Südwest; Lösungsmittel Aqua dest.



Grafik 33: Chloridkonzentration am Standort West; Lösungsmittel Aqua dest.; Auch an diesem Standort lagen die Konzentrationen häufig unter dem Messbereich der Teststäbchen.



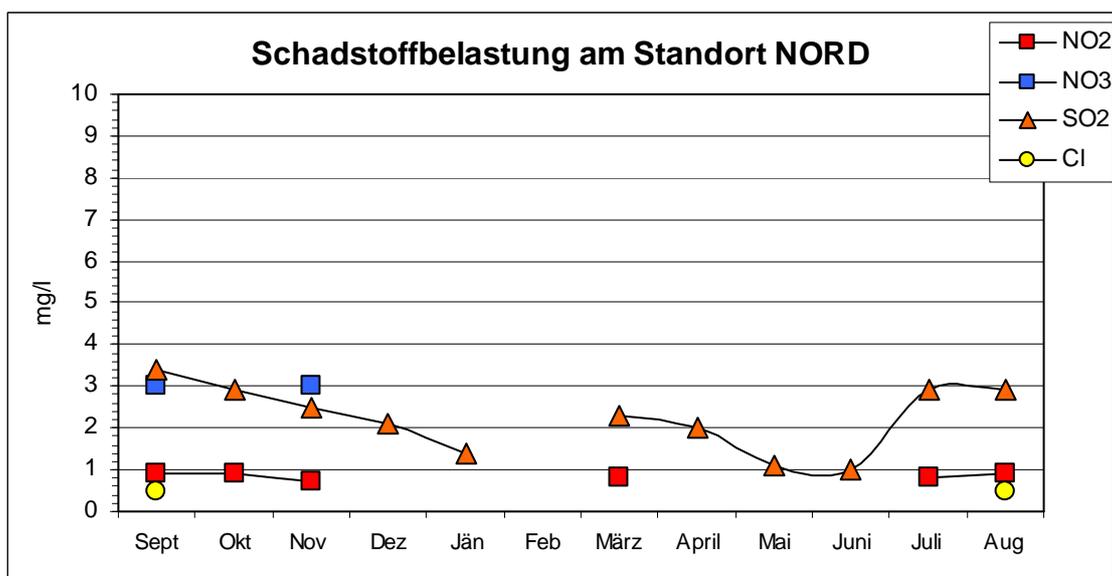
Grafik 34: Chloridkonzentration am Standort Nordwest; Lösungsmittel Aqua dest.



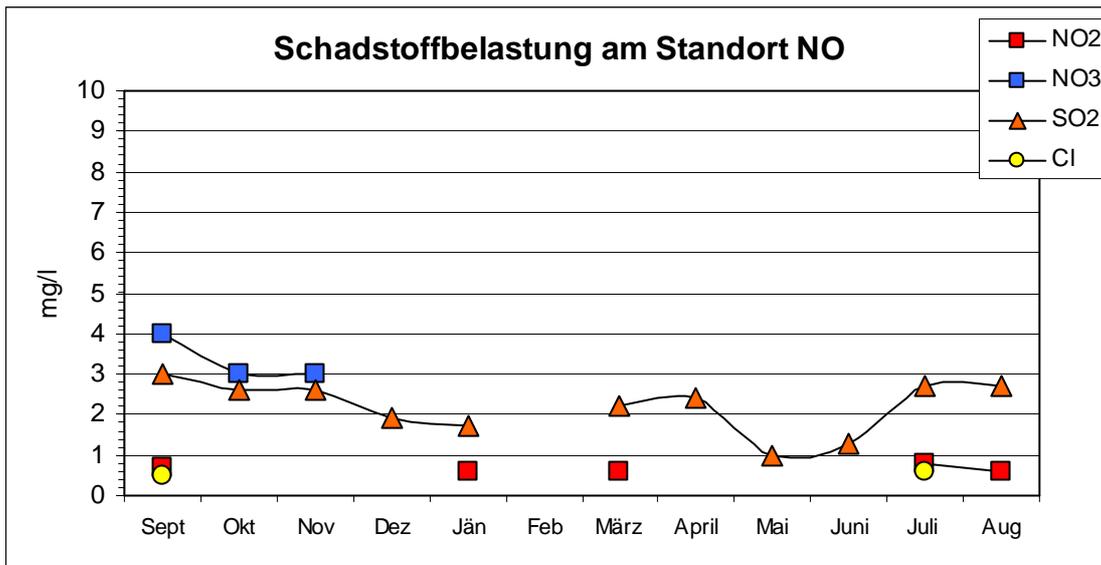
Grafik 35: Chloridkonzentration am Standort Zentrum; Lösungsmittel Aqua dest.; Im Zentrum konnte nur im Juli 2011 eine geringe Menge Chlor nachgewiesen werden.

3.2.5. Zusammenfassung aller Schadstoffe an den diversen Standorten:

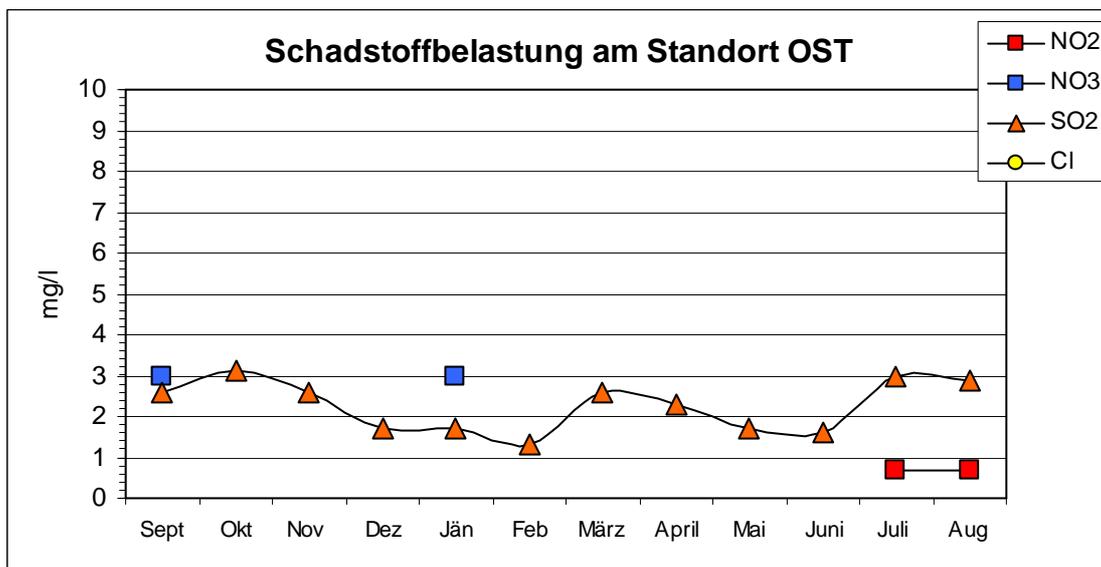
Die nachstehenden Grafiken geben einen Überblick über die Schadstoffbelastungen an den entsprechenden Standorten im Jahreszyklus.



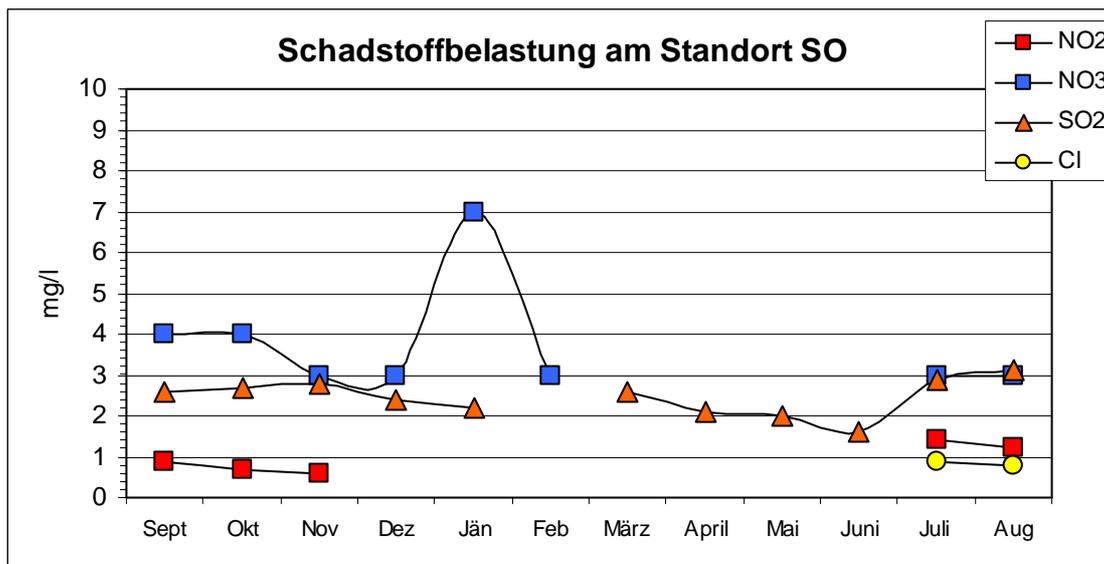
Grafik 36: Die oben stehende Grafik zeigt die Schadstoffbelastung am Standort Nord im Verlauf von einem Jahr.



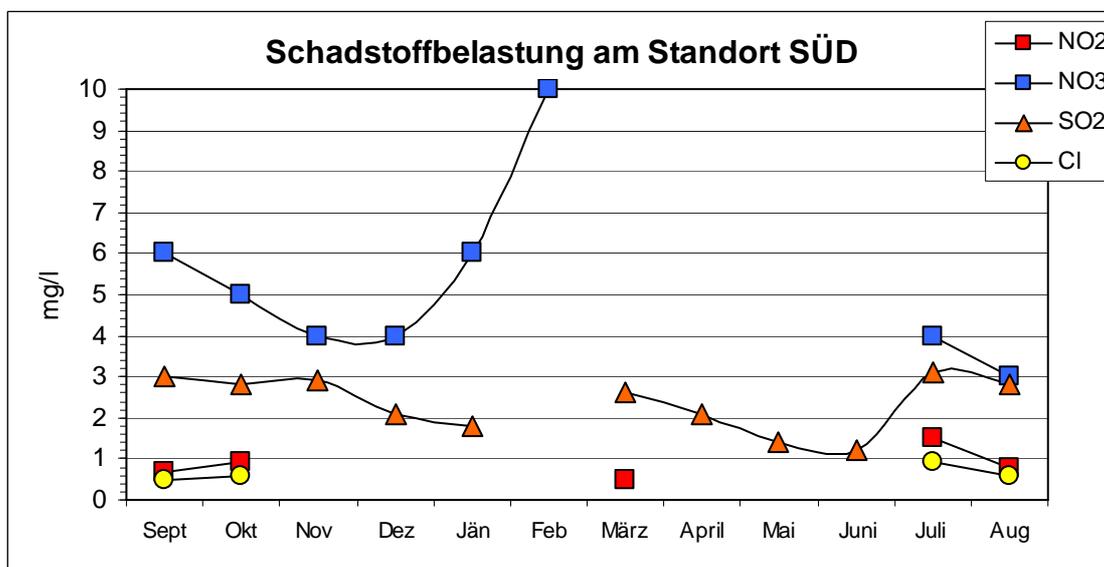
Grafik 37: Schadstoffkonzentrationen von Nitrit, Nitrat, Schwefeldioxid und Chlor am Standort Nordost im Verlauf von einem Jahr.



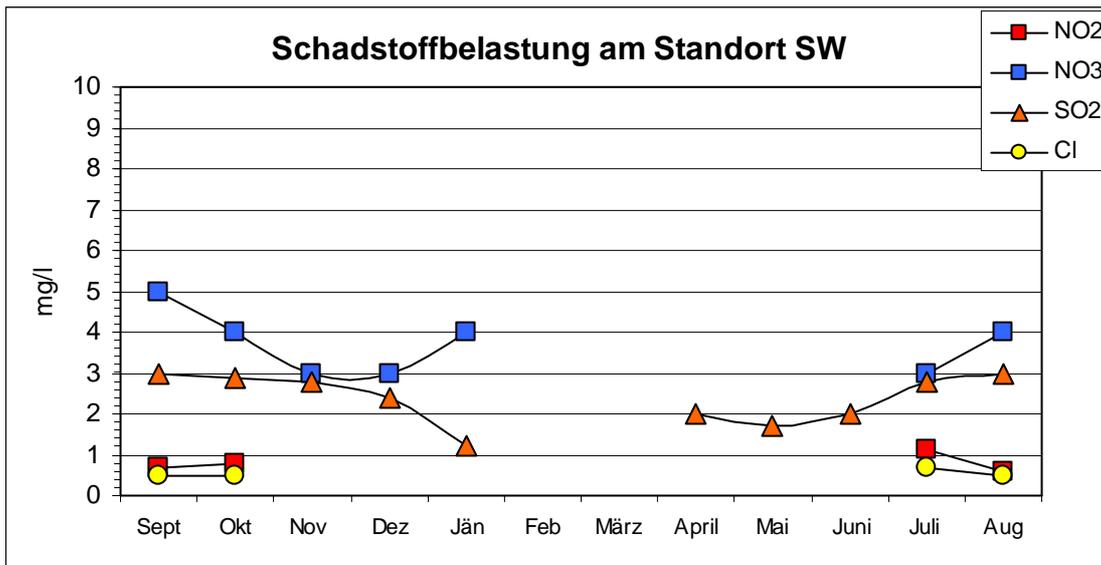
Grafik 38: Schadstoffkonzentrationen von Nitrit, Nitrat, Schwefeldioxid und Chlor am Standort Ost im Verlauf von einem Jahr.



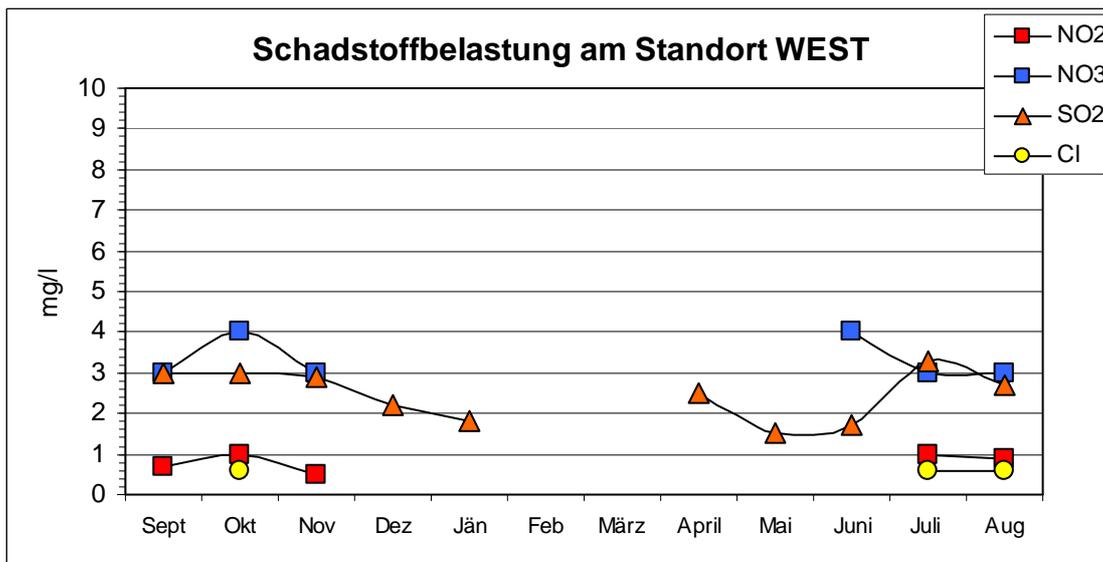
Grafik 39: Schadstoffkonzentrationen von Nitrit, Nitrat, Schwefeldioxid und Chlor am Standort Südost im Verlauf von einem Jahr.



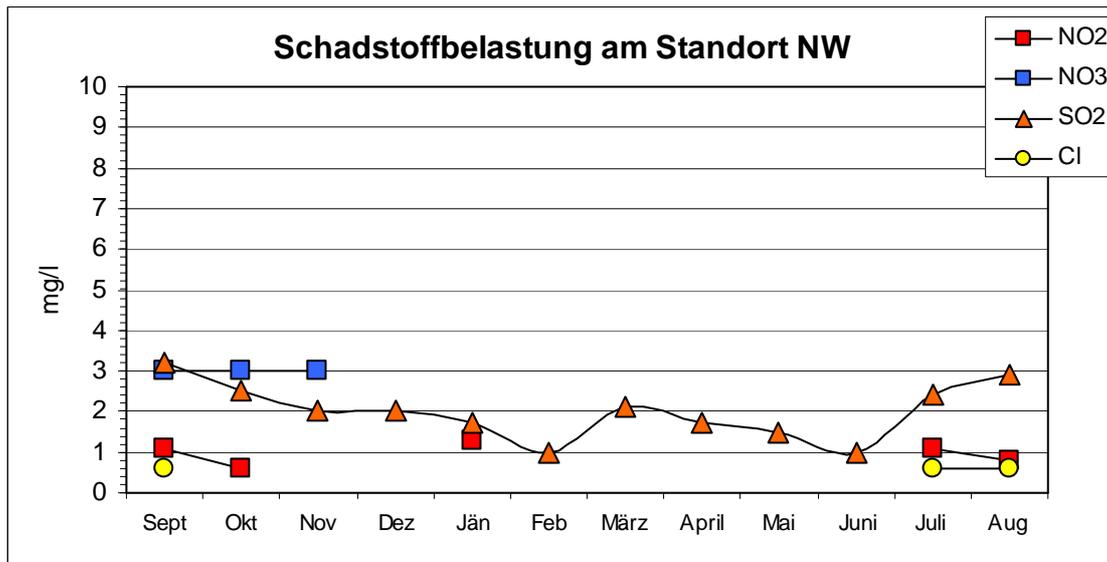
Grafik 40: Konzentrationen der untersuchten Schadstoffe am Standort Süd.



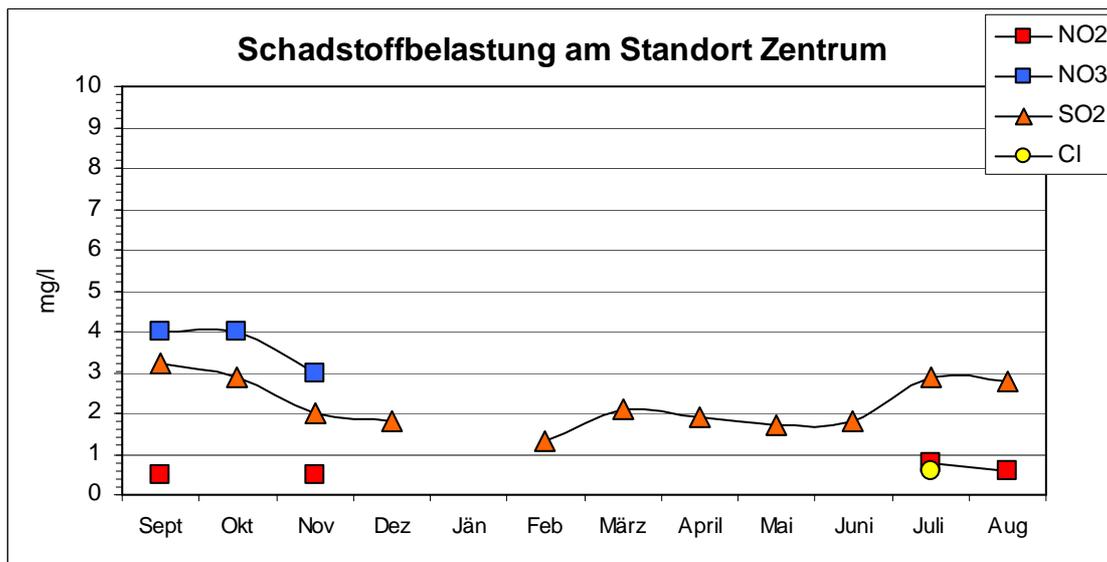
Grafik 41: Monatliche Schadstoffbelastung am Standort Südwest.



Grafik 42: Monatliche Schadstoffbelastung am Standort West.



Grafik 43: Monatliche Schadstoffbelastung am Standort Nordwest.



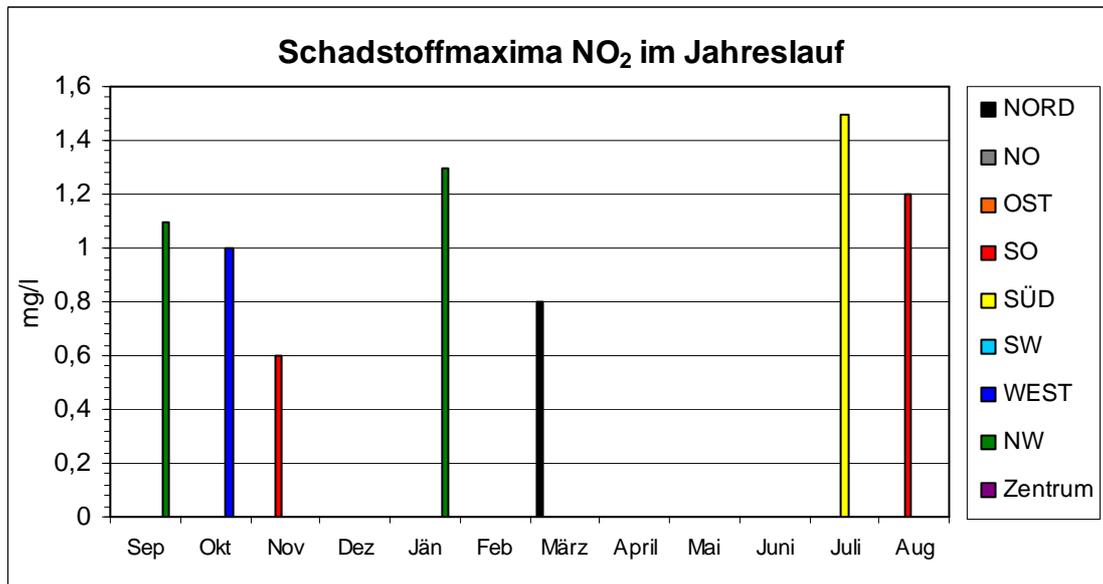
Grafik 44: Monatliche Schadstoffbelastung am Standort Zentrum.

3.2.6. Schadstoffmaxima von Nitrit, Nitrat, Schwefeldioxid und Chlorid

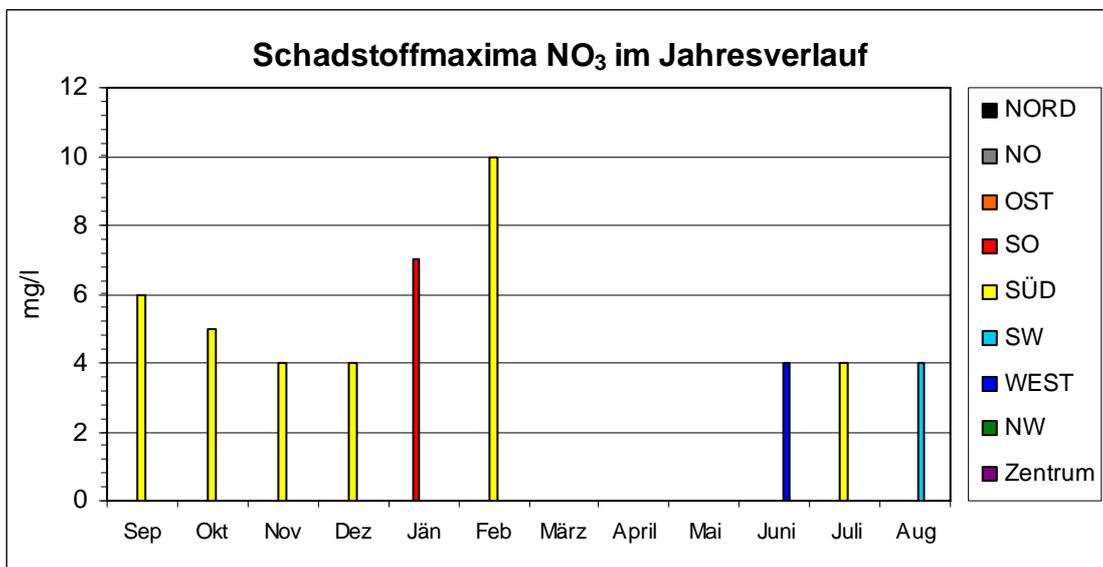
Die folgenden Grafiken verdeutlichen welche Schadstoffe an welchem Standort am häufigsten auftreten.

Sie zeigen einerseits die höchsten Konzentrationen der gesuchten Schadstoffe welche monatlich gemessen wurden und andererseits an welchem Standort man

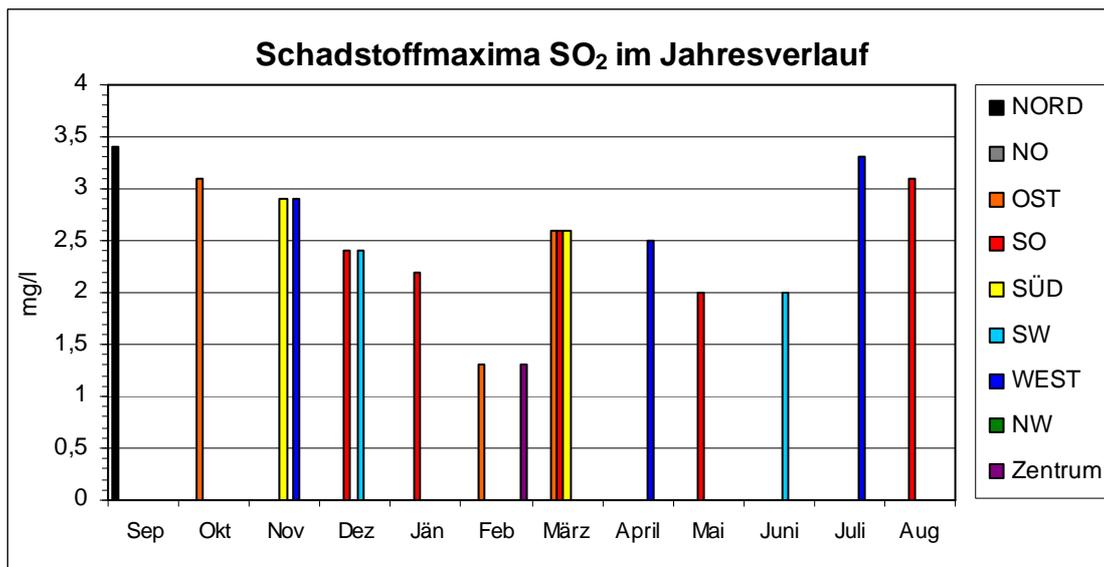
diesen Messwert erzielt hatte. Dieser gewonnene Überblick soll Aufschluss darüber geben, welcher Standort am meisten belastet scheint.



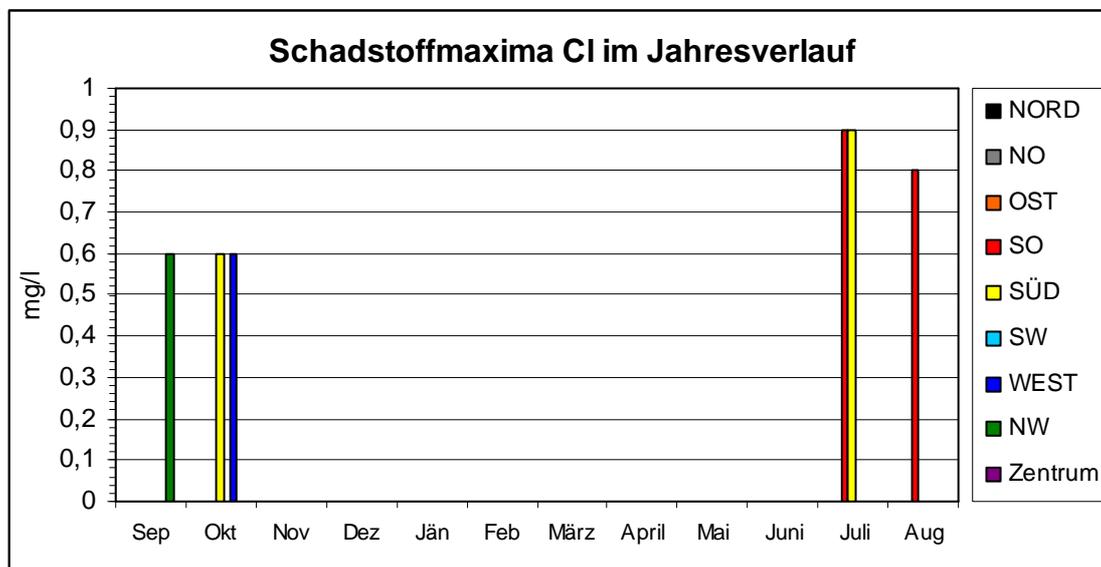
Grafik 45: Maximal gemessene Nitritkonzentrationen im Verlauf von einem Jahr.



Grafik 46: Schadstoffmaxima von Nitrat im Verlauf von einem Jahr.



Grafik 47: Konzentrationsmaxima von Schwefeldioxid im Verlauf von einem Jahr. Es wird deutlich, dass an fast allen Standorten (mit Ausnahme von NW und NO) maximale SO₂-Konzentrationen gemessen wurden.



Grafik 48: Konzentrationsmaxima von Chlor im Verlauf von einem Jahr. Auffällig ist, dass Chlorid nur während der Sommer- bzw. Herbstmonate nachgewiesen werden konnte und dass maximale Konzentrationen nur an vier verschiedenen Standorten (SO, Süd, NW, Nord) gemessen wurden.

4. Diskussion

4.1. Generelle Zielsetzung

Ziel der einjährigen Untersuchung des ausgewählten Areals (Gemeindegebiet Bad Fischau-Brunn, Niederösterreich) war es, eine Aussage zu treffen hinsichtlich des Waldzustandes (Schwarzkiefernpopulation) und der Belastung der betrachteten Bioindikatoren unter Verwendung chemischer Nachweisverfahren und unter Verwendung phototechnischer Verfahren (Standard-optische Aufnahmen und Infrarotaufnahmen). Besonders die Infrarotphotographien geben einen guten Hinweis auf aktive Blattbereiche, da diese durch ihr hohes Reflexionsvermögen im infrarotnahen und infraroten Bereich des Strahlungsspektrums deutlich als „weiße Abschnitte“ (siehe Bilder) der Baumkronen in Erscheinung treten; dagegen geschädigte oder abgestorbene Kronenareale als dunkle Bereiche erscheinen. Das verwendete Verfahren (Infrarotanalyse) ist somit eine kostengünstige und verhältnismäßig schnell durchzuführende Technik um allgemeine Aussagen hinsichtlich eines Waldzustandes treffen zu können und auch für größere Gebiete verwendbar, da man auch aus der Luft und selbst von Satelliten aus erste Eindrücke vom Zustand eines Vegetationsabschnittes gewinnen kann. Zweckdienlich bleibt es aber die gewonnenen infrarotoptischen Eindrücke hinsichtlich des Gesundheitszustandes der Vegetation auch mit chemischen Analyseverfahren zu untermauern, wofür sich die Analyse der Blatinhaltsstoffe anbietet, da die Blätter der Pflanzen einerseits Stoffe aus dem Boden, die über das Wurzelsystem aufgenommen wurden, in sich anreichern, andererseits aber auch mit der umgebenden Luft einen Stoffaustausch betreiben und so auch Schadstoffe, die über den Luftraum eingebracht werden in sich aufnehmen.

4.2. Interpretation der IR-Aufnahmen

Geschichtlich lässt sich die Infrarottechnologie bis in die Zeit des zweiten Weltkriegs zurückverfolgen. Im militärischen Bereich diente und dient die Feststellung unterschiedlicher Reflexionsraten optisch gleich aussehender Oberflächen (wie etwa ein im Farbton von Pflanzen gestrichener Panzer zwischen Pflanzen stehend) zur Enttarnung von militärischen Anlagen oder Stellungen (beispielsweise einer Panzerstellung (persönliche Mitteilung, Theresianische Militärakademie Wiener Neustadt).

Die Infrarot-Photographie macht sich im Wesentlichen das Reflexionsvermögen von Chlorophyll zu Nutze. Die in den Chloroplasten enthaltenen Farbpigmente sind dabei die wichtigste Grundlage.

Trifft das Sonnenlicht auf pflanzliche Materie, in diesem Fall auf die Nadeln der Schwarzkiefern, so wird ein Teil des Lichtes absorbiert oder transmittiert, ein anderer Teil wiederum wird von den Nadeln reflektiert (Campbell, 2006).

Das Reflexionsvermögen hängt dabei von der Wellenlänge des Lichtes ab: während die Pflanze grünes Licht reflektiert oder transmittiert, wird blaues und rotes Licht von der Pflanze absorbiert (dies ist auch der Grund warum ein Blatt grün erscheint) und Licht mit einer Wellenlänge von über 700 nm (Infrarotbereich) wird von der Pflanze reflektiert. Je länger die Wellenlänge des Lichtes ist, desto größer ist auch der Reflexionsgrad der Pflanze. Darunter versteht man die prozentuelle Angabe jener Lichtmenge, welche nach Auftreffen eines Lichtstrahles von einer Materie wieder zurückgeworfen wird (Bantel, 2004). Weiters unterscheidet man in der Physik die Spiegelreflexion (bei glänzenden Oberflächen) und die diffuse Reflexion, welche je nach Oberflächenstruktur des Blattes unterschiedlich aussehen kann.

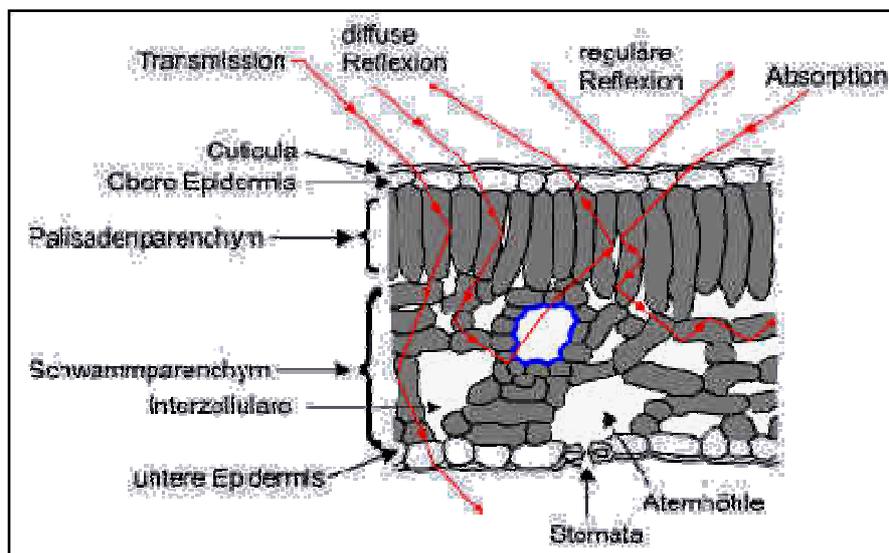


Abb. 258: Durchlässigkeit und Reflexionsvermögen eines Laubblattes im Querschnitt
(satgeo.zum.de)

Trifft nun ein Lichtstrahl mit einer Wellenlänge von mehr als 700 nm auf pflanzliche Materie, so wird der Lichtstrahl, abhängig von der Pigmentverteilung und vom Wassergehalt der Pflanze, reflektiert. Auf einem mit IR-Technik aufgenommenen Photo erscheint Selbige nun weiß. Zeigten Pflanzen dieses Verhalten nicht, würde

die Pflanze innerlich verbrennen, denn die Photonen des Lichts stimulieren die Pigmentmoleküle in den Thylakoidmembranen der Chloroplasten und heben einige Elektronen dieser Moleküle auf ein höheres Energieniveau an. Die Elektronen sind nun instabil und fallen im Bruchteil einer Sekunde wieder in ihren Grundzustand zurück. Durch diese Energiedifferenz wird Wärme freigesetzt (Campbell, 2006). Die Pflanze muss demnach langwellige Lichtstrahlen reflektieren, um nicht zuviel Wärmeenergie freizusetzen und dabei zu verbrennen.

Gesunde, photosynthetisch aktive Pflanzen reflektieren dabei stärker, als beschädigte oder abgestorbene Pflanzen. Beschädigte oder abgestorbene Pflanzen weisen eine veränderte Zellstruktur (Zunahme von Interzellularen) sowie und eine geringere Wasserversorgung auf. Dieses Phänomen lässt sich mit dem Vegetationsindex erklären: diese Maßzahl ergibt sich aus dem Verhältnis vom Reflexionsgrad einer Pflanze im roten, noch sichtbaren Bereich des elektrischen Spektrums (0,6 bis 0,7 μm) und dem Reflexionsgrad im infrarotnahen Bereich (0,7 bis 1,1 μm) dieses Spektrums (geodz.com).

Die nachstehende Abbildung verdeutlicht dieses Phänomen. Die Aufnahme zeigt einen der Indikatorbäume am Standort Südwest. An diesem Exemplar sind mehrere Vitalitätsstadien klar erkennbar: die Schwarzkiefer verfügt über jüngere und ältere Nadeln, sowie über Nadeln die bereits ausgetrocknet und somit abgestorben sind. Die braunen Nadeln verfügen nur über wenig bis gar keine Chlorophyllpigmente mehr. Ebenso gibt es in diesen Nadeln auch keine Wasserversorgung mehr, was die Braunfärbung erklärt.

Die Nadeln im oberen Drittel des Baumes sind hingegen noch stoffwechselaktiv und, da die Aufnahme im März 2011 gemacht wurde, verfügen über junge Triebe. Das Reflexionsvermögen der vitalen Nadeln des Baumes sollte nun in der Infrarotaufnahme deutlich höher sein, als jenes der bereits abgestorbenen oder vertrockneten Areale.

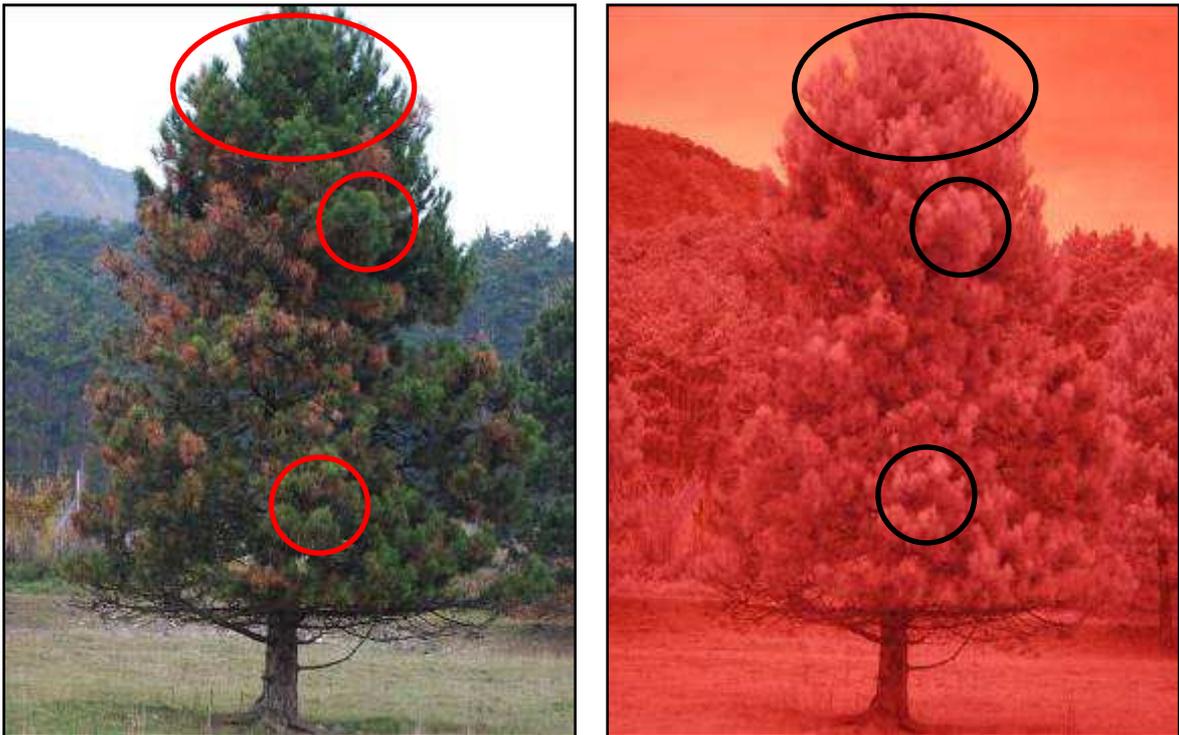


Abb. 259 und 260: Aufnahme eines Indikatorbaumes digital optisch und mit Infrarot-Filter

Die markierten Stellen repräsentieren gesundes, vitales Blattmaterial, was sich wiederum in der Infrarot-Aufnahme durch die Reflexion von weißem Licht widerspiegelt. Je mehr aktives Chlorophyll eine Pflanze besitzt, d.h. je grüner sie ist, desto stärker reflektiert sie und erscheint auf den Photos weiß. Abgestorbenes oder ausgetrocknetes Pflanzenmaterial erscheint hingegen rot bis braun, da sie Wellenlängen im sichtbaren Bereich absorbieren, jene im IR-Bereich jedoch nicht reflektieren.

Rotes Licht im sichtbaren Bereich wird von der Pflanze nur minimal reflektiert, da der Großteil des Lichtes absorbiert wird. Mit dem Übergang in den infrarotnahen Bereich nimmt das Reflexionsvermögen der Pflanze hingegen zu. Gesundes Chlorophyll reflektiert dabei im nahen Infrarot ungefähr sechsmal stärker als im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums.

Im gesamten Infrarotbereich liegt der Reflexionsanteil zwischen 40 und 50%. Die Absorption in diesem Wellenlängenbereich durch die Blätter beträgt weniger als 10%. Der Rest der Strahlung transmittiert (geodz.com). Dieses Charakteristikum unterliegt

der Phänologie, dem Alter und dem Vitalitätszustand der Pflanze, wobei ein sich verschlechternder Vitalitätszustand sich auf den Pigment- und Wassergehalt auswirken kann, was wiederum ein verändertes Reflexionsvermögen zur Folge hat. Somit kann mit Hilfe der IR-Photographie auf den Gesundheitszustand der Pflanze geschlossen werden.

4.3. Optionen Infrarotphotographien von Bäumen auszuwerten

Mit Hilfe der Infrarotphotographie lassen sich das Reflexionsvermögen, und damit der Vitalitätszustand einer Pflanze sichtbar machen. Die Abbildungen 259 und 260 (siehe oben) sollen lediglich dieses Prinzip verdeutlichen, jedoch ist klar, dass der Gesundheitszustand des Baumes in diesen Abbildungen auch in der optischen Aufnahme ersichtlich ist, da der ausgewählte Indikatorbaum bereits über braune Stellen verfügt.

Die nachstehende Abbildung zeigt allerdings eine Schwarzkiefer vom Standort Süd, welche für das menschliche Auge mehr oder weniger einheitlich grün erscheint. Alleine von der optischen Aufnahme dieses Baumes lassen sich noch keine Rückschlüsse auf den Vitalzustand der Schwarzkiefer ziehen.



Abb. 261: digital optische Aufnahme einer Schwarzkiefer am Standort Süd

Fertigt man jedoch eine Infrarotphotographie dieses Baumes an, stellt man fest, dass der Baum an unterschiedlichen Stellen über ein unterschiedliches Reflexionsvermögen verfügt, was wiederum zur Folge hat, dass der Baum auf der Infrarotaufnahme verschiedene Farben und Farbnuancen (von weiß bis rot) aufweist.



Abb. 262: Aufnahme der Schwarzkiefer mit Infrarotfilter

Den gleichen Effekt erzielt man auch bei Detailaufnahmen eines Baumes.



Abb. 263 und 264: Detailaufnahme einer Schwarzkiefer; digital optisch und mit Infrarotfilter

Je vitaler eine Pflanze ist, desto höher ist ihr Reflexionsvermögen und desto heller erscheint sie auf einer Infrarotaufnahme.

Auf diese Feststellung aufbauend stellt sich nun die Frage nach einer möglichen Quantifizierbarkeit des geschädigten Pflanzenmaterials. Eine Möglichkeit ist es die betroffene Pflanze (Baum) zu photographieren und das so gewonnene Bild mit den Umrissen als auch den vitalen Bereichen des Baumes auf ein Transparentpapier zu übertragen. Dieses wiederum legt man über ein Millimeterpapier und zählt die skizzierten Flächen (vitale Stellen). So ist es möglich die vitalen Bereiche (in Prozent) in Relation zum Gesamtbildnis des Baumes (entspricht 100%) zu stellen. Natürlich handelt es sich bei dieser Methode bloß um eine zweidimensionale Darstellung eines dreidimensionalen Objekts doch darf davon ausgegangen werden, dass der Baum seinen Vitalzustand auch auf der perspektivisch abgewandten Seite in gleichem Maße zeigt.

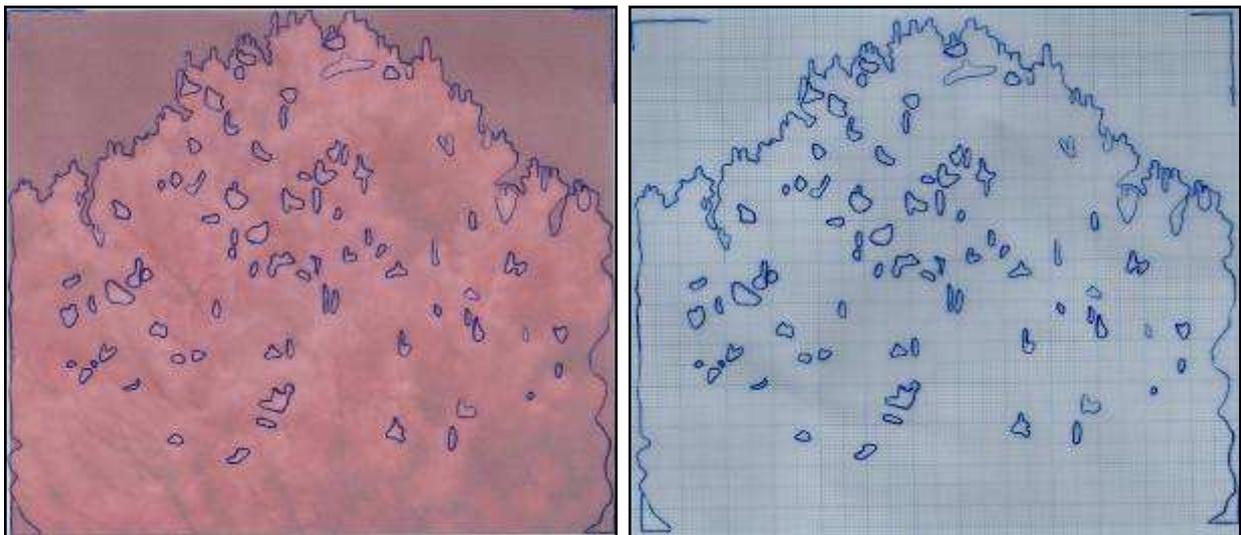


Abb. 265 und 266: Umrisszeichnungen auf Transparentpapier über Abb.262 und über Millimeterpapier gelegt

Anhand der Abbildungen 265 und 266 wurde einerseits die Fläche des Bildes des photographierten Baumes ($= 119,99\text{cm}^2$), andererseits die Gesamtfläche der stark reflektierenden Stellen ($= 4,78\text{cm}^2$) der Schwarzkiefer berechnet. In Prozent ausgedrückt stellen die stark reflektierenden Stellen nur 5,74% der Gesamtfläche des Baumes dar. Aufgrund dieser Berechnungen kann der Vitalitätszustand des Baumes als sehr gering eingestuft werden, was möglicherweise auf den hohen Gehalt an Nitrat, Nitrit, Schwefeldioxid und Chlorid zurückzuführen ist (siehe Grafik 40).

Händische Skizzen wie oben beschrieben eignen sich, wenn man einzelne Bäume oder gar nur Abschnitte des Baumes bewerten möchte.

Für Analysen von ganzen Baumgruppen oder Waldabschnitten wäre jedoch der zeitliche Aufwand zu groß.

Denn möchte man Aussagen über den Gesundheitszustand eines Waldes oder Waldabschnittes treffen, muss eine aussagekräftige Anzahl von Bäumen fotografiert und bewertet werden. Man geht davon aus, dass der Vitalitätszustand dieser zufällig ausgewählten Bäume, der gleiche ist wie jener der restlichen Bäume des Waldabschnittes.

Weiters kann man aber auch mittels Infrarotphotographie ein und denselben Abschnitt eines Waldes über einen bestimmten Zeitraum immer wieder fotografieren um so Veränderungen des Waldes zu dokumentieren.

Hierfür eignen sich jedoch Infrarotaufnahmen aus der Luft, welche dann mittels elektronischer Bildanalyse ausgewertet und quantifizierbar gemacht werden können.

Da bei derartigen Waldanalysen eine riesige Datenmenge anfällt, ist eine computerunterstützte Auswertung der Bilder empfehlenswert. Diese Methode findet in der Fernerkundung weite Verbreitung.

Die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) bedient sich dieser Methode bereits seit den 1980er Jahren indem sie so genannte „Colorinfrarot-Luftbefliegungen“ durchführt, um aufgrund des unterschiedlichen Reflexionsvermögens von Pflanzen, auf Baumarten schließen zu können, aber auch um die Vegetation hinsichtlich ihres Gesundheitszustandes zu beurteilen. Die Vorteile dieser Luftbildinventuren „zeigen sich vor allem in den weniger gut begehbaren Wäldern der bayerischen Hoch- und Mittelgebirge“. Auch ist es aufgrund dieser Methode möglich, Waldstrukturen eines Gebietes zu kartieren und über bestimmte Zeitabstände hinweg zu beobachten und zu dokumentieren (vermessung.bayern.de).

Für die Luftbildauswertung bedarf es dann eines Interpretationsschlüssels (für weitere Informationen siehe Landesforstpräsidium 2003).

4.4. Interpretationen der chemische Analysen

Wie eingangs bereits erwähnt, ist eine chemische Analyse der Pflanzeninhaltsstoffe essentiell, um Rückschlüsse auf mögliche Ursachen von Pflanzenschäden machen zu können.

Das Reflexionsvermögen nimmt bei wenig vitalen oder geschädigten Pflanzen drastisch ab. Abgesehen von mechanischen Verletzungen von Pflanzenteilen, sind oftmals Schadstoffeinträge Grund für Veränderungen der Zellstruktur oder des Wassergehaltes. Vor allem das für die Reflexion wesentliche Farbpigment Chlorophyll reagiert sensibel auf derartige Belastungen.

Die bei den chemischen Analysen untersuchten Pflanzeninhaltsstoffe wurden dabei nicht zufällig ausgewählt. Ein bereits erwiesener Verursacher von Pflanzenschäden ist das Schwefeldioxid (SO_2) aus der Industrie, welches in Verbindung mit Regenwasser zu schwefeliger Säure umgewandelt werden kann und dadurch zu einer Absenkung des pH-Wertes im Regenwasser führt, was wiederum zur Entstehung von Saurer Regen beiträgt. Fällt Saurer Regen zu Boden führt dies zu einer Übersäuerung des Bodens, das bedeutet eine Erhöhung der H^+ -Ionen im Boden, welche ihrerseits wichtige Pflanzennährstoffe verdrängen. Der Pflanze widerfährt ein Nährstoffmangel und sie stirbt oder wird geschädigt (wald.de).

Zu einer Übersäuerung des Bodens trägt aber auch Ammoniak (NH_3) bei, welches überwiegend durch Gülle, sowie durch Dünger von landwirtschaftlichen Betrieben in den Boden eingetragen wird. In weiterer Folge bauen Bodenlebewesen NH_3 zu Nitrat (NO_3) ab, wobei bei der chemischen Umwandlung H^+ -Ionen entstehen, wodurch der Boden noch weiter versauert.

Schadstoffe gelangen aber nicht nur über den Boden in die Pflanze, sondern können auch, vor allem wenn sie gasförmig sind, über die Spaltöffnungen der Blätter aufgenommen werden. Dabei dringen sie in die Pflanze ein und beeinflussen dadurch die biochemischen Stoffwechselprozesse (wald.de). Wird dabei die Photosyntheseaktivität der Pflanze gestört, führt dies zu einer fortschreitenden Verminderung der Vitalität und somit zu einer vorzeitigen Alterung. Mit abnehmender Stoffwechselaktivität nimmt natürlich auch das Reflexionsvermögen ab (Campbell, 2006).

Von einer breiten Palette heute möglicher Umweltschadstoffe wurden die Nadeln der Indikatorbäume auf das Vorhandensein von Nitrit, Nitrat, Schwefeldioxid und Chlor untersucht. Die Wahl fiel auf Nitrat und Nitrit da es sich hierbei um chemische Substanzen handelt, welche typischerweise im Bereich landwirtschaftlicher Nutzflächen deutlich in Erscheinung treten und die Gemeinde Bad Fischau-Brunn über viele Agrarflächen verfügt. Schwefeldioxid ist ein typischer Luftschadstoff, der wie das Chlor schwere Zellschäden hervorrufen kann. Meine Annahme, dass gerade im Bereich der Südautobahn A2 durch die Salzstreuung im Winter es zu erhöhten Messwerten kommen würde fand durch die chemischen Analysen keine Bestätigung. Vielmehr ist davon auszugehen, dass es sich bei den festgestellten Chlorkontaminationen im Süden und Süd-Osten um die Folge von Eintrag durch die Luft handelt, da sich diese Standorte viel zu weit weg von der Autobahn befinden um die nachgewiesenen Chlorkonzentrationen mit einer Folge der winterlichen Salzstreuung in Verbindung zu bringen.

4.4.1. Nitritgehalt

Um den Nitritgehalt in den Nadelproben der diversen Standorte nachweisen zu können, war es zunächst notwendig, das pulverisierte Pflanzenmaterial mit 96%igem Alkohol zu vermengen. In destilliertem Wasser ist Nitrit nur begrenzt bis gar nicht löslich (Latscha, 2005), deswegen wurden die chemischen Untersuchungen ausschließlich mit Alkohol durchgeführt.

Nitrit konnte über ein Jahr lang an allen Standorten nachgewiesen werden. Relativ hohe Konzentrationen wurden dabei in den wärmeren Monaten, etwa im Juli, August, September und Oktober gemessen, wobei es vereinzelt auch Messergebnisse im November, Dezember, Jänner und März gab (siehe Grafik 1, 2, 5, und 8 im Kapitel „Ergebnisse“). In den kälteren Monaten reduziert sich zwar die Stoffwechselaktivität der Pflanzen deutlich, jedoch betreiben Nadelbäume auch im Winter Photosynthese. Andernfalls würden sie sonst ihre Nadeln abwerfen. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass derartige Ergebnisse auf eventuelle Messfehler oder Störungen der Messgeräte hindeuten.

Hohe Nitritwerte konnten vor allem an den Standorten Süd, Südost und Nordwest nachgewiesen werden. Grund dafür könnte die landwirtschaftliche Nutzung dieser Flächen, sowie erhöhte menschliche Aktivität in diesen Gebieten sein. Der Standort

Süd liegt direkt zwischen einer bewirtschafteten Ackerfläche und der Durchzugsstraße. Wenige hundert Meter von diesem Standort entfernt befindet sich eine große Autospenglerei.

Auch der Standort Südost befindet sich in unmittelbarer Nähe einer bewirtschafteten Ackerfläche, sowie nur wenige Meter von der Eisenbahnstrecke entfernt.

Der Standort Nordwest liegt am Malleitenberg direkt im Wald. Jenes Gebiet wird vor allem in den wärmeren Monaten von Einheimischen und Touristen als Wanderstrecke genutzt. Auch viele Hunde sind in dieser Zeit dort oben anzutreffen.

Die Indikatorbäume dieses Standortes stehen nur wenige Meter neben diesem vielfach genutzten Wanderweg.

Eine ähnliche Ausgangslage findet man auch am Standort Nord. Auch hier verläuft ein Wanderweg, welcher von März bis September rege genutzt wird. Vermutlich findet man auch deshalb erhöhte Nitritwerte an diesem Standort.

Die Indikatorbäume am Standort West liegen nur wenige Meter von der Touristen anziehenden Eisensteinhöhle entfernt. Diese reich verzweigte Tropfsteinhöhle kann in den Frühlings- und Sommermonaten von Touristengruppen besucht werden. Für das leibliche Wohl sorgt das Gasthaus „Eisensteinhöhle“, welches sich ebenfalls in diesem Gebiet befindet.

Da nun die Nitritwerte an jenen Standorten, welche von vielen Menschen heimgesucht werden, beziehungsweise welche sich in unmittelbarer Nähe von landwirtschaftlich genutzten Flächen befinden, deutlich erhöht sind im Vergleich zu Standorten wo die oben genannten Parameter nicht zutreffen, ist eine Abhängigkeit der Nitritkonzentration von menschlicher Aktivität und Landwirtschaft anzunehmen.

Wie eingangs im Kapitel „Material und Methode“ erwähnt, entsteht Nitrit als Zwischenprodukt bei der Oxidation von Stickstoff zu Nitrat oder durch Nitritreduktase (bakterielle Reduktion von Nitraten) (Gutekunst, 1991). Nitrit ist somit an das Vorhandensein von Nitrat gekoppelt. Mögliche Nitratquellen können sein: nitrathaltiger Mineraldünger, Nitrat aus der Nitrifikation (Oxidation von Stickstoff) in Böden, aber auch aus Abwässern und Gülle (Deutsch, 2005). Der Mensch greift somit in den Stickstoffkreislauf ein, insbesondere durch:

- Den Gebrauch von Naturdünger (Gülle, Jauche) und Handelsdünger
- Den Eintrag aus Siedlungsabwässern (undichte Senkgruben oder Kanäle)

- Das Anlegen von Kompostieranlagen: beim Fäulnisprozess von organischem Material wird Stickstoff wieder als Nitrat freigesetzt, welches in den Boden gelangt.
- Das Verbrennen von Energieträgern (Kohle, Benzin und Öl), denn dabei entstehen Stickoxide die über den Niederschlag aus der Luft ausgewaschen werden und so in den Boden gelangen (OÖ Landesregierung – Direktion Soziales und Gesundheit).

4.4.2. Nitratgehalt

Repräsentative Messergebnisse ließen sich beim Schadstoff Nitrat nur mit Hilfe von destilliertem Wasser erzielen, da Nitrat in Alkohol nur schwer bis gar nicht löslich ist (Latscha, 2005). Die chemischen Analysen wurden somit nur mit destilliertem Wasser durchgeführt, wobei sich an allen Standorten Nitratkonzentrationen nachweisen ließen.

Überdurchschnittlich häufig konnten Nitratmengen in den wärmeren Monaten (Juli – Oktober) nachgewiesen werden. Aufgrund des überaus milden Winters im Jahr 2010/2011, was zur Folge hatte, dass der Boden lange nicht gefroren war und die Pflanzen länger als sonst Stoffwechsel betrieben, konnte vereinzelt auch Konzentrationen im November, Dezember, Jänner und Februar gemessen werden.

Die im Vergleich zu den anderen Standorten höchsten Konzentrationen von Nitrat wurden meist am Standort Süd gemessen, was sich wiederum mit den großen landwirtschaftlich genutzten Flächen erklären ließe, denn Nitrat wird vor allem in handelsüblichen Dünger beigemischt. Aufgrund seiner chemischen Beschaffenheit verfügt Nitrat über eine hohe Mobilität was wiederum zu einem hohen Ausbreitungspotenzial führt (bafu.admin.ch).

Zwar wird Nitrat aerob nicht umgesetzt, doch kann es anaerob zu Ammonium oder Nitrit umgewandelt werden, was wiederum eine Erklärung dafür sein könnte, warum an diesem Standort auch erhöhte Nitritkonzentrationen gemessen wurden (umweltbundesamt.de).

Auch im Südosten und im Westen wurden neben hohen Nitritwerten auch hohe Nitratwerte gemessen. Die Erklärung dafür ist möglicherweise die gleiche wie für das vermehrte Aufkommen von Nitrit: landwirtschaftliche Nutzflächen und erhöhte menschliche Aktivität.

Nennenswerte Konzentrationen wurden auch am Standort Südwest gemessen. Die ausgewählten Indikatorbäume stehen hier auf einer großen, hügeligen Graslandschaft, welche in den wärmeren Monaten gerne von heimischen Bauern als Weideplatz für deren Schafe genutzt wird. In unmittelbarer Nähe befinden sich außerdem Ackerflächen und auch Weinbau wird in diesem Gebiet betrieben. In den Frühlings- und Sommermonaten ist dieses Gebiet auch ein beliebtes Ausflugsziel für SpaziergängerInnen und sportlich aktive Menschen. Ein Zusammenhang zwischen der Nutztierhaltung, der menschlichen Aktivität sowie der landwirtschaftlichen Nutzung mit den erhöhten Nitratkonzentrationen ist somit wahrscheinlich.

4.4.3. Schwefeldioxidgehalt:

Schwefeldioxid lässt sich sowohl mit Alkohol als auch mit destilliertem Wasser aus dem Pflanzenmaterial extrahieren. Somit wurden die chemischen Analysen mit beiden Lösungsmitteln durchgeführt, wobei mit Alkohol stets höhere Konzentrationen gemessen werden konnten. Dieser Schadstoff konnte an allen Standorten nachgewiesen werden, wobei nur im Jänner und Februar geringe bis gar keine Messergebnisse erzielt wurden.

Als SO₂-Quellen können einerseits die Emissionen, welche durch land- und forstwirtschaftliche Maschinen entstanden sind, genannt werden, sowie Emissionen, welche durch Verbrennungsvorgänge in Haushalten entstehen. Vor allem Öfen sind relevante SO₂-Produzenten. Aber auch beim Verbrennen von schwefelhaltigen Brenn- und Treibstoffen wird SO₂ freigesetzt (umweltbundesamt.de; bafu.admin.ch). Gelangt der Schadstoff Schwefeldioxid in die Atmosphäre so bildet er gleichzeitig einen der Hauptbestandteile von saurem Regen (wald.de).

Der höchste SO₂-Gehalt wurde am Standort Nord gemessen. Da sich die Indikatorbäume dieses Standortes aber im Wald auf dem Malleitenberg befinden, fernab von Siedlungs- und Industriegebieten, ist es wahrscheinlich, dass SO₂ über die Luft (Hauptwindrichtung Nordwest) dorthin gelangt ist. Weiters ist der Regen als SO₂-Lieferant in Erwägung zu ziehen.

Besonders häufig werden auch an den Standorten Süd, Südost und Ost hohe Konzentrationen erreicht. Die Indikatorbäume im Osten befinden sich in unmittelbarer Nähe der Autobahn A2, hinter einer Raststation, welche das ganze Jahr über

geöffnet hat. Wenn nun also SO₂ durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und Industriegebäuden in die Atmosphäre gelangen, ist es nahe liegend, dass genau an jenen Standorten, welche derartigen Emissionen ausgesetzt sind, die SO₂-Konzentrationen besonders hoch sind.

Dies trifft auch auf den Standort Südwest zu, welcher aufgrund seiner Weinbaugebiete und Agrarnutzflächen von Emissionen landwirtschaftlicher Fahrzeuge betroffen ist.

Im Westen und im Zentrum hingegen ist diese Erklärung unzureichend, denn aufgrund der Waldrandlage beider Standorte ist es nahezu unmöglich mit dem PKW dorthin zu gelangen. Im Zentrum befindet sich außerdem noch ein kleiner Kinderspielplatz, welcher nur über einen Wanderweg zu erreichen ist.

Die hohen Konzentrationen sind dadurch eher durch einen Schadstoffeintrag mittels Wind und Regen zu erklären.

4.4.4. Chloridgehalt:

Ein nennenswerter Chloridgehalt in den Pflanzenproben konnte nur vereinzelt und nicht an allen Standorten festgestellt werden. Jene Mengen, welche aus den pulverisierten Nadeln herausgelöst und chemisch analysiert werden konnten, ließen sich nur mit Hilfe von Alkohol extrahieren.

Am Standort Ost konnte Chlorid nicht nachgewiesen werden. Aufgrund der Nähe des Standortes zur Autobahn A2 wurde anfangs ein Schadstoffgehalt an Chlor aufgrund von Streusalz angenommen. Jener Winter, in welchem die Nadelproben entnommen wurden (2010/2011) war jedoch so mild und schneearm, dass es nicht nötig war, auf den Straßen Salz zu streuen.

Generell konnte Chlorid nur in den Sommer- und Spätsommermonaten nachgewiesen werden.

Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung ist Chlor nur bedingt transformierbar, weist aber eine hohe Mobilität auf, was wiederum zu einem hohen Ausbreitungspotenzial führt. Dies könnte der Grund sein, warum Chlor an allen Standorten außer im Osten nachgewiesen werden konnte.

Da Streusalz als Chlorlieferant auszuschließen ist, können als mögliche Emissionsflächen Bauschutt- und Sonderabfalldeponien genannt werden (umweltbundesamt.de).

Chloride können aber durch Wind und Regen eingebracht worden sein.

Die höchsten Chloridwerte wurden an den Standorten Süd und Südost erzielt. Beide Flächen sind sowohl wind- als auch regenexponiert.

Die Konzentration im Nordwesten und Westen lassen sich mit der Hauptwindrichtung erklären.

Betrachtet man die Konzentrationen aller Schadstoffe an allen Standorten, so wird augenscheinlich, dass die Standorte Süd und Südost am stärksten belastet sind.

Jene Standorte befinden sich in unmittelbarer Nähe von Siedlungs- und Industriegebieten, sowie von landwirtschaftlichen Nutzflächen.

Jene Standorte, auf welche die oben genannten Parameter nicht zutreffen, sind hingegen nur sehr gering belastet, was den Schluss zulässt, dass mit einem Anstieg der menschlichen Aktivität in einem Gebiet auch die Schadstoffkonzentrationen zunehmen.

5. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, mittels Infrarotphotographie und chemischer Analysen den Vitalitätszustand von Schwarzkiefern zu dokumentieren, um auf eine mögliche Beeinflussung der Gesundheit der Bäume durch den Menschen hinweisen zu können.

Als Untersuchungsgebiet wurde Bad Fischau-Brunn ausgewählt, eine kleine Gemeinde in Niederösterreich, da dieser Ort trotz seiner geringen Fläche von rund 21 km² eine große landschaftliche Mannigfaltigkeit aufweist. Neben Wald- und Forstgebieten verfügt die Gemeinde auch über zahlreiche Rebanlagen und Agrarflächen. Abgesehen davon findet man in Bad Fischau-Brunn in allen Himmelrichtungen ausreichende Schwarzkieferpopulationen, welche sich dadurch als Indikatorbäume hervorragend eignen.

Bei der Analyse der Baumbestände erwies sich der Einsatz von Infrarotphotographie als sehr hilfreich, da mit dieser Technik sichtbar gemacht werden kann, was dem menschlichen Auge ansonsten verborgen bliebe.

Pflanzen haben die Eigenschaft, je nach Wellenlänge, Licht zu transmittieren, zu absorbieren oder zu reflektieren. Betrachten wir eine Pflanze, so erscheint sie uns grün, da sichtbares Licht im roten und blauen Wellenlängenbereich absorbiert wird, während grünes Licht reflektiert wird. Außerhalb des sichtbaren langwelligen Spektrums, das heißt ab einer Wellenlänge von 700 nm aufwärts (= infraroter Bereich), wird Licht von der Pflanze reflektiert. Dies muss so sein, denn andernfalls würde die Pflanze innerlich verbrennen. Begründet ist dieses Verhalten in der Tatsache, dass die Photonen des Lichtes die Pigmentmoleküle in den Chloroplasten anregen und deren Elektronen auf ein höheres Energieniveau anheben. Fallen die Elektronen wieder in den Grundzustand zurück wird Wärme frei. Absorbieren Pflanzen nun langwelliges Licht wie die Infrarotstrahlung, würde in Folge dieser Kettenreaktion zu viel Wärme freierwerden, wodurch die Pflanze innerlich verbrennen müsste. Durch das Reflektieren dieser Strahlung kann jedoch eine Überhitzung verhindert werden.

Je nach Gesundheitszustand der Pflanze zeigt diese ein unterschiedliches Reflexionsverhalten. Bei jungen, vitalen Blättern mit einer ausreichenden Pigmentdichte und Wasserversorgung wird ein Lichtstrahl im Infrarotbereich effektiv reflektiert; dabei erscheinen die mit Infrarottechnik photographierten Blätter auf der Aufnahme weiß. Ist die Pflanze jedoch alt oder geschädigt, obgleich sie für das

menschliche Auge saftig grün aussieht, erscheint sie auf dem Infrarotphoto rot bis braun. Somit ist die Infrarotphotographie eine wirksame Methode, um den Gesundheitszustand der Pflanze, über das für das menschliche Auge Sichtbare hinaus, aufzuzeigen.

In weiterer Folge ist es ratsam, das pflanzliche Material auf Schadstoffe hin zu untersuchen, da so manche chemischen Stoffe eine negative Wirkung auf den Pigmentstoff Chlorophyll zeigen, was wiederum zu einer Abnahme des Reflexionsvermögens führen kann.

Aus diesem Grunde wurden die entnommenen Nadelproben auch hinsichtlich ihres Nitrit-, Nitrat-, Schwefeldioxid- und Chloridgehaltes chemisch analysiert. Mit Ausnahme von Chlorid konnten alle Schadstoffe an jedem Standort nachgewiesen werden. Dabei zeigte sich, dass die höchsten Konzentrationen meist in den wärmeren Monaten erzielt wurden, da die Stoffwechselaktivität in dieser Zeit am höchsten ist. Außerdem konnte aufgezeigt werden, dass die Standorte im Südwesten, Süden und Südosten im Vergleich zu den anderen Standorten deutlich höher belastet sind. Die Vermutung liegt nahe, dass dieser Umstand mit dem Vorhandensein kultivierter Agrarflächen zusammen hängt.

Die Photographie im infrarotnahen und infraroten Bereich erweist sich als ein sehr nützliches Werkzeug zur Feststellung des Vitalzustandes der betrachteten Vegetation, da sie eine Grundlage zur Quantifizierung der stoffwechselaktiven Flächen einer Pflanze oder ganzer Waldabschnitte bildet. Die berechneten Flächen können so in Relation zur Gesamtfläche (eines Baumes oder eines Waldes) gestellt werden und ermöglichen so eine Aussage bezüglich des Vitalitätszustandes der betrachteten Vegetation zu treffen.

6. Quellenangabe

6.1. Literaturverzeichnis

- Amann, Gottfried. 2002. *Bäume und Sträucher des Waldes* (17. Auflage). Melsungen: Neumann-Neudamm AG.
- Bantel, Martin. 2004. *Messgeräte-Praxis: Funktion und Einsatz moderner Messgeräte*. München: Carl Hanser Verlag.
- Campbell, Neil A.; Reece, Jane B.; Markl, Jürgen (Hg.). 2006. *Biologie* (6. Auflage). München: Pearson Studium.
- Glaser, Armin. 2008. *Ratgeber Meerwasserchemie: Theorie und Praxis für Aquarianer*. Marxzell-Burbach: Rüdiger Latka Verlag.
- Gutekunst, Gerhard; Mzyk, Waldemar. 1991. *WBL Wasser Luft und Boden* 1-2, 39-40.
- Holleman A.F.; Wiberg, Nils. 2007. *Lehrbuch der Anorganischen Chemie* (102. Auflage). Berlin: Walter de Gruyter & Co.
- Hütter, Leonhard A. 1994. *Wasser und Wasseruntersuchung* (6. Auflage). Frankfurt: Salle + Sauerländer.
- Latscha, Hans Peter; Kazmaier, Uli; Klein, Helmut Alfons. 2005. *Chemie für Biologen* (2. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Ledig, Martin; Wittke, Georg. 1994. „Nitrat in Lebensmittel“. *Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie* 5 (23), 7-9.
- Peter Schütt et. al. 2008. *Lexikon der Nadelbäume*. Hamburg: Nikol Verlagsgesellschaft mbH CoKG.
- Rohmann, Ulrich; Sontheimer, Heinrich. 1985. *Nitrat im Grundwasser – Ursachen, Bedeutung, Lösungswege*. Frankfurt am Main: ZfGW-Verlag.

6.2. Internetquellen

- Offizielle Homepage der Marktgemeinde Bad Fischau-Brunn. 2012. „Bezirksbuch“. <http://www.bad-fischau-brunn.at/gemeindeamt/html/Bad-Fischau-Brunn.pdf> (6. Jänner 2012)
- Statistik Austria. 1999. „Ein Blick auf die Gemeinde Bad Fischau-Brunn“. <http://www.statistik.at/blickgem/blick5/g32301.pdf> (6. Jänner 2012)
- Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. 2011. „Bad Fischau-Brunn“, „Fischauer Vorberge“ und „Indikator“. http://de.wikipedia.org/wiki/Bad_Fischau-Brunn (3. Jänner 2012)
http://de.wikipedia.org/wiki/Fischauer_Vorberge (3. Jänner 2012)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Indikator> (2. Jänner 2012)

Mangold, Klaus. 2012. „Digitale Infrarotfotografie“.
www.eye.de/infrarotfoto (17. November 2011)

Frantzen, Dirk. 2010. „Grundlagen – Was ist Infrarot?“.
http://photo.frantzen.de/ir_tipps.htm (13. September 2011)

Van Haverbeke, David F. “European Black Pine”.
http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/Volume_1/pinus/nigra.htm
(2. Dezember 2011)

Boeres, Yvan. 2008. „Testbericht Nikon D60“.
http://www.digitalkamera.de/Testbericht/Nikon_D60/4859.aspx (13. Dezember 2011)

Füchsl, Bernhard; Maggauer, Günther. „Giottos VT-805“.
http://www.edugroup.at/fileadmin/DAM/Dateien/Infrastruktur/Geraeteverleih/Sonstige_s/Giottos_VT-805.pdf (13. Dezember 2011)

Technische Universität Dresden – Professur Fernerkundung. 2008. „Fernerkundung 1 – WS 2008/09, 7. Vorlesung“.
http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/ipf/fern/studium/skript-datein/scripte%20FE-1/FE-1_1_script.pdf (3. Jänner 2012)

Williams, Robin; Williams Gigi. 2006. „Pioneers of Invisible Radiation Photography“.
Medical and Scientific Photography.
http://msp.rmit.edu.au/Article_04/06.html (13. September 2011)

Universität von Calgary, Kanada. 2010. “Remote Sensing Applied to Vegetation Classification”.
<http://www.ucalgary.ca/geog/Virtual/Remote%20Sensing/rsveg.html> (16. Mai 2012)

Kell, Katrin. 2012. “Optische Diagnosemöglichkeiten mit Infrarot-Fotografie”.
Staatliche Forschungsanstalt für Gartenbau Weihenstephan.
<http://www.hswt.de/fgw/infodienst/2012/februar/forschung.html> (16. Mai 2012)

European Space Agency. 2012. „Jahreszeitliche Veränderungen des NDVI“.
http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_Environment_DE/SEMT1GVW82G_0.html
(16. Mai 2012)

Das Lexikon der Erde – GeoDataZone. 2010. „Vegetationsindex“.
<http://www.geodz.com/deu/d/Vegetationsindex> (8. Jänner 2012)

Stiftung Unternehmen Wald. „Waldschäden in Deutschland – Was sind die Ursachen“.
<http://www.wald.de/waldschaeden/> (7. November 2011)

Umweltbundesamt Dessau-Roßlau. 2012. „Anorganische Stoffe/ Stoffgruppen“.
<http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/altlast/web1/berichte/wrrl/anhang30.htm> (6. November 2012)

Bundesamt für Umwelt BAFU Bern. 2009. „Landwirtschaft als Schadstoffquelle“.
<http://www.bafu.admin.ch/luft/00596/00600/index.html?lang=de> (12. Jänner 2012)

Hoyafilters – The Difference Is Clear. Tokio, Kalifornien. „Infrared Special Effect Filters“.
<http://www.hoyafilter.com/products/hoya/oef-15.html> (6. Jänner 2012)

Rudolf Seitz et. al. 2011. „Forstliche Fernerkundung an der LWF“.
http://vermessung.bayern.de/file/pdf/4665/AFZ-2011-13_12-13.pdf
(12. Februar 2012)

Landesforstpräsidium Freistaat Sachsen. 2003. „Luftbild-Interpretation: Bestimmungsschlüssel für die Beschreibung von strukturreichen Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild“.
http://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Sachgebiet/Luftbild_GIS/luftbildinterpretationsschluesel_strukturreiche_bestaende_01.pdf (18. Mai 2012)

Deutsch, Barbara; Voß, Maren. 2005. „Stabile Isotope von Stickstoff und Sauerstoff im Nitrat als Anzeiger von Landnutzung und Nitratquellen“. Institut für Ostseeforschung Warnemünde.
http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/gewtag_voss_2005.pdf (19. Mai 2012)

Amt der OÖ. Landesregierung – Direktion Soziales und Gesundheit. 2009. „Nitrat im Trinkwasser“.
http://www.land-oberoesterreich.gv.at/cps/rde/xbcr/SID-D8732090-A7396316/ooe/Infoblatt_Nitrat_im_Trinkwasser.pdf (18. Mai 2012)

6.3. Verwendete Software

“Google Earth”. US Dept. Of State Geographer, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO. 2012.

7. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Satellitenbild von Bad Fischau-Brunn mit den Standorten (Google-Earth)	3
Abb. 2: RQflex der Firma Merck	8
Abb. 3: Pulverisieren der Nadelprobe	10
Abb. 4: Abwiegen der Probenmenge mit der Waage Almasa MT – 3	11
Abb. 5: Ansetzen der Nadelprobe in Ethanol (96%ig)	11
Abb. 6 und 7: Anfertigen eines Chlorophyllfiltrats	12
Abb. 8: chemische Analyse der Chlorophyllproben	12
Abb. 9: Testansatz zur Feststellung von Schwefeldioxid in der Chlorophylllösung	16
Abb. 10: Nachweis von Chlor in der Chlorophylllösung	17
Abb. 11: Elektromagnetisches Spektrum (Campbell, 2006)	18
Abb. 12: Blick auf den inaktiven Infrarotsender einer Fernbedienung	20
Abb. 13: Blick auf den aktivierten Infrarotsender einer Fernbedienung	20
Abb. 14: Hoya-Filter (hoyafilter.com)	21
Abb. 15: Reflexionsverhalten von Vegetation (hswt.de)	22
Abb. 16: Nikon D 60 (Foto: MediaNord; digitalkamera.de)	24
Abb. 17: Giotto's VT 805 (onyougo.com)	24
Abb. 18: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/125 sec.	25
Abb. 19: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	25
Abb. 20: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/100 sec.	26
Abb. 21: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	26
Abb. 22: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/100 sec.	27
Abb. 23: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	27
Abb. 24: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	28
Abb. 25: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	28
Abb. 26: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	29
Abb. 27: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	29
Abb. 28: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	30
Abb. 29: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 0,5 sec	30
Abb. 30: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	31
Abb. 31: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 1 sec.	31
Abb. 32: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	32
Abb. 33: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	32
Abb. 34: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/125 sec.	33

Abb. 35: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 0,5 sec.	33
Abb. 36: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/80 sec.	34
Abb. 37: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	34
Abb. 38: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/60	35
Abb. 39: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	35
Abb. 40: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	36
Abb. 41: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	36
Abb. 42: digital optisch bei Blende 9,0; Belichtungszeit 1/200 sec.	37
Abb. 43: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	37
Abb. 44: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/125 sec.	38
Abb. 45: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	38
Abb. 46: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/100 sec.	39
Abb. 47: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	39
Abb. 48: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	40
Abb. 49: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	40
Abb. 50: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/100 sec.	41
Abb. 51: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	41
Abb. 52: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/50 sec.	42
Abb. 53: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 15 sec.	42
Abb. 54: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/125 sec.	43
Abb. 55: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	43
Abb. 56: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/60 sec.	44
Abb. 57: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.	44
Abb. 58: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/100 sec.	45
Abb. 59: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	45
Abb. 60: digital optisch bei Blende 7,5; Belichtungszeit 1/200 sec.	46
Abb. 61: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	46
Abb. 62: digital optisch bei Blende 7,5; Belichtungszeit 1/200 sec.	47
Abb. 63: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	47
Abb. 64: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	48
Abb. 65: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.	48
Abb. 66: digital optisch bei Blende 4,8; Belichtungszeit 1/80 sec.	49
Abb. 67: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.	49
Abb. 68: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/200 sec.	50

Abb. 69: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	50
Abb. 70: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/100 sec.	51
Abb. 71: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 15 sec.	51
Abb. 72: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/100 sec.	52
Abb. 73: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.	52
Abb. 74: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	53
Abb. 75: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	53
Abb. 76: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/100 sec.	54
Abb. 77: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	54
Abb. 78: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/60 sec.	55
Abb. 79: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.	55
Abb. 80: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/125 sec.	56
Abb. 81: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 15 sec.	56
Abb. 82: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	57
Abb. 83: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 13 sec.	57
Abb. 84: digital optisch bei Blende 4,5; Belichtungszeit 1/80 sec.	58
Abb. 85: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	58
Abb. 86: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/60 sec.	59
Abb. 87: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	59
Abb. 88: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	60
Abb. 89: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 13 sec.	60
Abb. 90: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	61
Abb. 91: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 15 sec.	61
Abb. 92: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/60 sec.	62
Abb. 93: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 20 sec.	62
Abb. 94: digital optisch bei Blende 3,8; Belichtungszeit 1/125 sec.	63
Abb. 95: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 13 sec.	63
Abb. 96: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/60 sec.	64
Abb. 97: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 20 sec.	64
Abb. 98: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/60 sec.	65
Abb. 99: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	65
Abb. 100: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	66
Abb. 101: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	66
Abb. 102: digital optisch bei Blende 9,0; Belichtungszeit 1/125 sec.	67

Abb. 103: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	67
Abb. 104: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/200 sec.	68
Abb. 105: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	68
Abb. 106: digital optisch bei Blende 3,6; Belichtungszeit 1/160 sec.	69
Abb. 107: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	69
Abb. 108: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	70
Abb. 109: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	70
Abb. 110: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	71
Abb. 111: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	71
Abb. 112: digital optisch bei Blende 4,5; Belichtungszeit 1/80 sec.	72
Abb. 113: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 10 sec.	72
Abb. 114: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	73
Abb. 115: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	73
Abb. 116: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/100 sec.	74
Abb. 117: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	74
Abb. 118: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/125 sec.	75
Abb. 119: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	75
Abb. 120: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	76
Abb. 121: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	76
Abb. 122: digital optisch bei Blende 9,0; Belichtungszeit 1/250 sec.	77
Abb. 123: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	77
Abb. 124: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/200 sec.	78
Abb. 125: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	78
Abb. 126: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	79
Abb. 127: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	79
Abb. 128: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	80
Abb. 129: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	80
Abb. 130: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	81
Abb. 131: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	81
Abb. 132: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	82
Abb. 133: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	82
Abb. 134: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/125 sec.	83
Abb. 135: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	83
Abb. 136: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	84

Abb. 137: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	84
Abb. 138: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/125 sec.	85
Abb. 139: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	85
Abb. 140: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	86
Abb. 141: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	86
Abb. 142: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	87
Abb. 143: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	87
Abb. 144: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	88
Abb. 145: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	88
Abb. 146: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	89
Abb. 147: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	89
Abb. 148: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	90
Abb. 149: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 1,3 sec.	90
Abb. 150: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	91
Abb. 151: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	91
Abb. 152: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	92
Abb. 153: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec,	92
Abb. 154: digital optisch bei Blende 3,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	93
Abb. 155: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	93
Abb. 156: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	94
Abb. 157: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	94
Abb. 158: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/60 sec.	95
Abb. 159: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	95
Abb. 160: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	96
Abb. 161: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	96
Abb. 162: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/250 sec.	97
Abb. 163: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	97
Abb. 164: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	98
Abb. 165: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	98
Abb. 166: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	99
Abb. 167: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	99
Abb. 168: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/200 sec.	100
Abb. 169: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	100
Abb. 170: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	101

Abb. 171: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	101
Abb. 172: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	102
Abb. 173: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	102
Abb. 174: digital optisch bei Blende 3,8; Belichtungszeit 1/200 sec.	103
Abb. 175: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	103
Abb. 176: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	104
Abb. 177: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	104
Abb. 178: digital optisch bei Blende 3,5; Belichtungszeit 1/60 sec.	105
Abb. 179: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	105
Abb. 180: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	106
Abb. 181: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	106
Abb. 182: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/250 sec.	107
Abb. 183: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	107
Abb. 184: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/200 sec.	108
Abb. 185: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	108
Abb. 186: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	109
Abb. 187: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	109
Abb. 188: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/200 sec.	110
Abb. 189: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	110
Abb. 190: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	111
Abb. 191: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	111
Abb. 192: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/160 sec.	112
Abb. 193: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	112
Abb. 194: digital optisch bei Blende 4,0; Belichtungszeit 1/160 sec.	113
Abb. 195: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	113
Abb. 196: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	114
Abb. 197: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	114
Abb. 198: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	115
Abb. 199: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	115
Abb. 200: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/200 sec.	116
Abb. 201: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	116
Abb. 202: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	117
Abb. 203: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	117
Abb. 204: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	118

Abb. 205: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	118
Abb. 206: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/100 sec.	119
Abb. 207: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec. bei 800 ASA	119
Abb. 208: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	120
Abb. 209: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	120
Abb. 210: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	121
Abb. 211: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	121
Abb. 212: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	122
Abb. 213: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	122
Abb. 214: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	123
Abb. 215: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	123
Abb. 216: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	124
Abb. 217: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	124
Abb. 218: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	125
Abb. 219: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	125
Abb. 220: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/125 sec.	126
Abb. 221: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	126
Abb. 222: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	127
Abb. 223: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	127
Abb. 224: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	128
Abb. 225: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	128
Abb. 226: digital optisch bei Blende 4,8; Belichtungszeit 1/100 sec.	129
Abb. 227: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	129
Abb. 228: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	130
Abb. 229: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	130
Abb. 230: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	131
Abb. 231: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	131
Abb. 232: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	132
Abb. 233: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	132
Abb. 234: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	133
Abb. 235: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	133
Abb. 236: digital optisch bei Blende 5,0; Belichtungszeit 1/160 sec.	134
Abb. 237: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 5 sec.	134
Abb. 238: digital optisch bei Blende 4,5; Belichtungszeit 1/80 sec.	135

Abb. 239: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 8 sec.	135
Abb. 240: digital optisch bei Blende 5,3; Belichtungszeit 1/200 sec.	136
Abb. 241: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	136
Abb. 242: digital optisch bei Blende 8,0; Belichtungszeit 1/200 sec.	137
Abb. 243: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	137
Abb. 244: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/200 sec.	138
Abb. 245: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	138
Abb. 246: digital optisch bei Blende 6,3; Belichtungszeit 1/160 sec.	139
Abb. 247: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 2 sec.	139
Abb. 248: digital optisch bei Blende 7,1; Belichtungszeit 1/200 sec.	140
Abb. 249: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 1 sec.	140
Abb. 250: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/160 sec.	141
Abb. 251: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	141
Abb. 252: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	142
Abb. 253: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 4 sec.	142
Abb. 254: digital optisch bei Blende 3,8; Belichtungszeit 1/125 sec.	143
Abb. 255: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 6 sec.	143
Abb. 256: digital optisch bei Blende 5,6; Belichtungszeit 1/125 sec.	144
Abb. 257: Aufnahme mit Infrarotfilter; Belichtungszeit 3 sec.	144
Abb. 258: Durchlässigkeit und Reflexionsvermögen eines Laubblattes im Querschnitt (satgeo.zum.de)	170
Abb. 259 und 260: Aufnahme eines Indikatorbaumes digital optisch und mit Infrarot-Filter	172
Abb. 261: digital optische Aufnahme einer Schwarzkiefer am Standort Süd	173
Abb. 262: Aufnahme der Schwarzkiefer mit Infrarotfilter	174
Abb. 263 und 264: Detailaufnahme einer Schwarzkiefer; digital optisch und mit Infrarotfilter	174
Abb. 265 und 266: Umrisszeichnungen auf Transparentpapier über Abb.262 und über Millimeterpapier gelegt	175

Grafik 1: Nitritkonzentration am Standort Nord; Lösungsmittel Alkohol	145
Grafik 2: Nitritkonzentration am Standort Nordost; Lösungsmittel Alkohol	145
Grafik 3: Nitritkonzentration am Standort Ost; Lösungsmittel Alkohol	146
Grafik 4: Nitritkonzentration am Standort Südost; Lösungsmittel Alkohol	146
Grafik 5: Nitritkonzentration am Standort Süd; Lösungsmittel Alkohol	147
Grafik 6: Nitritkonzentration am Standort Südwest; Lösungsmittel Alkohol	147
Grafik 7: Nitritkonzentration am Standort West; Lösungsmittel Alkohol	148
Grafik 8: Nitritkonzentration am Standort Nordwest; Lösungsmittel Alkohol	148
Grafik 9: Nitritkonzentration am Standort Zentrum; Lösungsmittel Alkohol	149
Grafik 10: Nitratkonzentration am Standort Nord; Lösungsmittel Aqua dest.	149
Grafik 11: Nitratkonzentration am Standort Nordost; Lösungsmittel Aqua dest.	150
Grafik 12: Nitratkonzentration am Standort Ost; Lösungsmittel Aqua dest.	150
Grafik 13: Nitratkonzentration am Standort Südost; Lösungsmittel Aqua dest.	151
Grafik 14: Nitratkonzentration am Standort Süd; Lösungsmittel Aqua dest.	151
Grafik 15: Nitratkonzentration am Standort Südwest; Lösungsmittel Aqua dest.	152
Grafik 16: Nitratkonzentration am Standort West; Lösungsmittel Aqua dest.	152
Grafik 17: Nitratkonzentration am Standort Nordwest; Lösungsmittel Aqua dest.	153
Grafik 18: Nitratkonzentration am Standort Zentrum; Lösungsmittel Aqua dest.	153
Grafik 19: SO ₂ -Konzentration am Standort Nord	154
Grafik 20: SO ₂ -Konzentration am Standort Nordost	154
Grafik 21: SO ₂ -Konzentration am Standort Ost	155
Grafik 22: SO ₂ -Konzentration am Standort Südost	155
Grafik 23: SO ₂ -Konzentration am Standort Süd	156
Grafik 24: SO ₂ -Konzentration am Standort Südwest	156
Grafik 25: SO ₂ -Konzentration am Standort West	157
Grafik 26: SO ₂ -Konzentration am Standort Nordwest	157
Grafik 27: SO ₂ -Konzentration am Standort Zentrum	158
Grafik 28: Chloridkonzentration am Standort Nord; Lösungsmittel Aqua dest.	158
Grafik 29: Chloridkonzentration am Standort Nordost; Lösungsmittel Aqua dest.	159
Grafik 30: Chloridkonzentration am Standort Südost; Lösungsmittel Aqua dest.	159
Grafik 31: Chloridkonzentration am Standort Süd; Lösungsmittel Aqua dest.	160
Grafik 32: Chloridkonzentration am Standort Südwest; Lösungsmittel Aqua dest.	160
Grafik 33: Chloridkonzentration am Standort West; Lösungsmittel Aqua dest.	161
Grafik 34: Chloridkonzentration am Standort NW; Lösungsmittel Aqua dest.	161

Grafik 35: Chloridkonzentration am Standort Zentrum; Lösungsmittel Aqua dest.	162
Grafik 36: Schadstoffbelastung am Standort Nord im Verlauf von einem Jahr.	162
Grafik 37: Schadstoffkonzentrationen am Standort Nordost im Verlauf von einem Jahr.	163
Grafik 38: Schadstoffkonzentrationen von Nitrit, Nitrat, Schwefeldioxid und Chlor am Standort Ost im Verlauf von einem Jahr.	163
Grafik 39: Schadstoffkonzentrationen von Nitrit, Nitrat, Schwefeldioxid und Chlor am Standort Südost im Verlauf von einem Jahr.	164
Grafik 40: Konzentrationen der untersuchten Schadstoffe am Standort Süd.	164
Grafik 41: Monatliche Schadstoffbelastung am Standort Südwest.	165
Grafik 42: Monatliche Schadstoffbelastung am Standort West.	165
Grafik 43: Monatliche Schadstoffbelastung am Standort Nordwest.	166
Grafik 44: Monatliche Schadstoffbelastung am Standort Zentrum.	166
Grafik 45: Maximal gemessene Nitritkonzentrationen im Verlauf von einem Jahr.	167
Grafik 46: Schadstoffmaxima von Nitrat im Verlauf von einem Jahr.	167
Grafik 47: Konzentrationsmaxima von Schwefeldioxid im Verlauf von einem Jahr.	168
Grafik 48: Konzentrationsmaxima von Chlor im Verlauf von einem Jahr.	168

8. Abstract

The objective of this thesis is to record the state of vitality of black pines with the help of infrared photography and chemical analyses to indicate a possible impact of humans on the health of those trees.

The area under investigation is Bad Fischau-Brunn, a small village in Lower Austria, which shows a huge scenic variety. Beside forests, there are numerous agricultural areas and vineyards.

Since there are fair amounts of black pine populations, which can be found in all four cardinal directions, black pines are used as indicator trees.

Infrared photography is a technique used to visualise what would remain invisible to the human eye.

Plants have the property to transmit, absorb or to reflect light dependent on its wavelength. If humans view at plants they appear green to them since plants absorb visible red and blue light, while they reflect green light.

Beyond the visible long wave spectrum (i.e. wave lengths of 700 nm and more which is within the range of infrared) plants reflect light. This is an essential process since the plant would suffer from internal burns otherwise. The photons of light stimulate the pigment molecules in the chloroplasts and shift their electrons to a higher level. When the electrons drop back to their original level, heat energy is set free.

If plants absorbed long wave light like infrared radiation, this would lead to a chain reaction where too much heat energy is released which would further lead to internal burns. However, the reflection of this radiation prevents an overheating.

Each plant has its own reflective behaviour depending on its state of health. While vital leaves with a sufficient density of pigments and water supply effectively reflect light rays from the infrared spectrum (what appears white on an infrared picture), older or damaged leaves appear red till brown on an infrared picture although they seem green to the human eye. That's the reason why infrared photography is an efficient method to demonstrate a plants state of health beyond the visible.

Further, samples of black pine needles are taken to assay the plant material concerning its content of pollutants, since there are some chemical substances which have a negative effect on the chlorophyll pigment, which again has an impact on the capacity of reflection.

Chemical analyses concerning the concentration of nitrite, nitrate, sulphur dioxide and chloride in black pine needles show that, except chloride, all the other pollutants could be proven on each habitat.

Additionally, it could be proven that high concentrations of the pollutants are reached during the warmer months, since the metabolic activity is very high at that time. And it became obvious that, compared to the other habitats, the habitats in the South-East, in the South and in the South-West show the highest range of pollution.

This leads to the assumption that this circumstance is related to the existence of cultivated agricultural areas.

The infrared photography has proven to be an essential tool to assess the state of vitality of the investigated vegetation. It represents a basis to quantify the metabolic areas of a plant or of an entire wood by setting the vital areas in relation to the total area (of a tree or wood). This enables a statement concerning the state of vitality of the vegetation observed.

