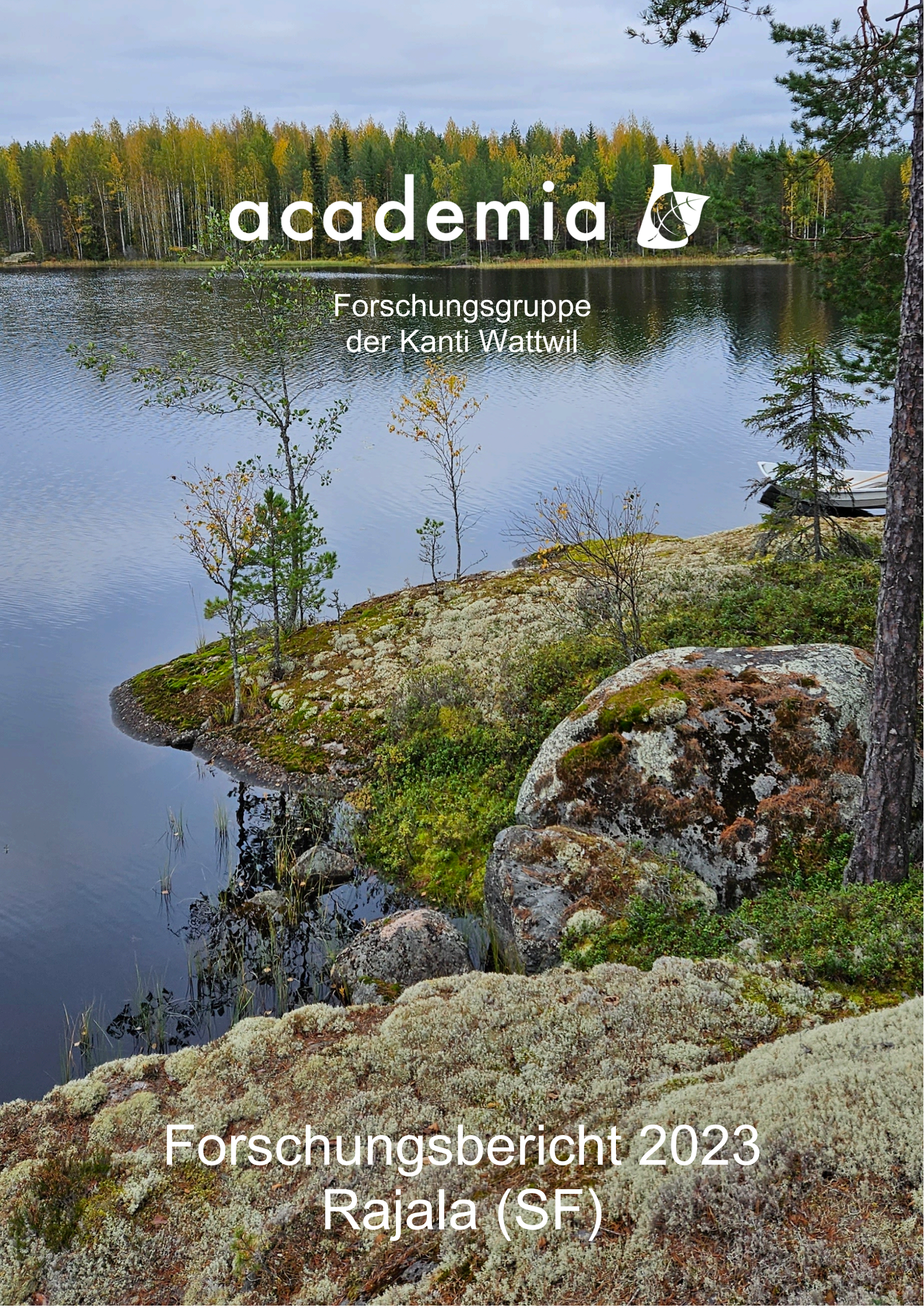




academia 

Forschungsgruppe
der Kanti Wattwil

Forschungsbericht 2023
Rajala (SF)

Projektbericht

academia-Studienwoche

Rajala - Tampere (Finnland)

23.9. – 7.10.2023

Einleitung

Etwas Besonderes sollte es sein. Nach den durch die Corona-Pandemie und ihre Nachwehen verunmöglichten Jubiläumsprojekten zu unserem 20-jährigen Bestehen im Jahr 2021 war klar, dass wir irgendwann wieder ein Grossprojekt mit einer weiten Reise realisieren wollten. Nachdem sich die Reisemöglichkeiten weitgehend normalisiert hatten, packten wir die Chance. Im Herbst 2022 begannen wir die Planung einer Reise in den Norden. Nach Norwegen im Jahr 2011 standen früh Schweden oder Finnland in der engeren Auswahl. Anders als 2011 wollten wir mit dem Selbstbewusstsein einer naturwissenschaftlichen Forschungsgruppe auf einen Flug verzichten. Dank der zündenden Idee unseres Reiseunternehmers Stefan Bauer (Roth Reisen Wattwil) wurde schliesslich die Reise nach Finnland und zurück erstens möglich und zweitens zu einem wichtigen Teil des Gesamterlebnisses. Die verhältnismässig kurze Carfahrt nach Travemünde war gut zu überstehen, und auf der 30-stündigen bequemen Fährfahrt durch die Ostsee wurden wir kulinarisch verwöhnt, hatten Schlafplätze und konnten das Abenteuer einer Schiffsreise miterleben.



Abb. 1: Die Eindrücke der langen Fährfahrt waren grandios - egal ob an der Reling beim Betrachten des Sonnenuntergangs (links) oder mitten in der Nacht beim Ablegen vom Fährhafen Travemünde (rechts).

Unser Lagerort Rajalan Leirikeskus erwies sich als nahezu ideal für unsere Zwecke. Die Gruppe von Holzhäusern befindet sich buchstäblich mitten im Nirgendwo, zirka 50 km nördlich von Tampere, umgeben von Wald und einem eigenen kleinen See. Die Unterkünfte sind zweckmässig ausgerüstet und boten uns viel Platz zum Schlafen und Arbeiten. Wir konnten problemlos unser naturwissenschaftliches Labor einrichten, und eine grosse Küche machte die Verköstigung der grossen Gruppe einfach. Etwas aufwändig war der Einkauf und die Erreichbarkeit von geeigneten Arbeitsplätzen für die einzelnen Projektteams, aber dank vier Mietautos liessen sich auch diese logistischen Schwierigkeiten lösen.

In einer ungewohnten Umgebung macht Feldarbeit doppelt so viel Spass, aber sie ist natürlich auch schwieriger zu planen und umzusetzen. An dieser Herausforderung konnten wir uns dieses Jahr messen, und über die Resultate der dabei realisierten Forschungsprojekte möchten wir Sie im folgenden Bericht informieren.



Abb. 2: Unser Camp Rajalan Leirikeskus - das Schlafgebäude von aussen mit der Feuerstelle rechts im Vordergrund (links) und der geräumige Labortrakt des Haupthauses von innen (rechts).

Geographie

Finnland, das Land der tausend Seen und der Mitternachtssonne, birgt eine faszinierende Vielfalt an Naturwundern. Von der kargen Tundra bis zu den dichten Wäldern erstreckt sich eine Landschaft, die sowohl raue Schönheit als auch eine reiche Flora und Fauna bietet. Mit einer Bevölkerungsdichte von 18.3 Einwohnern pro Quadratkilometer (zum Vergleich in der Schweiz: 215 Einw./km²) ist das Land durchschnittlich sehr dünn besiedelt. Unser Aufenthaltsort etwa 50 km nördlich der Grossstadt Tampere verkörperte dieses zivilisationsleere Ambiente. Kuru, die nächst grössere Siedlung, ist mit dem Auto nur durch eine 30-minütige Fahrt entlang endloser Waldstrassen erreichbar.

Als eines der nördlichsten Länder der Erde liegt Finnland zwischen dem 60. und 70. Breitengrad. Das Klima ist kalt-gemässigt. Die Sommer sind kurz, aber die langen Tage ermöglichen ein schnelles Pflanzenwachstum. Die Niederschlagsmenge beträgt etwa 580 mm jährlich, was trockener ist als in Mitteleuropa. Der Einfluss der Ostsee und die vielen Binnenseen mildern das Klima. Insgesamt zeigt Finnlands Klima sowohl Aspekte des kontinentalen, als auch des maritimen Klimas und wird der borealen Zone zugeordnet. Das Grundgestein Finnlands, der baltische Schild, besteht aus sehr alten Gesteinen (Gneise, Granite und Schiefer), welche während des Präkambriums vor 1 Milliarde Jahren entstanden sind. Die grossen glazialen Prozesse der Eiszeiten prägten letztlich die recht flache Topografie mit weitreichenden Moränen- und Seenlandschaften.



Abb. 3: Die herbstliche Natur in den finnischen Wäldern ist sowohl im Grossen wie auch im Kleinen immer einen Blick wert.

Diese Landschaft bildet heute ein einzigartig vierfältiges Mosaik von Ökosystemen. Tausende von Seen, Wäldern und Hügeln erstrecken sich über das gesamte Land. Die Vegetation ist an die klimatischen Bedingungen angepasst. Etwa 70 % des Landes sind von Wäldern bedeckt. Typische Baumarten sind Fichten,

Kiefern und Birken. In den nördlichen Regionen dominieren Tannen und Birken. Die Tierwelt umfasst unter anderem Elche, Rentiere, Bären, Wölfe und eine Vielzahl von Vogelarten.

Wissenschaft

Wie gewohnt versuchten wir, mit unseren Projekten einen möglichst breiten Bereich der Naturwissenschaften abzudecken. Mitten auf der finnischen Seenplatte lag es auf der Hand, ein *Hydrologie-Projekt* zu realisieren. Die Seen in der Region unseres Lagerhauses waren zumeist nicht tief und typischerweise mitten in Moorlandschaften gelegen. Daher war grundsätzlich einmal von Interesse, ob und inwiefern sich ihre Wasserzusammensetzung gegenüber den uns bekannteren und in früheren Jahren untersuchten Seen unterscheidet. Zudem war der Plan, auch im hohen Norden einen See zu besuchen, der ein tiefes Wasserprofil ermöglichte. Eine interessante Frage war, ob in diesen nördlichen Breitengraden und zu relativ später Jahreszeit noch Schichtungen gemessen werden könnten. Die Resultate des Projekts sind eindrücklich: Das mithilfe eines pensionierten Fischers aufgenommene Tiefenprofil zeigt eine klare Grenzschicht in der üblichen Tiefe von ca. 15-20 m, zudem mit einem ziemlich grossen Sauerstoffdefizit in den unteren Wasserschichten. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass alle vermessenen Gewässern verglichen mit Beispielen aus der Schweiz eher sauer und extrem arm an gelösten Ionen sind. Das passt gut zu den Erwartungen und zeigt, dass die von Mooren dominierte Landschaft ein ökologisch spezielles Habitat darstellt.

Nach einigen Lagern in eher von Sedimenten geprägten Landschaften konnte die *Projektgruppe Geologie* endlich wieder einmal in kristallinem Gestein schwelgen. Das Grundgestein der finnischen Seenplatte bildet der Zentralfinnische Granitoid-Komplex, also ein kristallines Gestein. Bei der Vorbereitung kamen zwar Zweifel am Erfolg des Projektes auf, weil auf den verfügbaren Landkarten kaum Erhebungen und somit keine klaren Zugänge zum Grundgestein sichtbar wurden. Es zeigte sich dann, dass diese Sorge unbegründet war. Trotzdem zählten die im Voraus recherchierten Minen und Steinbrüche zu den ergiebigsten Quellen für die Probennahme. Die über 150 kg Gesteinsproben konnten dank dem Car heil nach Wattwil transportiert werden. Die Analyse einer so grossen Datenmenge brauchte aber einiges an Einsatz, Koordination und Nerven. Das Projektteam nutzte die vielen Möglichkeiten bis zur letzten Minute, die Gesteine visuell, mit Dünnschliffen und Elementanalysen zu untersuchen. Die detaillierten Einsichten in die Mineralogie und Petrologie im Spezialbericht zeugen von dieser intensiven und sorgfältigen Arbeit.



Abb. 4: Vor jedem Messtag mussten die Sensoren der Hydrolab-Wassersonde geeicht werden (links). Um Proben aus dem anstehenden Gestein zu gewinnen, musste teilweise zu Hammer und Meissel gegriffen werden (rechts).

Bei einem Spaziergang durch einen finnischen Wald fällt sofort die grosse Flechtenvielfalt auf. Nebst dem feuchten Klima, das den meisten Flechten gut behagt, und der relativen Unberührtheit der Wälder ist dafür vor allem das Licht entscheidend. Durch den immer eher flachen Lichteinfall in den hohen nördlichen Breitengraden stehen die Nadelbäume auch in «dichten» Wäldern relativ weit auseinander, um genügend Licht für die Photosynthese zu erhalten. Somit trifft mehr Licht auf den Boden und die Stämme der Bäume, was das Flechtenwachstum begünstigt. Das Ziel des *Flechten-Projektes* war es, diese Flechtenvielfalt zu erfassen und wenn möglich verschiedene Biotope miteinander zu vergleichen. Da es das erste Flechtenprojekt der **academia** dieser Art war, musste ein geeignetes Vorgehen erst laufend im Projekt entwickelt werden.

Es wurde entschieden, pro Standort an mehreren Orten möglichst die ganze Flechtenvielfalt im Feld zu erfassen, indem Proben genommen wurden. Diese knapp 300 Flechtenproben wurden zurück in Wattwil in morphologische Typen eingeteilt, und diese Typen dann wenn möglich einem Artenkomplex oder einer Art zugeordnet. So konnte die Vielfalt erfasst werden, ohne die sehr zeitaufwändige Artbestimmung bei jeder Flechte einzeln durchführen zu müssen. Im Rahmen des Finnland-Projekts konnten auf diese Weise 88 Flechtentypen unterschieden und ihre Verteilung abhängig von Standortfaktoren studiert werden.

Auch Pilze wurden erneut zum Studienobjekt erkoren. Die herbstlichen finnischen Wälder versprachen eine gute Ausbeute an Pilzen. Im Lauf des letzten Jahres entstand die Idee, den Duft von Pilzen zu erforschen. Das wurde im diesjährigen *Pilzprojekt* nun angepackt. In Rajala und Umgebung wurden gezielt Pilze gesucht und gesammelt, die entweder durch ihre Duftnote auffielen oder aus der Literatur als Gift- oder Würzpilze bekannt waren. Die Pilze wurden auf verschiedene Arten konserviert, um dann entweder via Headspace-Analytik direkt den freigesetzten Duft der Pilze zu untersuchen, oder um mit Dichlormethan-Auszügen an die Inhaltsstoffe zu gelangen. Bei den Analysen auf dem Gaschromatographen der ZHAW in Wädenswil zeigte sich, dass die Headspace-Analysen ein wesentlich reichhaltigeres Spektrum an Inhaltsstoffen liefern als die Dichlormethan-Auszüge. Die aufwändige Aufarbeitung der Resultate zeigte, dass die für den typischen Pilzgeruch wesentlichen C8-Verbindungen 3-Octanon und 1-Octen-3-ol zuverlässig identifiziert werden konnten. Vor allem aber ergaben sich viele Erkenntnisse zu Verfahrensfragen, so zum Beispiel dass man unbedingt Gärvorgänge vermeiden muss, die überraschenderweise auch in getrockneten Pilzproben zu einer Veränderung des Duftspektrums geführt haben, oder dass eine Vakuumierung der Proben durchaus grosse Einflüsse auf die Messresultate haben kann. An spannenden Folgefragen mangelt es nach diesem Projekt jedenfalls nicht.



Abb. 5: Flechten gab es in den finnischen Wäldern in Hülle und Fülle. Die Unterscheidung verschiedener Flechtenarten im Feld ist aber schwierig und war für die Projektgruppe eine echte Herausforderung (links). Nachdem die Pilzproben im Feld gesammelt und konserviert waren, folgten für das Pilz-Team aufwändige Laborarbeiten an der Kanti Wattwil (rechts) und an der ZHAW in Wädenswil.

Schwerer als erwartet gestaltete sich das Projekt der *Zoologie-Gruppe*. Anfangs klang die Aufgabenstellung lösbar: Mittels Fotofallen und Erkundungstouren sollte die lokale Säugetierwelt studiert und fotografiert werden, und als Teilprojekt mit etwas analytischem Anspruch wurden die Suche und Analyse von Eulen-Gewöllen geplant. Es zeigte sich in Finnland sehr schnell, dass auch gut vorbereitete Projekte auf unerwartete Schwierigkeiten stossen können. Da der Baumabstand in den finnischen Wäldern sehr gross ist und kaum dichtes Unterholz wächst, ist buchstäblich die ganze Waldfläche für Tiere begehbar, so dass keine Wildwechsel existieren, wie es sie in der Schweiz gibt. Dadurch ist die Positionierung von Kamerafallen ein reines Glücksspiel. Da zudem die eigens konzipierte Fotofalle wegen technischen Schwierigkeiten ausstieg, und Schlafbäume von Eulen ebenfalls nicht geografisch eingegrenzt werden konnten, musste die Projektgruppe einiges an Rückschlägen einstecken. Auf den Dämmerungsfahrten konnten immerhin Schneehasen, Rehe, Eichhörnchen und diverse Arten von Raufusshühnern gesichtet werden. In der allerletzten Nacht konnte mit einigen Elch-Aufnahmen doch noch der ersehnte Grosse Erfolg erzielt werden.



Abb. 6: Zum Schutz vor Jägern trugen die Projektgruppen im Wald jeweils Leuchtwesten, hier die Zoologie-Gruppe beim Untersuchen eines Vogelhäuschen (links). Eine in der letzten Nacht vor der Abreise von einer der ausgesetzten Wildcams erfasste Elchkuh (rechts).

Einen spannenden Ansatz verfolgte das *DNA-Projekt*. Nach einigen erfolgreichen Projekten rund um den Nachweis von *Wolbachia*-DNA sollte dieses Jahr die Methodik etwas ausgeweitet werden. Die Zielsetzung war es, erstmals mit DNA von Pflanzen zu arbeiten, und dabei Baumarten genetisch voneinander zu unterscheiden. Normalerweise würde ein geeigneter DNA-Abschnitt sequenziert werden, was allerdings sehr teuer ist. Die gewählte Methode bestand darin, zunächst mit selbst bestellten Primersequenzen einen DNA-Abschnitt aus dem Genmaterial der gesuchten Blattproben auszuschneiden und mittels Polymerase-Kettenreaktion zu vervielfachen. Im Projekt wurde dazu ein nichtcodierender Abschnitt der DNA von Chloroplasten gewählt. Diese DNA-Abschnitte wurden dann durch einen gezielt bei bestimmten DNA-Abfolgen wirkenden Verdauungsvorgang getrennt und so in kleinere Stücke fragmentiert. Dadurch können ohne Vollsequenzierung Unterschiede in der Basensequenz sichtbar gemacht werden. Mit Gel-Elektrophorese können diese Fragmente dann ihrer Länge nach geordnet werden, und ähnlich wie in einer Massenspektroskopie kann das Fragmentationsmuster Rückschlüsse auf die Baumart ermöglichen. Erfreulicherweise und dank ausgiebigen Tests im Vorfeld funktionierte die Methode gut. Nebst vielen interessanten Erkenntnissen stellte sich heraus, dass laubabwerfende Pflanzen ungeeignet sind, da die Chloroplasten im Herbst abgebaut werden. Insbesondere die Resultate von Nadelbäumen und anderen immergrünen Pflanzen erlauben interessante Einsichten und deuten das Potential der Methode an.



Abb. 7: Erst am Ende der ganzen Analyseprozedur zeigte sich am Leuchtschirm, ob die DNA-Extraktion und -Digestion funktioniert haben - immer ein Moment der Spannung für das Projektteam DNA (links). Die Probanden der Einschlafstudie mussten aufwändig verkabelt werden, damit während der folgenden Messreihe die Hirn- und Muskelaktivität dann korrekt gemessen werden konnte (rechts).

Die Distanz zur Zivilisation und zu störenden elektromagnetischen Feldern machte den Lagerort Rajala beinahe perfekt für eine physiologische Schlafstudie. Das *Physiologie-Team* versuchte in seiner Arbeit einen kürzlich erforschten Effekt nachzuweisen: In der Einschlafphase verabschieden sich unterschiedliche Fähigkeiten des Hirns zu verschiedenen Zeitpunkten. Um dies zu testen, wurden Probanden gebeten, während einer Ruhephase am Tag ein Hörbuch zu hören. In regelmässigen Abständen wurde dem Hörbuch ein akus-

tisches Signal unterlegt, das vom Probanden mit einem Knopfdruck quittiert werden musste. Zudem wurde nach dem Aufwachen überprüft, wie weit der Proband korrekte Fragen zum Inhalt des Hörbuchs beantworten konnte. Zusätzlich wurden die Hirnaktivitäten durch ein Elektro-Enzephalogramm (EEG) und Elektro-Myographien (EMG) der Augenmuskeln überwacht. Tatsächlich zeigte sich überraschend eindeutig, dass die Probanden wesentlich länger auf den Piepton korrekt reagierten, als sie sich an den Inhalt des Hörbuchs erinnern konnten. Zudem konnten die EEG-Signale in den Zeitfenstern kurz vor und kurz nach dem Piepton analysiert und dabei charakteristische Signalformen erkannt werden, die auf spezifische Vorgänge in den verarbeitenden Hirnarealen hinweisen. Die Resultate des Projekts sind signifikant und bemerkenswert, weil sie eine erste Bestätigung einer erst kürzlich verfassten professionellen Studie bieten, und dies mit den beschränkten technischen Mitteln unserer Forschungsgruppe. Darüber hinaus wird offensichtlich, dass die detaillierte Analyse der EEG-Signale noch bei weitem nicht ausgereizt ist und genügend Material und Anreiz für künftige Studien bietet.

Der hohe Norden zeichnet sich im Winterhalbjahr unter anderem durch die häufigen und spektakulären Nordlichter aus. Obwohl wir dazu zu früh im Jahr anreisten und auch der Lagerort zu südlich gelegen war, dämpfte dies nicht die Motivation für ein Projekt, das sich mit Effekten der Atmosphärenphysik auseinandersetzte. Da wir innerhalb der **academia** kaum Erfahrung in diesem Bereich hatten, wurden die Netze zuerst weit ausgeworfen. Ausgehend von fünf eingehend studierten Projektideen konzentrierte sich das *Atmosphärenphysik-Team* schliesslich auf zwei Fragestellungen. Als kleines Pionierprojekt wurde ein Messaufbau realisiert, der atmosphärische Entladungen über Radioempfänger registrieren kann. Dazu wurden während dem Lager Prototypen entwickelt und getestet. Das Hauptprojekt der Projektgruppe war aber eine aufwändige Studie zur Messung atmosphärischer Myonen. Zwei spannende Fragen wurden untersucht. Einerseits sollte mit dem gut getesteten Myonen-Teleskop die Modellierung des atmosphärischen Myonenflusses besser erfasst werden. Dafür wurde die Auswertelektronik leicht erweitert, und anhand des Datensatzes die vereinfachte Theorie zur Winkelabhängigkeit des Myonenflusses getestet. Vor allem aber wurde nach dem Lager unter kontrollierten Bedingungen eine Langzeitmessung über die Produktion und Ausbreitung sekundärer Teilchenschauer durchgeführt, die von Myonen in Stahlplatten ausgelöst werden. Die sich über Wochen hinziehende Messphase führte zu beeindruckenden Resultaten, die mit Standardmodellen der Schauer-Erzeugung abgeglichen werden konnten. Die qualitative Übereinstimmung von Experiment und Theorie ist bereits überzeugend, bei der Feinabstimmung gibt es aber auf Seiten der anspruchsvollen Theorie noch offene Fragen.



Abb. 8: Für das Teilprojekt «Radio Natur» musste das Atmosphärenphysik-Team die Apparaturen selbst zusammenlöten (links). Die 2 m-Schüssel des Radioteleskops ist zerlegbar und musste zunächst an einem günstigen Ort aufgebaut, zusammengesetzt und verkabelt werden (rechts).

Noch tiefer ins Universum begab sich die *Radioastronomie-Gruppe*. Mit einem Radioteleskop, das ein Jahr zuvor im Rahmen einer Maturaarbeit entwickelt wurde und eine beeindruckende Parabolschüssel von knapp 2 m Durchmesser aufweist, wurde im Licht der 21 cm-Linie der Himmel abgescannt. Die 21 cm-Linie ist interessant, weil sie von neutralem Wasserstoffgas stammt. Da Wasserstoff der Hauptbestandteil des Universums ist, können so kalte, unverdichtete Molekülwolken nachgewiesen werden, wie sie typischerweise in Galaxien und Sternhaufen vorkommen. Das Prinzip der Messung besteht darin, dass man das Himmelsa-

real Punkt für Punkt abtastet und pro Messpunkt eine frequenzabhängige Aufnahme der Radiostrahlung im Bereich der 21 cm-Linie aufzeichnet. Aus der Intensität des Signals kann man die Menge des vorhandenen Wasserstoffs ablesen, und aus der Frequenzverschiebung die Geschwindigkeit des Gases in Beobachtungsrichtung berechnen. Diese kombinierte Information ermöglicht deshalb Einblicke in die Verteilung und Dynamik der Wasserstoffwolken in unserer Galaxis. Da die gesamte Mess- und Kartierungstechnik erst entwickelt respektive verbessert werden musste, präsentierte das Projekt einen hohen Anteil an technischen Hürden, die zu überwinden waren. Die gewonnenen Daten aus dieser Messkampagne zeigen aber sehr gute Übereinstimmung mit professionellen Messungen und deuten das grosse Potential der Apparatur an. Dies eröffnet interessante Möglichkeiten für weitere Untersuchungen in kommenden Projekten.

Expeditionsleben

Eine weite Reise in ein unbekanntes Gebiet, mit vielen Mitgliedern, die noch nie mit der **academia** unterwegs waren, das ist immer ein spezielles Abenteuer. Einen der Höhepunkte der Reise durften wir schon ganz am Anfang geniessen: Die lange Fährfahrt über die Ostsee eignete sich hervorragend, um Abstand vom Schul- und Packstress zu nehmen, im Fahrtwind an der Reling miteinander zu diskutieren, den Kopf zu lüften und letzte Fragen zu den Projekten zu klären. Trotz der einen oder anderen schlaflosen Nacht kamen wir so unüblich ausgeruht in Rajala an.

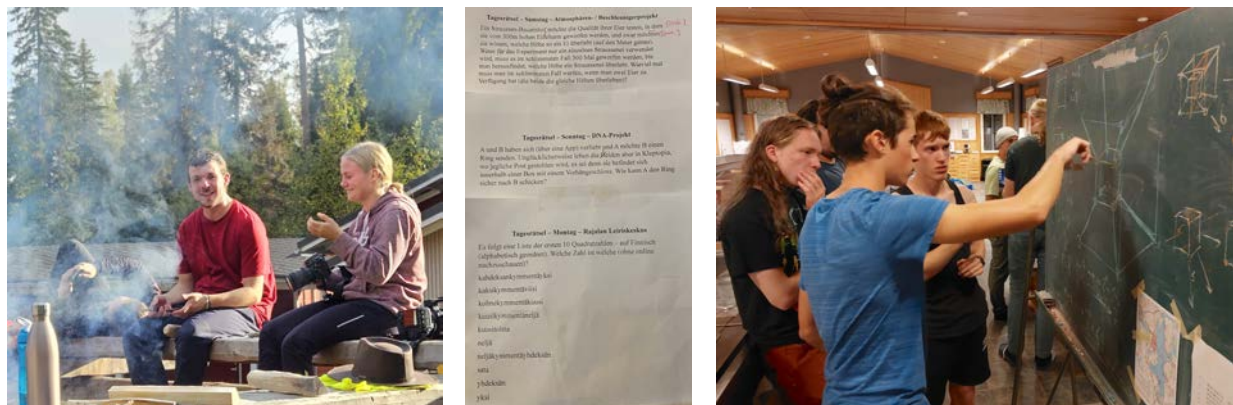


Abb. 9: Die grosse Feuerstelle im Zentrum des Camps wurde schnell zu einem beliebten Treffpunkt (links). Die mathematischen Tagesrätsel (Mitte) von Raphael Appenzeller haben eine lange Tradition in der **academia** und führen regelmässig zu intensiven Diskussionen (rechts).

Die Erkundung des Camps lieferte schnell interessante Gegebenheiten: Gute Bedingungen, viel Platz, eine klassische Freiluft-Holzofen-Sauna, Seeanstoss mit zwei undichten (aber reparierbaren) Ruderbooten, eine grosse zentrale Feuerstelle - also ein Ort, an dem es sich für 10 Tage gut leben lässt. So gestalteten sich die «normalen» Arbeitstage dann oft mit Rücksicht auf diese Umstände. Generell wurde früh aufgestanden zu einem gemeinsamen Zmorge. Danach widmeten sich die Gruppen ihren Projekten, entweder via eines Auto-Shuttles in der weiteren Umgebung, oder zu Fuss in den umgebenden Wäldern.

Vor dem Lager wurden wir darauf aufmerksam gemacht, dass es in den finnischen Wäldern von Hirschlausfliegen wimmeln dürfte. Das ist ein ungefähr fliegengrosser Parasit, der auch Menschen anfliegt, dann seine Flügel abwirft und sich ziemlich wendig zwischen Kleiderschichten und Haut einnistet. Nach einer Phase der Unsicherheit stellte sich dann heraus, dass die Insekten tatsächlich nur lästig sind - trotzdem wurde die obligate «Entlausung» vor dem Betreten der Unterkunft zu einem fixen Programmpunkt im Tagesablauf.

Abgesehen von dieser Plage konnten wir uns während der ganzen Zeit auf optimale Wetterbedingungen verlassen, es regnete kaum, und wenn, dann nur nachts, so dass die Feldarbeiten jederzeit problemlos durchgeführt werden konnten. Eine gelegentliche Bootstour auf dem See, für die härteren auch mal eine Runde Schwimmen, und natürlich ausgiebige Saunabesuche und Lagerfeuerrunden gehörten zu den Auflockerungen im Forschungsalltag. Auch die abendlichen Spielrunden wurden nicht vernachlässigt, das frühe Eindunkeln im hohen Norden trug wesentlich dazu bei.



Abb. 10: Worte sind nicht nötig - das leibliche Wohl kommt definitiv nicht zu kurz auf einer **academia**-Expedition!

Mit Jonas Vergés, Helena Aebersold und Nicolà Gantenbein hatten wir eine sehr erfahrene Küchencrew, die zusammen mit den jeweiligen Kochteams und vielen spontanen freiwilligen Helfern kreative und schmackhafte Mahlzeiten auf die Tische zauberten. Das Essen in den **academia**-Lagern erreicht gefährlichen Kultstatus und ist definitiv einer von vielen sehr guten Gründen, an einer **academia**-Expedition teilzunehmen. Als Nebenbeschäftigung kümmerte sich die Küchencrew um die Reparatur der Autos, die leider öfters als erwartet von platten Reifen heimgesucht wurden. Böse Zungen behaupten, das Phänomen habe eine mögliche Verbindung mit dem Fahrstil gewisser Crewmitglieder.

Im Laufe der Woche nutzten wir zwei Gelegenheiten zu Exkursionen, die durch Markus Held und Leena Koivunen organisiert wurden. Am Freitag der ersten Woche besuchten wir unter der Leitung von Leena Löf den Nationalpark Seitseminen. Leena führte uns auf zwei kurzen Rundgängen in die typische Ökologie der Moorlandschaften ein. Nach vielen interessierten Fragen und einem Picknick mit Kaffee vom Holzfeuer überraschte uns Leena einen Tag später im Lagerhaus mit einem Kontingent Sanddorn- und Moltebeeren aus ihrem Kühlschrank, damit wir trotz der verpassten Fruchzeit doch noch diese nordische Spezialität probieren konnten.

Die zweite Exkursion führte uns ins Waldforschungszentrum Hyytiälä, wo uns Ilona Ylivinkka und Juho Aalto von ihren Forschungen berichteten. Sie führten uns unkompliziert durch die Messstation, auf den 50 m hohen Messurmast und durch die Waldvermessungsanlagen, und standen uns anschliessend so lange für Fragen und Diskussionen zur Verfügung, bis der lokale Carfahrer ungeduldig wurde und der Sache ein Ende bereite.



Abb. 11: Im Naturpark Seitseminen macht uns die Naturführerin Leena Löf auf spannende Details im Moor aufmerksam.



Abb. 12: Auf der Exkursion ins Waldforschungszentrum Hyytiälä konnten der Messraum (links) und einer der Messtürme (Mitte) besucht werden. In der Aussenforschungsanlage beantwortete Juho Aalto geduldig unsere vielen Fragen (rechts).

Nach einhelliger Meinung war das eine der besten Exkursionen der **academia** in den letzten Jahren, weil wir endlich wieder einmal direkt mit Forschern diskutieren konnten, die sich für uns Zeit nahmen und unsere Fragen auf hohem Niveau zu beantworten wussten. Das war - unterstützt von Juhos sympathischen «rallienglanti» - sicher einer der Höhepunkte dieser Finnland-Reise.

Die 10 Tage in Rajala vergingen leider wie im Flug, vieles blieb unerledigt und unausprobiert. Kaum hatten wir uns richtig eingelebt, musste das ganze Forschungslabor wieder abgebaut, gereinigt und transportfähig verpackt werden. Zusammen mit der erheblichen Menge an Probenmaterial sollte das letztlich alles wieder in den Car passen - eine Aufgabe für unsere Spezialisten im RAKO-Kisten-Tetris. Mit Wehmut verabschiedeten wir uns vom Camp in Rajala, die Schönheit der nordischen Wälder hat uns alle gepackt. So würde es nicht überraschen, wenn der eine oder die andere gelegentlich in dieses wunderschöne Land zurückkehrt.



Abb. 13: Das Einpacken des Forschungslabors ist eine jeweils mehrstündige Marathon-Aktion (links), die erst abgeschlossen ist, wenn die Kisten fein säuberlich im Car verstaut sind (rechts: ein kleiner Teil des technischen Materials in der Ladebucht).

Dank

Bei einer Expedition in ein unbekanntes Gebiet ist Hilfe vor Ort extrem wichtig. In Finnland konnten wir quasi in letzter Sekunde einen Kontakt finden, der sich als extrem hilfreich herausgestellt hat. Das Trio bestehend aus der in Wattwil wohnhaften Anna Murtomaa und ihren bei Tampere lebenden Freunden Leena Koivunen und Markus Held hat uns buchstäblich alle Türen geöffnet, sei es bei den unvermeidlichen Fragen vor und während der Reise, vor allem aber auch durch die Organisation der beiden tollen Exkursionen und dem Projekttag zur Erfassung des Tiefenprofils auf dem See Näsiselkä. Für diese riesige Unterstützung und für die interessanten Diskussionen in Finnland und über Mail respektive Whatsapp möchten wir ihnen sehr herzlich danken! Ein ebenso herzlicher Dank geht an unseren Reiseleiter und Chauffeur Stefan Bauer, der uns auf die tolle Idee gebracht hat, die 40 Stunden Carfahrt durch die weitaus angenehmere und interessantere Fährfahrt zu ersetzen. Er hat uns sicher beide Wege chauffiert und musste dabei die Strecke zwischen Helsinki und Rajala zumindest einmal bei üblem Wetter mit dem Motorrad zurücklegen.

Spezielle Projekte bringen in der Regel auch einen sehr hohen Aufwand mit sich, und zwar sowohl was die Arbeit, als auch die Finanzen betrifft. Deshalb möchten wir uns bei sehr vielen Menschen und Institutionen bedanken, die diese Finnland-Expedition erst ermöglicht haben. An erster Stelle gebührt der Dank der Schulleitung der Kanti Wattwil, die uns dieses Projekt bewilligt hat, obwohl wir dadurch den Schulbetrieb in der Sonderwoche empfindlich gestört haben. Zusätzlich durften wir mit dem Segen der Schulleitung ein weiteres Jahr die Räume und Geräte der Kanti nutzen, und auch finanziell ist die Unterstützung durch die Kanti Wattwil für uns sehr wesentlich. Ein grosser Dank geht auch an die vielen treuen Sponsoren, die uns jedes Jahr das Vertrauen entgegenbringen, ihre Beiträge sinn- und verantwortungsvoll zu nutzen (vgl. S. 13-14).

Kaum hoch genug einschätzen kann man die Unterstützung unserer Assistententeams der Naturwissenschaften: Wenn man die Arbeitsstunden von Christian Bircher, Rosaria Caruso, Felicia Regehr und Monica Marchetti zusammenzählen würde, die sie für die **academia** aufwenden, dann gäbe es vermutlich die eine oder andere Überraschung. Wir sind uns dieser Belastung sehr bewusst, und danken ganz herzlich für die vielen Routinearbeiten, vor allem aber für die unzähligen intelligenten und kreativen Gedanken, Vorschläge, Ideen

und Umsetzungen, die unsere Projekte durchs Jahr tragen. Ohne dieses kritische Mitdenken wären wir kaum so erfolgreich unterwegs.

Auch im Lehrerteam haben wir erfreulicherweise viel fachlichen Support. In diesem Projektjahr nutzten wir vor allem die Unterstützung von Adrian Blatter bei den vielen geologischen Fragen und der Analyse der Gesteinsdünnschliffe, und Daniel Erni stand uns bei der Einführung und bei Problemen rund ums Radioteleskop zur Verfügung. Im Rahmen des DNA-Projektes konnten wir uns auch dieses Jahr auf den fachlichen Rat und die tatkräftige Unterstützung von Gaby Zimmermann verlassen. Für diese kollegiale Hilfe danken wir herzlich.



Abb. 14: Um Gesteinsproben (links) zu einer Fluxpille zu verarbeiten (Mitte), braucht es professionelle Apparaturen, die wir im Institut für Geochemie und Petrologie der ETH Zürich nutzen durften. An der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW in Wädenswil konnte die Projektgruppe Pilze ihre Proben am Gaschromatographen mit gekoppelter Massenspektrometrie (GC-MS) vermessen (rechts).

Ausserhalb der Kanti Wattwil konnten wir erneut auf die langjährige Unterstützung verschiedener Fachinstitute vertrauen. Einmal mehr durften wir eine grössere Menge Proben am Institut für Biogeochemie und Schadstoffdynamik an der ETH Zürich vermessen, und die aufwändigen Headspace-GC-MS-Messungen konnten an der Fachstelle Analytische Chemie der ZHAW in Wädenswil durchgeführt werden. Schliesslich belagerten wir das Institut für Geochemie und Petrologie an der ETH Zürich, wo wir die Gesteinsproben mahlen, zu Pillen giessen und vermessen durften, und zugleich trotz überlastetem Betrieb eine grössere Menge Dünnschliffe in Auftrag geben konnten. Das einzige Schmiermittel für diese wichtigen Kontakte sind selbstgebackene Kuchen - wir danken all diesen Instituten sehr herzlich für die Offenheit für unsere Anliegen!

Im Speziellen danken wir:

- Kurt Barmettler (Institut für Biogeochemie und Schadstoffdynamik, ETH Zürich): Analyse der XRF-Presspillen;
- Dr. Susanne Kern und Alexander Mistretta (Fachgruppe Umweltanalytik, ZHAW Wädenswil): Bewilligung des Zugangs zu diversen Messgeräten und Betreuung der GC-MS Analysen;
- Lydia Zehnder, Andreas Jallas und Romain Alosius (Institut für Geochemie und Petrologie, ETH Zürich): Bewilligung und Unterstützung der Laborarbeiten, Vermessen der XRF-Fluxpillen, Sägen der Gesteinsproben und Anfertigung der Gesteins-Dünnschliffe;
- Saga Jenniina und Arja Vailaho (in Finnland): Zugang zum Steinbruch Viitaniemi und zum Gesteinsmuseum in Eräjärvi;
- Benoit Kunz (Assistent Fachschaft Biologie, Kanti Wil): Materialausleihe und Beratung beim Projekt DNA.

Eine Expedition mit vielen Leuten in ein Gebiet, das relativ weit weg von der Zivilisation liegt, stellt auch höhere Anforderungen an die medizinische Absicherung. Wir danken daher Corinne Eicher herzlich, dass sie sich als ausgebildete Ärztin bereit erklärte, die medizinische Verantwortung für die Reise zu übernehmen und die Lagerapotheke zusammenzustellen und zu organisieren.

Aber was wäre ein Projekt dieser Grössenordnung ohne die fantastische Stimmung in der **academia** selber? Wer nie ein Projekt geleitet hat, kann sich schlecht vorstellen, wie viel Detailarbeit hinter den Kulissen gemacht werden muss. In der Planungsphase sind es langwierige Organisations- und Rechercheaufträge. Die neu eingetretenen Mitglieder wissen noch nicht so recht, was zu tun ist, die älteren und die Projektleiter versuchen ihre Ideen zu kanalisieren, alle mit ins Boot zu holen, Interesse zu wecken und Machbares von Utopischem zu trennen. Viel zu schnell steht man irgendwo in Finnland im Feld, wo die gute Laune an vielen Details scheitern könnte - Misserfolg, schlechtes Wetter, lange Arbeitstage, Hirschlausfliegen, Planungsfehler, Müdigkeit - und kaum zurück in der Schweiz folgen aufwändige Laborarbeiten, Auswertungen und dann das ewige Schreiben des Berichtes mit allen Korrekturrunden. Niemand hat je behauptet, Naturwissenschaft sei eine leichte Kost - aber dass unsere Mitglieder und Projektleiter Jahr für Jahr wieder in diesen Zyklus einsteigen, hat viel mit der **academia** selbst zu tun: Es ist einfach eine tolle Gruppe. Der Zusammenhalt und das gemeinsame Lachen auch in den weniger angenehmen Situationen schweisst zusammen. Der grösste Dank geht also an die Menschen der **academia**!

Mit dem vorliegenden Jahresbericht lassen wir Sie an unseren Resultaten teilhaben und hoffen, dass Sie sich von den Resultaten unserer Forschung faszinieren lassen und unsere Begeisterung für die naturwissenschaftliche Forschung miterleben.

i. V. **academia**

Rolf Heeb



im Februar 2024



Abb. 15: Das Projektteam 2023 im Camp Rajalan Leirikeskus.

Tagesprogramm Studienreise Rajala (SF)

Sa	23.9.	Reise Wattwil-Travemünde
So	24.9.	Fährfahrt Travemünde-Helsinki
Mo	25.9.	Ankunft in Rajala, Organisation Expeditionslager
Di	26.9.	Projekttag
Mi	27.9.	Projekttag
Do	28.9.	Projekttag
Fr	29.9.	Exkursion Nationalpark Seitseminen
Sa	30.9.	Projekttag
So	1.10.	Projekttag
Mo	2.10.	Projekttag
Di	3.10.	Exkursion Waldforschungszentrum Hyytiälä
Mi	4.10.	letzte Projektarbeiten, Packen und Aufräumen
Do	5.10.	Reise Rajala-Helsinki, Beginn Fährfahrt
Fr	6.10.	Fährfahrt Helsinki-Travemünde
Sa	7.10.	Rückreise Travemünde-Wattwil

Inhaltsverzeichnis (Projektberichte)

Hydrologie in der finnischen Region Pirkanmaa	Anne Sophie Colruyt, Matthias Jost, Arina Sprecher, Aline Zahner
Geologie im Zentralfinnischen Granitoid-Komplex	Sophia Erni, Ronja Hüppi, Cedric Palme, Jara Zahner
Die Flechtendiversität in der Umgebung von Rajala, Finnland	Thomas Albrecht, Gian Flurin Gantenbein, Madlaina Gantenbein, Fiona Gubelmann, Jonas Jaskolski, Yannik Lützen
Duftanalyse von Pilzen	Selma Dellenbach, Sarah Heusser, Lars Hüppi, Fiona Jäger, Benigno Rossi, Nico Schulthess
Zoologische Studien in der Region Rajala	Marileen Colruyt, Andreas Heeb, Jorin Haller, Jari Meier, Cora Oppliger, Michael Strässle
Analyse der Chloroplasten-DNA verschiedener finnischer Pflanzenarten	Ramona Ackermann, Raphael Appenzeller, Jasmin Jauch, Sara Looser
Stimulusverarbeitung und Erinnerung während des Wach-Schlaf-Übergangs	Corinne Eicher, Salome Haller, Lukas Keller, Louis Klosterkamp, Nils Lüthi, Pascal Schmuki
Streu- und Zerfallsmodellierung von Myonen	Nuria Gaudenz, Ramon Kuster, Jakob Mostert, Josia Peier, Tamara Zahner
Wasserstoffvorkommen im All	Benedikt Baumgarten, Gian-Luca Fäh, Urs Grob, Hendrik Roos, László Rubóczki

Wir danken unseren Sponsoren!

Die Mitglieder der Jugendforschungsgruppe **academia** danken ganz herzlich für die grosszügige Unterstützung der Studienreise 2023 nach Rajala (SF). Wir freuen uns über das Vertrauen, welches die Sponsoren uns entgegenbringen!



Lions Club Linth

Lions Clubs International ist eine weltweite Gemeinschaft von Frauen und Männern, die freiwillig und durch persönlichen Einsatz Menschen helfen. Als grösste von der UNO anerkannte Nicht-Regierungsorganisation (NGO) bieten wir ein politisch und konfessionell neutrales Forum für offene Diskussionen und die Pflege der Freundschaft. Heute umfasst die Lions-Gemeinschaft rund 1,35 Millionen Menschen aus 200 Ländern. Derzeit sind in der Schweiz und Liechtenstein gegen 9'000 Mitglieder in 230 Clubs aktiv.

«We serve – wir dienen» Unter diesem Motto helfen wir Lions dort, wo Mitmenschen nicht mehr weiter kommen. Mit unserem Knowhow, tatkräftigem Arbeiten in unserer Freizeit, sowie dem Sammeln von finanziellen Mitteln unterstützen wir konkrete Projekte in der Schweiz und im Ausland. Wir engagieren uns durch unsere Activities für benachteiligte Menschen, Menschen in Not, die freie Entfaltung der Jugend, soziale und kulturelle Projekte, die positive Entwicklung der Gesellschaft und die Völkerverständigung.

Gleich zwei Sektionen unterstützen uns dieses Jahr:

- linth.lionsclub.ch/de/
- oberestoggenburg.lionsclub.ch/de/



Lions Club Oberes Toggenburg

RAIFFEISEN

Raiffeisenbank Mittleres Toggenburg

Nachhaltigkeit und Wertschöpfung, kombiniert mit genossenschaftlicher Mitbestimmung - das ist Raiffeisen. Dank dieser Kombination geniesst Raiffeisen das Vertrauen der Genossenschafter, der Kunden und der Bevölkerung. Die genossenschaftliche Unternehmensphilosophie steht seit jeher für Nachhaltigkeit. Diese Geschäftsphilosophie und die Kundennähe haben sich in der über 120-jährigen Firmengeschichte bewährt. So konnte die Raiffeisengruppe zur drittgrössten Bankengruppe in der Schweiz avancieren. Professionalität, Kundennähe, Sympathie und Vertrauenswürdigkeit sind das Rezept zum Erfolg der Raiffeisenbanken. Mit YoungMemberPlus haben die Raiffeisenbanken ein Segment im Angebot, welches speziell auf die Bedürfnisse der Jugendlichen zugeschnitten ist.

www.raiffeisen.ch/mittleres-toggenburg

MERCK

WIR SIND MERCK

Unser Anspruch: Fortschritt für Menschen überall. Deshalb schauen wir genauer hin, fragen nach und denken weiter. Uns gibt es seit 350 Jahren. Noch heute sind wir mehrheitlich im Besitz der Nachkommen von Friedrich Jacob Merck – dem Mann, der das Unternehmen 1668 in Darmstadt gegründet hat. Seitdem haben wir uns zu einem globalen Unternehmen entwickelt. Mit rund 50.000 Mitarbeitern in 66 Ländern arbeiten wir an bahnbrechenden Lösungen und Technologien. 2016 haben wir insgesamt zwei Milliarden Euro in Forschung und Entwicklung investiert. Wir sind Merck. Einzige Ausnahmen sind die USA und Kanada. Hier sind wir im Biopharma-Geschäft als EMD Serono, im Life-Science-Geschäft als MilliporeSigma und im Geschäft mit Spezialchemikalien und Hightech-Materialien als EMD Performance Materials tätig.

www.merckgroup.com

Microsynth

THE SWISS DNA COMPANY

Microsynth ist ein führendes Unternehmen in Europa, das sich auf die Synthese und Analyse von Nukleinsäuren spezialisiert hat. Wir sind stolz darauf, Ihnen unsere Hauptbereiche vorzustellen, die die Synthese von Oligonukleotiden, die Analyse von DNA/RNA und die Sequenzierung sowie Auftragsforschung und Outsourcing umfassen. Seit über drei Jahrzehnten ist es unser Ziel bei Microsynth, unseren Kunden Produkte und Dienstleistungen von höchster Qualität termingerecht zur Verfügung zu stellen. Dabei bieten wir einen herausragenden Service zu wettbewerbsfähigen Preisen.

Unser Team besteht aus über 100 hochqualifizierten Mitarbeitern, die sich mit viel Engagement dafür einsetzen, die Bedürfnisse unserer Kunden in der Nukleinsäureforschung zu erfüllen und innovative Lösungen bereitzustellen.

www.microsynth.com



Steidle Consulting – Ihr Partner für die Bearbeitung von Problemen in den Bereichen Abwasser, Abfall, Belastungen, Altlasten. Umfassende Kenntnisse aus der langjährigen Auseinandersetzung mit unterschiedlichsten Fragestellungen aus dem Umweltbereich sowie ein gut ausgebautes Netzwerk sind die Grundlagen für eine effiziente Problemlösung. Weitere Informationen finden Sie unter:
www.steidleconsult.ch

Dir. Hermann Naef Stiftung

Die Direktor Hermann Naef-Stiftung hat den Stiftungszweck, Lehrkräfte der Kantonsschule Wattwil in ihrem Wirken für die Kanti und ihre Schülerschaft finanziell zu unterstützen, sofern die Auslagen nicht durch den Kanton bezahlt werden. Die Unterstützung der Jugendforschungsgruppe **academia** passt gut zum Stiftungszweck, da sowohl angeschaffte Gerätschaften, als auch die erworbenen Kenntnisse und Ausbildungsschritte aller Beteiligten nachhaltig sind und der Kantonsschule Wattwil auch längerfristig zu Gute kommen.



Der Kantonsschulverein Toggenburg-Linth hat sich die Förderung der Kantonsschule Wattwil zum Ziel gesetzt. Der Verein bietet ein Netzwerk zwischen der Schule, der Öffentlichkeit sowie den ehemaligen Schülerinnen und Schülern der Kantonsschule. Viele Mitglieder sind Ehemalige der Kantonsschule Wattwil. Sie haben somit die Möglichkeit Kontakte viele Jahre über die gemeinsame Schulzeit hinaus zu pflegen. Der Kantonsschulverein unterstützt verschiedene Organisationen und Projekte von Schülerinnen und Schülern. Somit leistet er einen wichtigen Beitrag zur Förderung der Jugendlichen.
www.ksvtl.ch

Hydrologie in der finnischen Region Pirkanmaa

Anne Sophie Colruyt, Matthias Jost, Arina Sprecher, Aline Zahner

1. Einleitung

Finnland wird als Land der 1000 Seen bezeichnet. Die tatsächliche Anzahl der Seen wird auf über 150 000 geschätzt. Die Seen entstanden vor mehreren Jahrtausenden als Folge der Eiszeiten. Dabei füllten sich Senken und Gletscherbecken mit dem Wasser der schmelzenden Gletscher. Deswegen hat es viele kleine Seen auf engem Raum. Eine weitere Eigenschaft der Seen ist ihr geringer Tiefgang. Meist fallen die Ufer zwar steil ab, viele der Seen erreichen aber kaum mehr als 5 m Tiefe. Die untersuchte Umgebung ist geprägt von sauren Böden mit vielen Moorlandschaften und borealen Wäldern [1]. Zudem ist die Region für europäische Verhältnisse sehr dünn besiedelt, trotzdem wird vergleichsweise viel Wald forstwirtschaftlich genutzt.

Im diesjährigen Hydrologieprojekt der **academia** ging es um den Vergleich von Seen und deren Zuflüsse in der finnischen Region Pirkanmaa. Gemessen wurden die elektrische Leitfähigkeit, der Sauerstoffgehalt, der pH-Wert sowie der Gehalt an einzelnen Ionen in den verschiedenen Seen. Zusätzlich wurde die Zusammensetzung der Gewässerböden untersucht, um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen den verschiedenen Bestandteilen des Bodens und dem Ionengehalt im Seewasser besteht. Zuletzt wurde an einem der grössten Seen der Region, Näsiselkä genannt, ein Tiefenprofil bis in eine Tiefe von 35 m erstellt. Dies ist besonders interessant, da im Rahmen der **academia** bisher grösstenteils Schweizer Seen untersucht wurden, und durch das diesjährige Projekt das bisher nördlichste Tiefenprofil gemessen werden konnte.



Abb. 1: Foto eines typischen Gewässers in der Region Pirkanmaa. Im Vergleich zu anderen untersuchten gehört der See Sydänlammit zu den grösseren.

2. Theorie

2.1. Standorte

Das Untersuchungsgebiet befindet sich rund um das Lagerhaus in Rajala, westlich der Kleinstadt Kuru in Südfinnland (vgl. Abb. 2). Die Landschaft ist, wie fast ganz Süd- und Mittelfinnland, geprägt durch die unzähligen Seen, die vielen Wälder sowie die zahlreichen Feuchtgebiete. Letztere sind vor allem rund um die Seen zu finden und bilden oft einen fließenden Übergang zu den Gewässern. Die moorige Landschaft führt

zur Annahme, dass das Wasser durch die umgebende Vegetation sehr sauer ist. Bei der visuellen Betrachtung fällt auf, dass das Wasser eine rötliche bis bräunliche Färbung aufweist. Trotzdem gilt es als überdurchschnittlich sauber. Obwohl in Finnland etwa 10 % der Landesfläche von Wasser bedeckt sind, sind die Seen verhältnismässig klein. Die durchschnittliche Grösse beträgt 18 km^2 , was etwa einem Fünftel der Fläche des Zürichsees entspricht. Die meisten grösseren Seen besitzen zudem kleine Inseln. Eine weitere typische Eigenheit der Region ist die dünne Besiedlung. Nur an wenigen der untersuchten Seen stehen einzelne, einfache Häuser an den Ufern, viele Ufer sind jedoch gänzlich unbebaut [2].



Abb. 2: Lage der untersuchten Seen in der Region Pirkanmaa [2].

2.2. Aufbau eines Sees und Tiefenprofil

Im Laufe eines Jahres verändert sich die Temperatur und Dichte des Seewassers immer wieder, sodass interessante Zirkulationen und Temperaturschichtungen entstehen. Das Ziel eines Tiefenprofils ist es, die Sprungschicht (Metalimnion) zu orten. Das Metalimnion ist die Schicht zwischen dem sich erwärmenden Oberflächenwasser (Epilimnion) und dem 4°C kalten Tiefenwasser (Hypolimnion). Das Metalimnion ist in vielen Gewässern zwischen Sommer und Herbst vorhanden und seine Tiefe kann sich aufgrund der sich wechselnden Temperatur- und somit Dichteverhältnisse im Laufe des Jahres verschieben [3]. Wasser hat die Eigenschaft, seine grösste Dichte bei 4°C zu haben. Das wird Dichteanomalie des Wassers genannt und hat zur Folge, dass sich das 4°C kalte, schwerere Wasser immer am Boden des Sees ansammelt. Somit ist der unterste Bereich eines Gewässers immer der letzte, der gefriert. Das ermöglicht es vielen Seebewohnern, den Winter zu überleben. Die Temperatur der Wasserschichten an der Oberfläche wird in erster Linie von

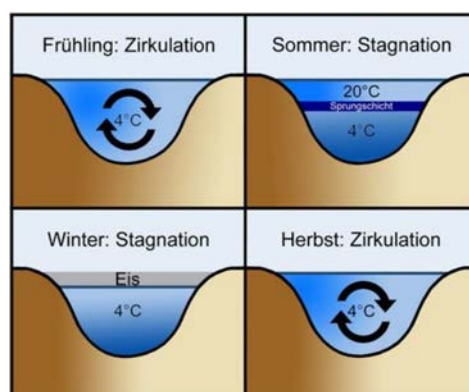


Abb. 3: Zirkulation eines dimiktischen Sees im Verlauf eines Jahres [4].

externen Grössen bestimmt wie der Lufttemperatur, der Temperatur des Zuflusswassers und der Sonneneinstrahlung. Somit schwankt die Temperatur im Verlauf eines Jahres. Im Sommer ist der obere Teil eines Gewässers wärmer, im Winter kälter als der untere Teil. Im Bereich der Sprungschicht verändert sich die Temperatur abhängig von der Wassertiefe abrupt. Der ganze Prozess ist in Abb. 3 graphisch dargestellt.

Während einer Vollzirkulation ist der ganze See ungefähr gleich kalt, nämlich 4 °C. Somit kann während dieser Zeit keine Sprungschicht gemessen werden. In zweimal jährlich vollzirkulierenden (dimiktischen) Seen wird eine Frühlingszirkulation und eine Herbstzirkulation erwartet. Der genaue Zeitpunkt der Zirkulation ist abhängig vom lokalen Klima, der Grösse des Gewässers und der geographischen Breite [3]. Im kalten, sich weit nördlich befindenden Finnland wird die Zirkulation tendentiell früher erwartet als in der Schweiz.

3. Methodik

3.1. Vorgehen am Probestandort

Der pH-Wert und die Leitfähigkeit jedes Gewässers wurden vor Ort mit dem Messgerät SevenGo Duo (Mettler Toledo) ermittelt. Zudem wurde mit der Sauerstoffsonde (Hach LDO) der Sauerstoffgehalt in Ufernähe gemessen. Die Messgeräte wurden jeden Morgen am ersten Probenstandort neu kalibriert. Sämtliche Messungen wurden wann immer möglich direkt im offenen Gewässer durchgeführt. War dies nicht möglich, wurde mit einem Messbecher Wasser entnommen. In PET-Flaschen, die mit destilliertem Wasser und anschliessend mit Wasser aus dem Gewässer ausgespült wurden, wurden Wasserproben gesammelt. Die Flaschen wurden so verschlossen, dass ein Luftaustausch ausgeschlossen werden konnte, damit im Wasser möglichst keine Reaktionen stattfinden konnten. Zusätzlich wurden die Wasserproben durch einen Spitzenvorsatzfilter mit 45 µm Porengrösse gefiltert und in einem Falcon-Tube gesammelt. Pro Standort wurde immer eine Doppelprobe entnommen. Die Doppelproben wurden bei 4 °C gelagert, damit kein Wachstum von Mikroorganismen stattfinden und somit verfälschte Daten entstehen konnten. Zusätzlich wurden die Proben mit Parafilm luftdicht verschlossen. An jedem Standort wurde der GPS-Punkt notiert und anschliessend in einer Karte (Abb. 4) dargestellt.

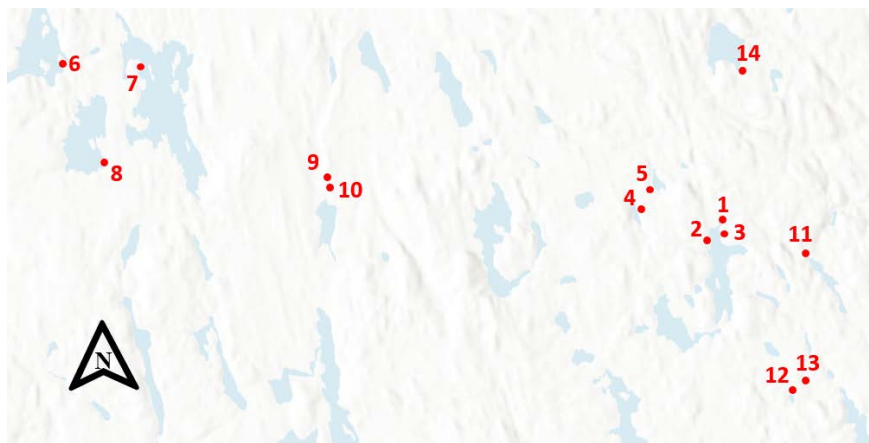


Abb. 4: Lage der unterschiedlichen Standorte rund um das Lagerhaus, welches sich nahe des Standorts 1 befindet.

3.2. Tiefenprofil

Das Ziel eines Tiefenprofils ist es, verschiedene Parameter in Abhängigkeit der Wassertiefe zu untersuchen. Diese Messungen und Probensammlungen wurden von einem Boot aus getätigt, um an eine tiefe Stelle im Gewässer zu gelangen und Proben aus möglichst vielen verschiedenen Tiefen zu entnehmen. Das Tiefenprofil wurde mithilfe der Sonde Hydrolab DS5 (Hach Company) durchgeführt, welche an einem Stahlseil bis zu 35 m tief abgesenkt wurde. Alle 2 m (ausser beim letzten Tiefenschritt von 5 m) wurde die Sonde gestoppt und die Daten abgelesen und notiert. Die Sonde misst die elektrische Leitfähigkeit, die Temperatur, den Wasserdruck, den Sauerstoffgehalt und den pH-Wert des Wassers. Die pH-Werte konnten jedoch nicht ausreichend verifiziert werden, da während der Kalibration technische Schwierigkeiten aufgetreten waren.

Ebenfalls an einem Seil aus Stahl wurde der Wasserprobenholer (vgl. Abb. 5) in verschiedenen Tiefen zur Probensammlung eingesetzt. Dabei werden zwei Kugeln mit einer Gummischnur über einem Plastiktrichter zusammengespant und anschliessend in die gewünschte Tiefe gesenkt. Durch einen kräftigen Ruck am Seil lösen sich die beiden Kugeln und verschliessen den Zylinder. Das sich im Zylinder befindende Wasser ist dadurch eingeschlossen. Anschliessend wird die Sonde inklusive der Wasserprobe an die Oberfläche befördert. Zusätzlich geben die Daten des Tiefendruckensors, welcher am Wassersammler befestigt ist, Auskunft über die Tiefe, in der die Wasserentnahme tatsächlich ausgelöst wird. Direkt nach dem Auffangen des Wassers aus den tiefer gelegenen Wasserschichten wurden die Standardparameter pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit mit dem Mettler Toledo SevenGo Duo gemessen. Die auf diese Weise im Boot gemessenen Daten wurden sowohl als Daten für die Auswertung an sich verwendet, als auch mit den Werten der Hydrolab-Sonde und der Messung an der Oberfläche verglichen.



Abb. 5: Foto des Wasserprobennehmers, mit dem Wasserproben aus bis zu 100 m Tiefe genommen werden können.

3.3. Ionenchromatographie

Die Ionenchromatographie ist ein chemisch-physikalisches Trennverfahren, bei dem die Anionen und Kationen getrennt voneinander analysiert werden. Aus wässrigen Lösungen kann die Konzentration von verschiedenen Ionen ermittelt werden. Die Wasserprobe wird dabei mit einem Eluenten durch eine sehr dünne Trennsäule gepumpt, an deren Ende die Leitfähigkeit der herausfliessenden Flüssigkeit gemessen wird. Da jede Art von Ion eine unterschiedliche Durchflusszeit (Retentionszeit) hat, verändert sich die Leitfähigkeit immer dann, wenn eine Ionenart mit dem Eluenten aus dem Röhrchen austritt. Anhand der Retentionszeit und der Fläche des Peaks in der Leitfähigkeit kann das Ion und dessen Konzentration bestimmt werden.

In dieser Analyse wurden die Anionen (negativ geladene Ionen) Fluorid (F^-), Chlorid (Cl^-), Bromid (Br^-), Phosphat (PO_4^{3-}), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-}), sowie die Kationen (positiv geladene Ionen) Lithium (Li^+), Natrium (Na^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Magnesium (Mg^{2+}) und Calcium (Ca^{2+}) gemessen. Im Lagerhaus wurden der Kationen- und Anionen-Chromatograph eingerichtet und vor Beginn der Analyse mittels Dreipunktekalibration kalibriert. Die Standardlösungen und die Wasserproben wurden in nummerierte Reagenzgläser umgefüllt und für den Chromatographen bereitgestellt. Von jeder Probe wurden die Anionen und Kationen analysiert. Die erhaltenen Daten wurden im System für eine spätere Auswertung gespeichert.

3.4. Titration

Der Gehalt an Bicarbonat (HCO_3^-) der Doppelproben wurde im Lagerhaus gemessen. Hierzu wurden pro Probe zwei Durchgänge von je 100 mL titriert. Dazu werden einige Tropfen Cooper-Indikator zum Wasser hinzugegeben und mit einem Mettler-Toledo (SevenGo Duo) der pH-Wert gemessen. Anschliessend wird tröpfchenweise 0.01 molare Salzsäure hinzugegeben. Dies wird solange wiederholt, bis der pH-Wert auf 4.3 sinkt. Mithilfe des Indikator-Farbwechsels von blau auf gelb kann dieser Zeitpunkt besser eingeschätzt werden. Zuletzt wird die Menge an verbrauchter Salzsäure (HCl) bestimmt, und daraus kann der Gehalt an Hydrogencarbonat im Wasser errechnet werden.

Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Titration, ausgelöst durch den tiefen pH-Wert der Wasserproben und entsprechend unbrauchbaren Resultaten wird die Titration in der Auswertung dieser Untersuchung nicht weiter besprochen.

3.5. Bodenprobennahme

An den gewählten Standorten wurde etwa 1 m vom Ufer entfernt eine Probe des Seebodens genommen. Der dazu verwendete Bodenprobenehmer besteht aus einer Metallstange mit einem zylinderförmigen Ausschnitt (Abb. 6). Die sumpfigen Moore am Ufer und der rasch abfallende Untergrund verunmöglichten die Probennahme bei einigen Standorten.

Das zu untersuchende Material wurde in eine Klarsichtfolie eingepackt. Im Lagerhaus wurden die Proben zwei Tage im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Danach wurden alle Proben in luftdichte Gläser abgefüllt und mit Parafilm zusätzlich verschlossen. An der Kantonsschule Wattwil wurde das gesamte Material noch einmal für wenige Stunden bei 105 °C getrocknet. Damit konnte sicher gestellt werden, dass die Proben wasserfrei sind. Anschliessend wurden mithilfe eines 2 mm-Siebs grosse Bestandteile aussortiert und der Rest mit einem Mörser zerkleinert. Mit einer Schwingmühle (Retsch MM200) wurden 4.00 g Probe gemahlen und anschliessend mit 0.90 g Licowax zu einer Presspille verarbeitet. Diese Pillen wurden an der ETH Zürich mit Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie (XRF) vermessen.



Abb. 6: Bodenprobenehmer

3.6. Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie (XRF)

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) wird verwendet, um die Elementzusammensetzung eines Stoffes zu bestimmen. Hierbei wird die Probe mit fluoreszierender Röntgenstrahlung bestrahlt. Durch die Strahlung werden Elektronen angeregt und aus dem Atom herausgeschlagen. Nach der Abtrennung von inneren Elektronen rutschen die Elektronen der äusseren Schalen nach. Beim Nachrücken der Elektronen wird Energie freigesetzt, welche als Photon mit einer charakteristischen Wellenlänge abgestrahlt wird. Diese Wellenlänge wird gemessen, und dadurch kann definiert werden, um welches Element es sich handelt [5].

Nebst der Darstellung als Rohdaten wurden die zehn häufigsten Elemente (mehr als 0.02 %) in ihre wahrscheinlichste Verbindung umgerechnet. Für die einzelnen Elemente wurden die folgenden Verbindungen als am wahrscheinlichsten eingeschätzt: Natrium und Kalium wurden als elementar belassen, die Elemente Titan, Mangan, Aluminium, Silicium, Phosphor und Eisen wurden in die gängigen Oxide, Magnesium und Calcium in Carbonate umgerechnet. Anschliessend wurden diese Werte zusammengerechnet. Die daraus entstandenen Summen geben Aufschluss über den anorganischen Bestandteil einer Probe.

3.7. Veraschung

Damit das Verhältnis von organischem und anorganischem Material auf eine zweite Art bestimmt werden konnte, wurden die Proben verascht. Dazu wurde ein Muffelofen eingesetzt. Hierbei handelt es sich um einen Ofen, der auf über 1000 °C erhitzt werden kann. Für die Untersuchung der Bodenproben reicht jedoch eine Erhitzung auf 550 °C in zwei Durchgängen à 3 Stunden. Dabei verbrennen alle organischen Verbindungen. Das führt wiederum dazu, dass von den zuvor gemörserten Proben nur der anorganische Teil zurück bleibt. Die Differenz des Gewichts vor und nach dem Erhitzen lässt auf den Anteil organischen Materials schliessen.

4. Resultate

4.1. Tiefenprofil im Näsiselkä

4.1.1. Resultate der Hydrolab-Messungen

Wie in Abb. 7 (links) ersichtlich, liegt die Oberflächentemperatur des Seewassers des Näsiselkä knapp unter 14 °C. In den obersten 16 m variiert die Temperatur in einem Bereich von rund 0.1 °C. Danach, in einer Tiefe zwischen 16 und 25 m, sinkt die Temperatur rapide und sprunghaft auf unter 9 °C ab. Ab dort verlangsamt sich der Temperaturrückgang stark, sodass die Wassertemperatur bis zur tiefsten Messung in 35 m Tiefe auf 8.5 °C absinkt.

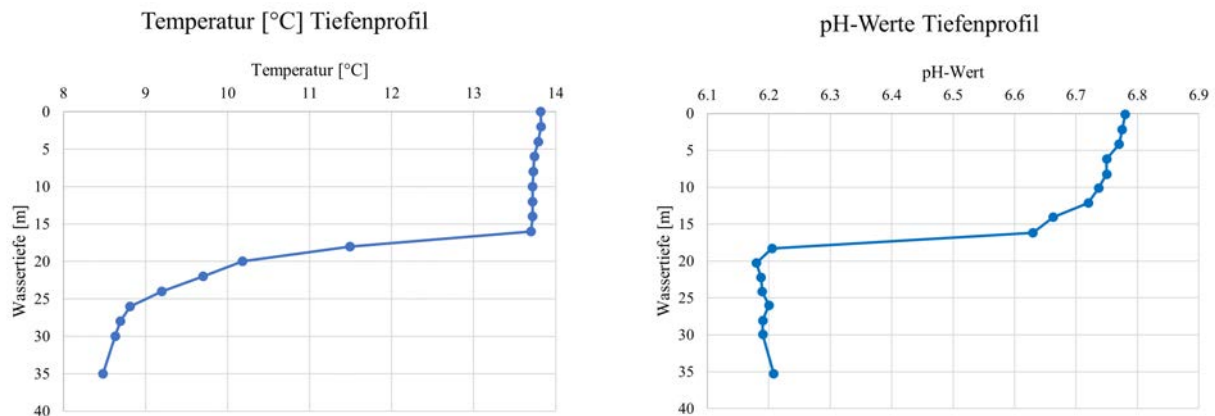


Abb. 7: Temperaturverlauf (links) und pH-Wert (rechts) des Näsiselkä abhängig von der Wassertiefe, gemessen mit der Hydrolab-Sonde am 02.10.2023.

Ähnlich verhält sich der pH-Wert, welcher in Abb. 7 (rechts) dargestellt ist. Das sprunghafte Absinken der Werte beginnt jedoch bereits in oberflächennäheren Schichten. In Oberflächennähe herrschen pH-Werte im Bereich von 6.7 bis 6.8. Ganz signifikant ist der Sprung der pH-Werte zwischen 16 und 18 m. In diesem Bereich sinkt der pH-Wert um mehr als 0.4 Einheiten. Nach diesem Sprung pendelt er sich bei 6.2 ein. Das Gewässer kann an der Wasseroberfläche als neutral bezeichnet werden, während es mit zunehmender Tiefe im leicht sauren Bereich ist.

Auch die Sauerstoffsättigung verhält sich nach dem gleichen Muster (Abb. 8). Bis in eine Tiefe von 16 m befindet sich die Sauerstoffsättigung des Wassers ziemlich konstant im Bereich um 100 %. Nach einem Sprung befindet sich die Sauerstoffsättigung von 18 m abwärts bei ungefähr 78 %. Die absolute Sauerstoffmenge verhält sich bis in 18 m Tiefe gleich wie die prozentuale. Danach steigt der absolute Gehalt an Sauerstoff wieder leicht an. Das liegt an der temperaturabhängigen Sättigungsmenge von Sauerstoff.

Aufgrund eines Messfehlers der Hydrolab wurde die elektrische Leitfähigkeit nicht korrekt gemessen.

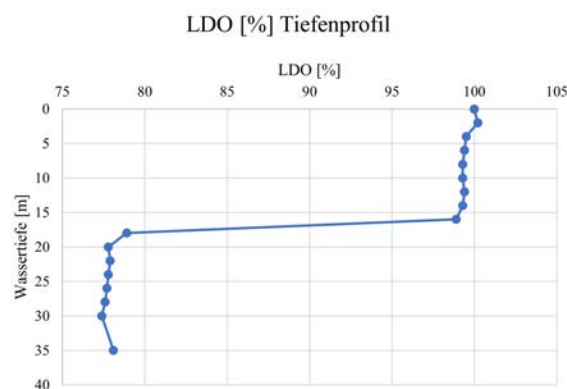


Abb. 8: Kalibrierte Werte der Sauerstoffsättigung im Näsiselkä abhängig von der Wassertiefe, gemessen mit der Hydrolab-Sonde am 02.10.2023.

4.1.2. Resultate der weiteren Messgeräte

Die auf dem Boot gemessenen Temperaturen der Wasserproben aus der entsprechenden Tiefe sinken weniger stark ab, wie in Abb. 9 ersichtlich ist. Mit der SevenGo Duo-Sonde wurde ebenfalls 14 °C an der Wasseroberfläche gemessen. Die Temperatur sinkt jedoch kontinuierlich ab und erreicht mit 12 °C eine um einiges höhere tiefste Temperatur. Die Werte welche mit der Hach-Sonde gemessen wurden verhalten sich ähnlich wie die mit dem SevenGo Duo gemessenen, nur mit einem halben Grad Celsius wärmeren Temperaturen und viel stärkeren Schwankungen.

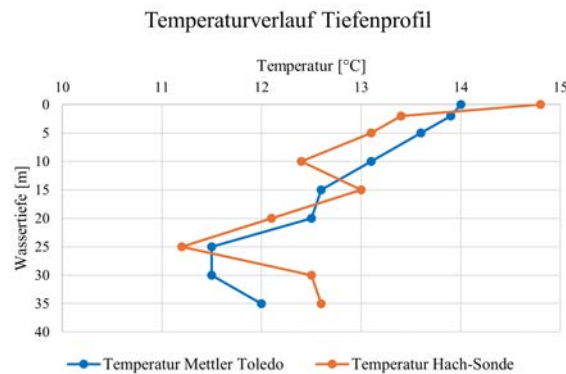


Abb. 9: Vergleich der beiden mit verschiedenen Messmethoden an Bord gemessenen Temperaturverläufe des Tiefenprofils.

Die Leitfähigkeit (Abb. 10 links) wurde mit dem Messgerät SevenGo Duo der Firma Mettler Toledo gemessen. Es sind zwei signifikante Peaks zu erkennen. In 20 m Tiefe liegt die Leitfähigkeit um 60 % höher und in 30 m Tiefe um 30 % höher als in allen anderen Bereichen. Die Leitfähigkeit ist klar tiefer als z. B. in den im Hydrologieprojekt 2021 gemessenen Schweizer Seen [6].

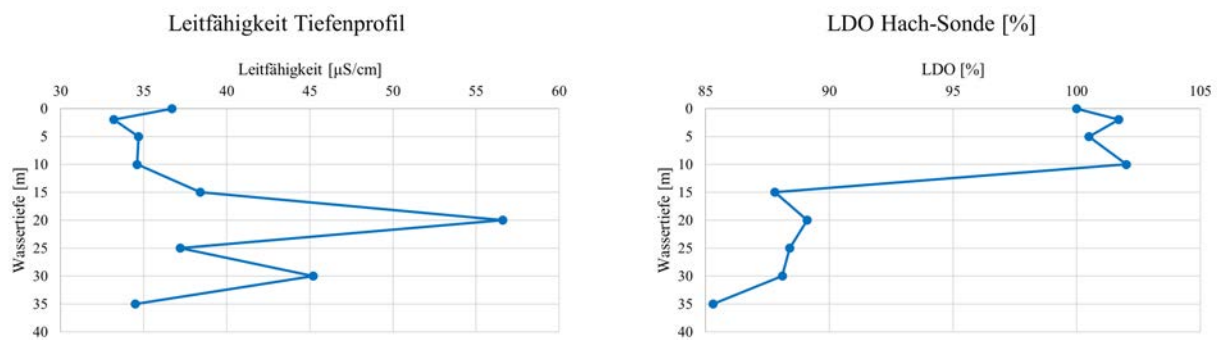


Abb. 10: Links: Resultate der elektrischen Leitfähigkeit abhängig von der Tiefe, gemessen mit dem SevenGo Duo der Firma Mettler Toledo. Rechts: Werte der Sauerstoffsättigung abhängig von der Tiefe, gemessen mit der Sonde Hach LDO.

Abgesehen von den Schwankungen verhält sich der Sauerstoffgehalt bei der Messung mit der Hach-Sonde (Abb. 10 rechts) ähnlich wie bei der Messreihe mit der Hydrolab-Sonde (Abb. 8). Die Sättigung ist in den oberflächennahen Schichten leicht über 100 %, sinkt dann jedoch früher als bei der Hydrolab-Messreihe sprunghaft ab und kommt mit rund 88 % um einiges höher zu liegen. Ebenfalls verändert sich die Konzentration bei den mit der Hach-Sonde gemessenen Messreihe nach einer Tiefe von 20 m noch signifikant. Ein Absinken der Sättigung bis auf 85 % kann beobachtet werden.

4.1.3. Ionengehalte

Natrium, Ammonium, Calcium und Magnesium zeigen alle ziemlich konstante Werte entlang des Tiefenprofils. Ammonium hat einen nur sehr kleinen Wert von ein paar Hundertstel mg/L, was ausserhalb des Kalibrationsbereichs liegt und aus diesem Grund nicht weiter beachtet wird. Magnesium variiert nur schwach

zwischen 1.3 und 1.6 mg/L. In 2 m Tiefe weist Natrium eine um etwa 0.3 mg/L höhere Konzentration auf als in den anderen Tiefen, bei denen die Konzentration zwischen 2.64 und 2.78 mg/L schwankt. Oberflächenwasser enthält am wenigsten Calcium. Dieser Wert steigt bis 6.17 mg/L an und reguliert sich auf etwa 6.00 mg/L. Kalium weist zwei auffällige Spitzenwerte auf, einer in 10 m Tiefe mit 6.19 mg/L (die höchste Konzentrationen aller Kationen-Arten), der andere in 30 m Tiefe mit 5.8 mg/L. Auch bei Kalium stammt der tiefste Messwert mit 1.06 mg/L von der Oberfläche.

Die Anionen Fluorid und Sulfat weisen auch relativ konstante Werte in allen Tiefen auf. Fluorid hat immer einen Wert von ungefähr 0.1 mg/L. Sulfat ist mit einer Konzentration zwischen 4.10 und 4.25 mg/L enthalten. Chlorid verhält sich ähnlich wie Kalium mit analogen Spitzenwerten, der erste mit 9.89 mg/L und der zweite mit 7.22 mg/L. Der tiefste Chloridwert stammt wieder von der Wasseroberfläche mit 2.8 mg/L.

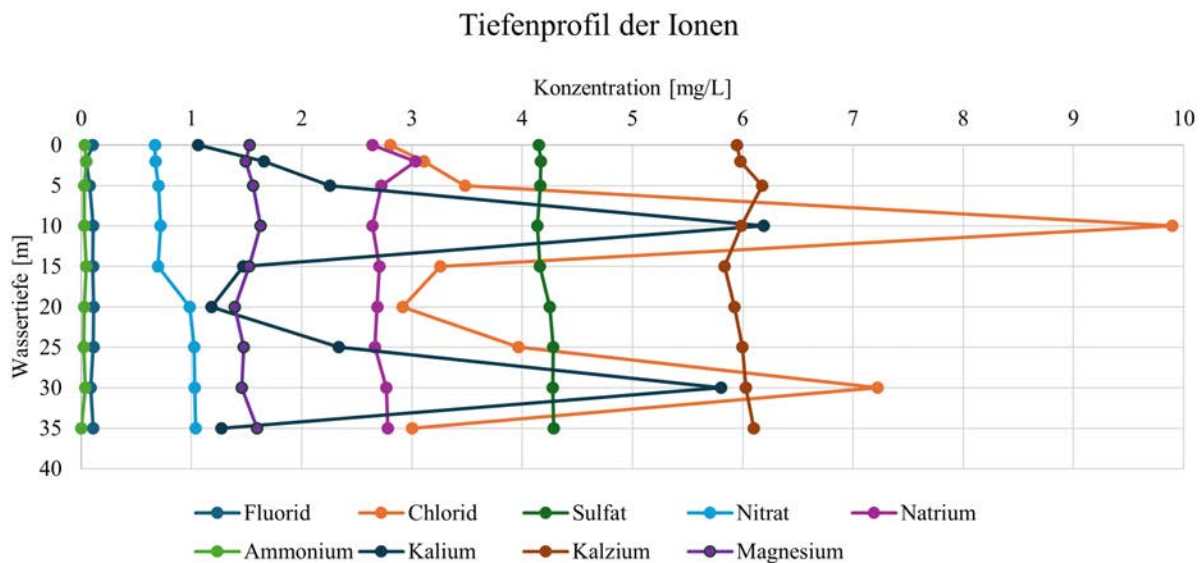


Abb. 11: Konzentrationen der Kationen und Anionen im Näsiselkä abhängig von der Wassertiefe.

4.2. Vergleich der Seen

4.2.1. Messungen vor Ort

Die pH-Werte der vermessenen Seen (Abb. 12 links) weisen mit einem durchschnittlichen Wert von 5.0 einen eher tiefen Wert auf. Mit einer Messung von gerade einmal 4.4 lag der pH-Wert bei Standort 12 am tiefsten. Somit liegt er deutlich im sauren Bereich. Der mit deutlichem Abstand höchste Wert wurde mit pH = 6.6 am Ufer des Sees 14 gemessen. Der Standort war einer der wenigen, die nicht von moorigen Böden und Vegetation geprägt waren. Ebenfalls überdurchschnittlich hohe Messwerte ergaben die Standorte 6, 7 und 8 mit pH-Werten um 6.0. Diese drei Messungen wurden an den drei westlichsten Seen genommen, welche durch Flüsse direkt miteinander verbunden waren. Alle weiteren Messungen bewegen sich zwischen einem pH-Wert von 4.5 und 5.0. Auch diese Werte befinden sich im sauren Bereich. An keinem Standort konnte ein basisches Gewässer gefunden werden. Zuletzt ist aus den Daten ersichtlich, dass diejenigen Werte, die an unterschiedlichen Standorten am gleichen Gewässer erhoben wurden, kaum voneinander abweichen. So liegen die pH-Werte der Proben 2 und 3 gerade einmal 0.02 auseinander und weisen somit eine sehr grosse Ähnlichkeit auf.

Die Leitfähigkeit liegt bei allen Seen zwischen 16 und 28 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (vgl. Abb. 12 rechts). Die höchste Leitfähigkeit wurde am See 1 gemessen, die tiefste am See 3. Während bei den pH-Messungen nur minimale Unterschiede zwischen den Standorten 1, 2 und 3 gemessen wurden, beträgt die Leitfähigkeit am Standort 1 fast das Doppelte des Werts der Standorte 2 und 3, obwohl alle drei am gleichen See liegen. Jedoch sind im allgemeinen die Werte sehr tief. Beim Vergleich mit den Werten der pH-Messungen fällt auf, dass die Standorte 6, 7 und 8 hohe pH-Werte und gleichzeitig tiefe Leitfähigkeitswerte haben. Ein solches Muster kann auch bei den anderen Standorten festgestellt werden, jedoch ist es bei diesen weniger ausgeprägt. Die

Standorte 9 und 10 haben identische Leitfähigkeiten. Diese zwei Standorte sind nur rund 10 m voneinander entfernt.

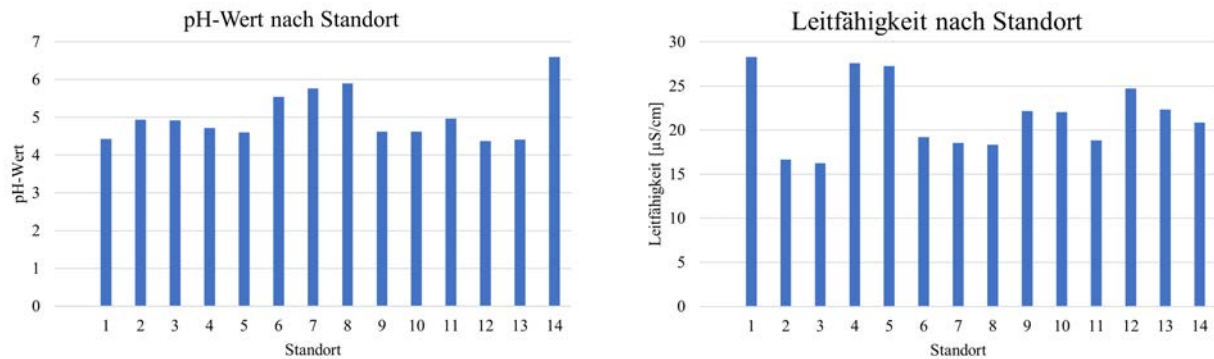


Abb. 12: Links: Alle gemessenen pH-Werte der einzelnen Seen. Rechts: Dargestellte Werte der Leitfähigkeitsmessung in µS/cm.

4.2.2. Ionengehalte

Die Resultate der Ionenkonzentrationen sind in den Abb. 13 und 14 dargestellt. Über alle Standorte hinweg weist der Standort 8 die höchste, Standort 12 die tiefste Konzentration an Kationen auf. Der Standort 8 liegt zudem in kurzer Distanz zu den Seen 6 und 7. Diese weisen vor allem hohe Kationen-Konzentrationen auf. Bei allen Standorten mit Ausnahme der Standorte 4 und 11 ist die Calciumkonzentration die höchste Kationenkonzentration. Ammonium, welches meist in Form von Dünger oder Gülle in Gewässer gelangt, hat jeweils die kleinste Konzentration. Standort 11 ist interessant, da die Kalium-, Natrium- und Chloridkonzentrationen höher sind als die des Calciums. Es ist auch der Standort, bei dem die Calciumkonzentration am geringsten ist.

Bei den Anionen hat Sulfat mehrheitlich die grösste Konzentration. Dort ist zudem auffällig, dass sich die Konzentration von Sulfat von Probe 9 zu 10 enorm erhöht. Die beiden Standorte liegen dabei nur wenige Meter auseinander an einem Bach, welcher jedoch vor dem Standort 10 mit einem weiteren Flüsschen zusammenfließt. Die Chloridkonzentrationen bewegen sich zwischen 0.6 und 1.9 mg/L. Fluoride ist in den Gewässern nur in kleinen Mengen vorhanden. Ebenfalls ist Nitrat nur in verschwindend kleinen Mengen nachgewiesen worden. Wie schon bei den Kationen ist auch die Anionen-Konzentration bei Standort 11 relativ hoch. Der Standort 5 sticht heraus, da dieser nur einen sehr kleinen Sulfat- und Fluorid-Anteil hat und einen dem Mittelwert entsprechenden Wert bei den Chloriden. Mit einem Durchschnitt von 2.77 mg/L hat Standort 14 von allen Proben deutlich den höchsten Anteil an Sulfat. Die höchsten Chlorid- und zweithöchsten Sulfat-Werte hat der Standort 11.

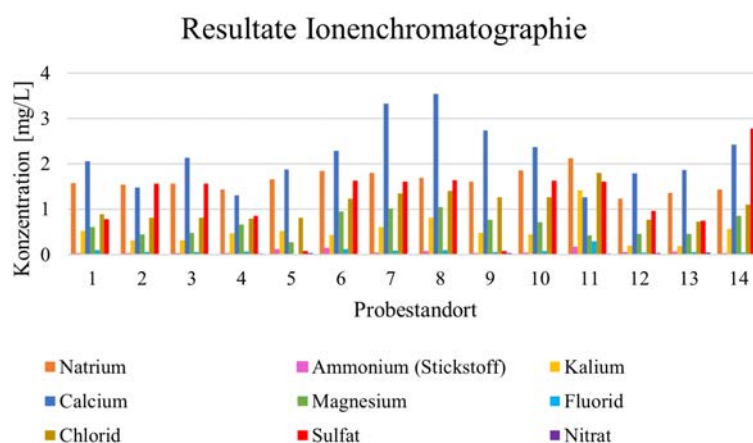


Abb. 13: Grafische Darstellung aller Ionenkonzentrationen pro Standort.

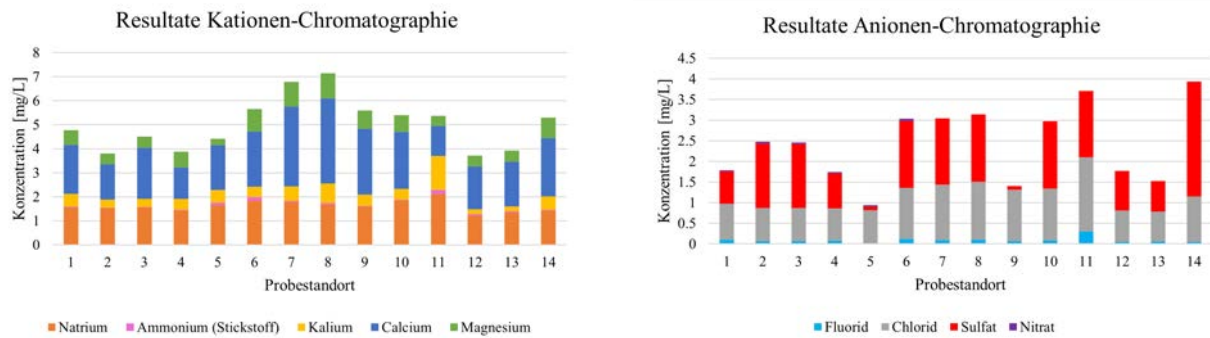


Abb. 14: Darstellung aller Kationen- (links) und Anionenkonzentrationen (rechts) pro Standort.

4.3. Elementanalyse der Bodenproben

Die in Abb. 15 dargestellten Daten zeigen die Konzentration der verschiedenen Elemente von unterschiedlichen Probestandorten. In allen Böden ist das Element Silicium mit 20 % bis 36 % am häufigsten vertreten. Je nach Probe macht es zwischen einem Fünftel und etwa einem Drittel der Probe aus. Der Höchstwert wurde in der Probe B12 gemessen. Auch das Element Aluminium ist in allen gesammelten Bodenteilen vergleichsweise hoch. Der Anteil schwankt zwischen 6 % und 9 %.

Alle anderen Elemente haben einen kleineren Massenanteil. Phosphor und Mangan sind zu einem verschwindend kleinen Anteil enthalten. Der Eisengehalt ist an den zehn Standorten sehr unterschiedlich. Bei Standort B1 und B13(2) ist er mit 0.6 % Eisen am geringsten, und Standort B7 mit 3.2 % weist den höchsten Wert auf. Die Eisenkonzentrationen aller anderen Standorte liegen dazwischen. Standort B7 fällt zusätzlich auf, weil bei diesem Standort 1.8 % Magnesium enthalten sind. Bei den anderen Standorten sind es nur zwischen 0.2 % und 0.9 %.

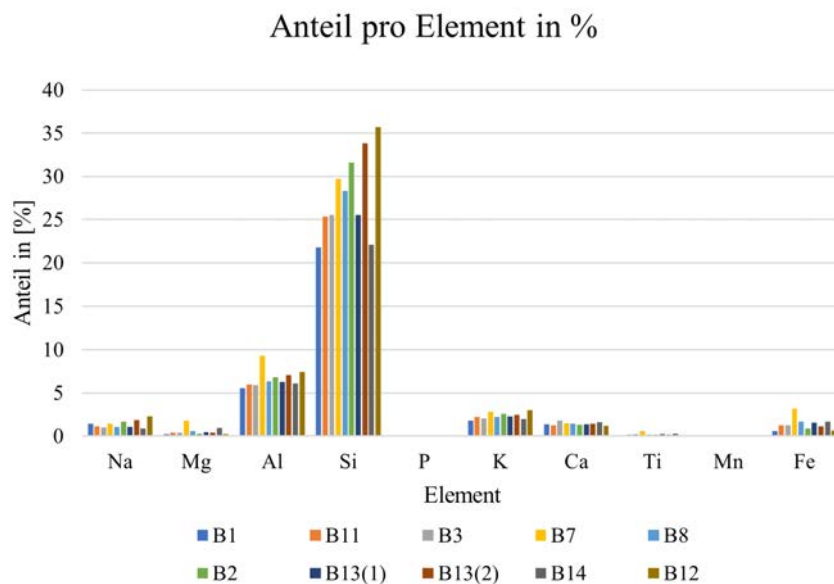


Abb. 15: Darstellung aller Elementkonzentrationen der Bodenproben in Massenprozent (%), geordnet nach Elementen.

In der Tab. 1 sind die Anteile an organischem Material in den Bodenproben aufgelistet. In der linken Spalte sind die Werte zu sehen die aus den XRF-Resultaten ermittelt wurden. Dazu wurden wie in Kap. 3.6 beschrieben die Massenanteile der zehn häufigsten Elemente zu Oxiden und Carbonaten ergänzt und von der Gesamtmasse der Probe subtrahiert, um den organischen, mit XRF nicht messbaren Anteil zu bestimmen. In der rechten Spalte sind die Massenschwunde bei der Veraschung der Proben dargestellt. Bei den XRF-Resultaten ist zu sehen, dass der organische Bestandteil zwischen –1 % und 30 % schwankt. Die tiefsten

Werte sind bei den Standorten 7 und 12 zu finden, wo sich die Werte sogar praktisch bei Null befinden. Im Vergleich dazu liegen die aus der Veraschung ermittelten Werte im Durchschnitt tiefer. Dies ist vor allem bei den Standorten B3, B8, B11 und B14 sehr ausgeprägt zu erkennen. Sind die mit dem Muffelofen gewonnenen Werte höher, so sind die Unterschiede meist sehr gering.

Standort	Anteil an organischem Material [%]	
	Massenbilanz XRF	Veraschung (Muffelofen)
B1	34.33	41.79
B2	11.24	12.35
B3	22.88	2.47
B7	-1.18	4.20
B8	16.69	1.36
B11	24.44	1.19
B12	-0.61	2.29
B13(1)	22.53	
B13(2)	2.97	3.02
B14	27.89	2.27

Tab. 1: Tabelle der organischen Bestandteile der Bodenproben, ermittelt mit zwei unterschiedliche Vorgehensweisen. Die Werte der linken Spalte stammen aus der Massenbilanz der XRF-Resultate, die Werte der rechten Spalte aus dem Massenschwund bei der Veraschung im Muffelofen.

5. Diskussion

5.1. Tiefenprofil im Näsiselkä

5.1.1. Messwerte der verschiedenen Sonden

Die auffälligen Sprünge der verschiedenen Parameter im Tiefenprofil sind alle in einer Tiefe von 16 bis 20 m aufgetreten. Deshalb kann die Sprungschicht in dieser Tiefe lokalisiert werden. Das Vorhandensein einer Sprungschicht mit höheren Temperaturwerten oberhalb der Schicht widerspricht der Annahme, dass eine Vollzirkulation bereits stattgefunden hat. Es gibt etliche mögliche Gründe, weshalb die Vollzirkulation trotz höherer geographischer Breite und relativ spätem Zeitpunkt noch nicht stattgefunden hat. Einerseits könnte es sich einfach um ein statistisches Phänomen handeln. Die Herbstzirkulation wird normalerweise durch die Abkühlung des Oberflächenwassers ausgelöst, kombiniert mit starken herbstlichen Winden. In einem ruhigen, späten Herbst nach einem warmen Sommer kann die Zirkulation daher auch erst spät einsetzen, weil der Temperatur- und Dichteunterschied zwischen den beiden Wasserkörpern lange bestehen bleibt. Ein weiterer möglicher Grund für eine verspätete Vollzirkulation ist das Fehlen von gletscherwasserführenden Zuflüssen, wie das beispielsweise mit der Aare beim Thunersee, welcher nachweislich eine Vollzirkulation durchläuft, der Fall ist [6]. Diese können dazu führen, dass das Wasser des Sees auch im Sommer verhältnismässig kühl bleibt und der für die Vollzirkulation entscheidende Dichteunterschied gering bleibt.

Weiter kann bei den Tiefen-Messungen ein deutlich höherer pH-Wert als bei den kleineren Seen festgestellt werden. Das kommt daher, dass die kleinen Seen grösstenteils von Moor umgeben sind, während das beim grossen See nicht der Fall ist.

In der mit der Hydrolab-Sonde gemessenen Datenreihe ist eine gut erkennbare Sprungschicht sichtbar. Bei den Temperaturmessungen mit der SevenGo Duo der Firma Mettler Toledo beziehungsweise der Hach-Sonde wurde zwar bestätigt, dass die Temperatur mit zunehmender Tiefe abnimmt, jedoch scheint die Temperaturabnahme nahezu linear zu geschehen. Die beiden an Bord gemessenen Temperaturreihen müssen jedoch mit Vorsicht genossen werden. Es besteht der Verdacht, dass das Wasser beim Rücktransport an die Wasseroberfläche oder beim Umfüllen in den zur Messung genutzten Behälter eine Temperaturänderung erfahren hat. Des weiteren ist es auch möglich, dass die untersuchten Wasserproben nicht vollständig aus der erwarteten Tiefe stammen. Die Tiefe der Probennahme kann durch den Messwert des Tiefensensors überprüft werden. Es ist aber möglich, dass beim Rücktransport des Wasserprobennehmers ein partieller

Austausch der Wasserprobe mit Wasser höherer Schichten stattgefunden hat. Auf eine Ungenauigkeit der Messwerte deutet vor allem die Messreihe der Hach-Sonde hin, welche starke Schwankungen anzeigt.

Zur Sauerstoffkonzentration wurden zwei Datenreihen generiert. Eine wurde mit der Hydrolab-Sonde direkt im Wasser gemessen, die andere auf dem Boot mit der Hach-Sonde. Beide Datenreihen korrelieren vor allem oberhalb der Sprungschicht stark. Jedoch sind auch bei dieser Messung die starken Schwankungen bei der mit der Hach-Sonde gemessenen Werte zu erkennen. Das wird auf die bereits oben beschriebenen Fehlerquellen zurückgeführt. Zudem sind die Messwerte bei der Messung mit der Hach-Sonde tendentiell höher. Das liegt möglicherweise daran, dass sich Luft im Wasserprobennehmer befunden haben kann, so wie dass das auf dem Boot gemessene Wasser kurze Zeit Kontakt mit der Luft hatte und somit Sauerstoff aufnehmen konnte. Dieser Fehler macht sich besonders bei Proben aus grosser Tiefe stark bemerkbar.

Das Messen eines zweiten Tiefenprofils in unmittelbarer Umgebung hätte zu einem besseren und vor allem eindeutigeren Resultat geführt und ist somit für ein Nachfolgeprojekt zu empfehlen. Ebenfalls sinnvoll wäre es, die Temperatur der Wasserproben aus den Tiefe vor Ort mit den Werten der Hydrolab zu vergleichen, und bei Abweichungen eine neue Wasserprobe zu gewinnen.

5.1.2. Vergleich mit dem Thuner- und Brienzersee

Vor zwei Jahren wurde in den im Berner Oberland gelegenen Seen Brienzer- und Thunersee ebenfalls je ein Tiefenprofil gemessen. Diese werden nun mit dem in diesem Projekt in Finnland gemessenen Tiefenprofil verglichen. Die Temperatur an der Seeoberfläche des Näsiskä ist tiefer. In der Tiefe nähern sich die Temperaturwerte aller Seen einem konstantem Wert an. Die Endwerte sind in den Schweizer Seen tiefer, jedoch wurde dort auch 20 m tiefer gemessen. Die Sprungschicht liegt im Näsiskä bei ca. 16 m Tiefe, im Thuner- und Brienzersee in 27 m Tiefe. Das liegt in erster Linie daran, dass die gemessenen Schweizer Seen um einiges tiefer sind. Der pH-Wert liegt bei den beiden Schweizer Seen über eine Einheit höher. Das kann darauf zurückzuführen sein, dass beim Brienzer- und Thunersee kalkhaltiges Gestein in der Umgebung ist. Das Produkt einer Reaktion mit Kalk und Wasser ist basisch. Beim Sauerstoffgehalt kann einzig gesagt werden, dass die Werte der Schweizer Seen an der Oberfläche um ca. 1 mg/L höher sind. Weiter in der Tiefe sind sie sogar bis zu 3 mg/L höher. Aufgrund eines Messfehlers im Thunersees kann das Epilimnion nicht verglichen werden. Die elektrische Leitfähigkeit ist im Näsiskä viel tiefer als die in den Schweizer Seen. In der Schweiz gibt es im Vergleich zu Finnland nur sehr kleine Sprünge in der Leitfähigkeit in den Tiefen. In Übereinstimmung mit der elektrischen Leitfähigkeit sind auch Ionenkonzentrationen in Finnland sehr viel tiefer als bei den in der Schweiz gemessenen Seen. Sowohl im Näsiskä als auch in den Schweizer Seen ist die Konzentration von Fluorid sehr klein. Die Nitrat- Magnesium- und Natrium-Werte liegen alle auch eher tief und in einer ähnlichen Grössenordnung. Die wesentlichsten Unterschiede bestehen beim Sulfatwert, der in den Schweizer Seen um etwas das 7-fache höher liegt, und im Calcium-Wert, der in den Schweizer Seen um den Faktor 8 höher ist. Während die Kalium- und Chloridwerte in der Schweiz ziemlich konstant sind, sind im Diagramm von Finnland zwei Peaks erkennbar. Diese lassen sich vermutlich auf eine Verschmutzung der Sonde mit KCl zurückführen, daher lassen sich aus diesen Werten keine Schlüsse ziehen.

5.2. Seenvergleich

Bei Betrachtung der Resultate der Ionenchromatographie-Messungen ist zu sehen, dass die Standorte 7 und 8 die insgesamt höchste Ionenkonzentration aufweisen. Die Messwerte liegen zusammen mit denjenigen von Standort 6 sehr nahe beieinander und gleichen sich, abgesehen von ihrem Calciumgehalt. Dies kann auf die geografische Nähe der Seen zurückgeführt werden. Ebenso ähnlich ist die Leitfähigkeit, welche sich im Bereich um 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bewegt. Es ist jedoch erstaunlich, dass eine vergleichsweise tiefe elektrische Leitfähigkeit vorgefunden wurde, obwohl an diesen Standorten von allen untersuchten Seen am meisten Ionen vorhanden sind. Grund dafür könnten weitere Ionen sein, die in den anderen Gewässern die Leitfähigkeit erhöhen, und die mit der gewählten Messung mit den Ionenchromatographen nicht erkannt wurden. Ebenfalls aus demselben Gebiet stammen die Proben 9 und 10, welche im Verlauf eines Flusses genommen wurden. Zwar unterscheiden sich deren Leitfähigkeiten kaum, ebenso ist bis auf einen etwas erhöhten Magnesiumwert kein Unterschied bei den Kationen zu sehen. Bei den Anionen fällt jedoch eine enorme Zunahme des

Sulfats von der oberen Probestelle 9 zur unteren 10 auf. So vervielfacht sich dessen Menge innerhalb weniger Meter. Die erhöhte Konzentration stammt wahrscheinlich aus dem zweiten Bach, welcher zwischen den beiden Standorten mit dem untersuchten Gewässer zusammenfliesst. Der Zufluss lässt zudem auch den Schaum erklären, welcher nach dem Zusammenfluss gehäuft beobachtet wurde.

Ebenfalls durch erhöhte Sulfatwerte zeichnet sich Standort 14 aus. Trotz einem geringen Chloridvorkommen führt die vergleichsweise grosse Mengen an Sulfat-Ionen zu der höchsten gemessenen Anionenkonzentration dieser Studie. Im Vergleich mit Schweizer Gewässern ist dieser Wert jedoch noch immer sehr tief, wie etwa der Vergleich mit der Studie von Amberg et al. [6] zeigt. Der Grund für den erhöhten Sulfatgehalt könnte in den kleinen Ferienhäusern rund um den See liegen. Denn anders als die meisten untersuchten Seen weist Standort 14 mehrere Anlegestege und dazugehörige Häuschen auf. Bei Bauarbeiten könnte es zu Verschmutzungen durch Gips gekommen sein. Insgesamt liegt aber nirgends eine sehr hohe Sulfatkonzentration vor, was wiederum für wenig verschmutzte Gewässer spricht. Das bestätigen zudem die sehr geringen Mengen an Ammonium, welches normalerweise durch ausgeschwemmten Dünger in Gewässer gelangt. Die erhaltenen Resultate in dieser Untersuchung deuten darauf hin, dass in der untersuchten Region kaum Dünger in die Seen gelangt.

Die pH-Werte der Seen sind eher tief, die Seen also sauer. Der Säuregehalt in den Gewässern in Pirkanmaa kommt wahrscheinlich von den Mooren. Standort 14 hat deutlich den höchsten pH-Wert. Dieser ist jedoch immer noch im leicht sauren Bereich. Möglicherweise hängt das mit den hohen Sulfatwerten im Boden zusammen. Zusätzlich ist die Konzentration der Anionen ziemlich hoch. Die Standorte 6, 7 und 8 haben wie 14 auch einen etwas höheren pH-Wert im Vergleich zu den anderen Standorten, die sich relativ konstant verhalten. Bei diesen ist im Boden ein höherer Wert an Calcium gemessen worden als im Durchschnitt. Hier sind vor allem die Konzentrationen der Kationen auffallend höher und die der Anionen leicht erhöht. Alle vier Standorte weisen eine durchschnittliche oder sogar leicht tiefere Leitfähigkeit auf. Interessant ist, dass alle auffälligen Messwerte von denselben Probestandorten stammen. Das bedeutet, dass alle diese Werte wahrscheinlich zusammenspielen und sich gegenseitig verändern und beeinflussen.

5.3. Elementanalyse der Bodenproben

Das hohe Vorkommen von Silicium lässt sich mit der Zusammensetzung von Granit erklären, welcher im Gebiet häufig zu finden ist [7]. Dieser besteht hauptsächlich aus Feldspat, verschiedenen Glimmer und Quarz, allesamt Silikate. Silikate enthalten Silizium-Sauerstoff-Verbindungen als Anionen und mineralspezifische Kationen. Aufgrund der hohen nachgewiesenen Menge ist davon auszugehen, dass ein Teil des Seegrundes aus Granitablagerungen oder sogar Granitplatten besteht.

Das mengenmässig zweithäufigste Element ist Aluminium, welches einen Massenanteil zwischen 5-10 % ausmacht. Während die meisten Proben sehr ähnliche Werte aufweisen, sticht die Probe B7 mit über 9.3 % heraus. Dieses Muster ist ebenfalls beim Eisen und in viel kleineren Verhältnissen bei Titan zu erkennen. Doch B7 wies auch bei weiteren Eigenschaften einige Abweichungen vom Mittelwert auf: So war die Probe bereits bei der Entnahme sehr homogen und ohne grössere Partikel. Nach dem Trocknen bei 105 °C war die Probe zudem zu einem festen, grauen Block geworden, was bei keiner anderen Probe beobachtet wurde. Diese Besonderheit der Konsistenz kann auf einen erhöhten Gehalt an Tonmineralien hindeuten, die bekanntermassen viel Aluminium enthalten. Die erhöhten Werte an Eisen und Titan könnte von einer Verschmutzung der Probe beim Zerkleinern mit einem Stahlhammer stammen. Angesichts der Verwendung von mehreren Plastiksäcken als Schutz scheint diese These jedoch als wenig wahrscheinlich.

Die weiteren untersuchten Bodenproben zeigen sich unauffällig. Die kleinen Mengen an Eisen, Natrium, Calcium und Kalium sind von untergeordneter Bedeutung. Einzig das Element Mangan ist in den meisten Proben etwas häufiger vorhanden als in durchschnittlichen Bodenproben aus den Schweizer Voralpen. Ob die leicht erhöhten Manganwerte von 0.01 % bis 0.07 % aufgrund der Probennahme unter Wasser oder durch die lokalen Gegebenheiten begründbar sind, ist nicht eindeutig erkennbar. Hierfür wären Vergleichsproben vom Uferand und der Umgebung des Sees notwendig gewesen. Insgesamt lässt sich sagen, dass der Mangangehalt gering ist.

Deutlich interessanter als die eher unauffälligen elementaren Zusammensetzungen der Böden sind die aus den XRF-Messungen und der Veraschung bestimmten organischen Massenanteile. Dabei fällt auf, dass bei der Hälfte der Proben (B1, B2, B7, B12 und B13(2)) die beiden Methoden vergleichbare Werte erzielen.

Bei den Proben B3, B8, B11 und B14 liegen die aus den XRF-Werten errechneten organischen Anteile aber um Faktoren 10 bis 20 höher als die Werte aus der Veraschung. Die Abweichungen dürften eher auf der Seite der XRF-Messungen liegen. Es ist davon auszugehen, dass bei der Hochrechnung der Elementgehalte auf die primären Oxide und Carbonate Fehler passieren. Dies wäre vor allem dann der Fall, wenn die gemessenen Elemente in komplizierteren Verbindungen vorliegen. Man muss aber auch damit rechnen, dass die Primärdaten der XRF-Messung eine gewisse Ungenauigkeit enthalten, dies zum Beispiel bei sehr hohen Konzentrationen eines Elements. Jedenfalls ist der Grund für die Abweichungen nicht bekannt und sollte in künftigen Studien untersucht werden.

Über alle Resultate zu den Bodenproben lässt sich insgesamt sagen, dass sich die Werte alle im Normalbereich befinden und kaum Auffälligkeiten gefunden wurden. Einzig die Mangan-Werte sind vereinzelt etwas erhöht, insgesamt aber auch unauffällig. Zudem konnten unterschiedliche organische Bestandteile in den Böden nachgewiesen werden, was wiederum erwartet wurde.

6. Fazit

Im Rahmen des Hydrologie-Projektes 2024 wurden verschiedene Wasser- und Bodenwerte von unterschiedlichen Seen und Flüssen in Finnland gemessen. Ausserdem konnte ein erfolgreiches Tiefenprofil eines grösseren Sees erstellt werden. Das Projektziel wurde erreicht, da eine Sprungschicht im Tiefenprofil erkennbar ist. Für zukünftige Projekte sollten mindestens zwei Tiefenprofile gemessen werden, um die Messwerte zuverlässiger zu machen. Ebenfalls sollte die Methode der Probensammlung mit dem Wasserprobennehmer verbessert werden, da mit grosser Wahrscheinlichkeit Wasserproben aus falschen Tiefen aus der Tiefe herausgeholt wurden. Die Wasserproben der Seen waren zufriedenstellend. Wie schon erwartet lag der pH-Wert der Seen im sauren Bereich. Dies ist wahrscheinlich auf die umliegenden Moore zurückzuführen. Einzelne Schwierigkeiten traten bei der Probenahme und Auswertung der Bodenproben auf. Aufgrund des starken Gefälles des Seebodens war es mit unserem Probennehmer nicht immer möglich, bis zum Grund zu gelangen. Ebenfalls verhinderte das Moor an einigen Standorten den Zugang zum See. Trotzdem können Unterschiede in den gemessenen Elementmengen an den verschiedenen Messstandorten festgestellt werden. Ein besonderes Augenmerk lag auf den Sulfat-Werten des Standortes 14, da diese deutlich höher sind als an den anderen Standorten.

In zukünftigen Projekten sollte vor allem darauf geachtet werden nicht zu viele verschiedene Unterprojekte gleichzeitig zu bearbeiten. Die Gruppe sollte sich auf ein Projekt fokussieren, und bei diesem klarer und detaillierter vorgehen.

7. Dank

Ein grosser Dank geht an Kurt Barmettler (Institut für Biogeochemie und Schadstoffdynamik, ETH Zürich), welcher die XRF-Analysen auch dieses Jahr für uns durchgeführt hat. Auch möchten wir uns herzlich bei Markus Held und Leena Koivunen bedanken, welche uns mit ihren Ortskenntnissen und der Vermittlung eines Boots inklusive Kapitäns für das Tiefenprofil halfen. In diesem Sinn möchten wir uns auch bei Veijo Vihanta bedanken, dass er uns einen Nachmittag lang auf seinem Boot begleitet hat. Zuletzt gilt unser Dank Christian Bircher, welcher uns bei verschiedensten technischen Problemen mit den verschiedenen Sonden zur Seite gestanden ist.

8. Literaturverzeichnis

- [1] University of Oulu, «Forests (the first section)», <https://www.oulu.fi/northnature/english/englantimetsat1.html#yl> (Zugriff 27.1.2024).
- [2] Maps Finland, «Uusi Suomi kartta», <https://fi.maps-finland.com/uusi-suomi-kartta> (Zugriff 27.1.2024).
- [3] Gebhardt H. et al., «Geographie: Physische Geographie und Humangeographie», Springer Spektrum, Berlin (2020).

- [4] Internationale Gewässerschutzkommission (IGKB), «Wasserqualität Bodensee», https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/lehrmittel_datenbank/Wasserqualitaet/Lehrmittel_Wasserqualitaet.pdf, (Zugriff 19.02.2022).
- [5] PANalytical BV, «Theory of XRF», <https://home.iiserb.ac.in/~ramyasr/files/Manuals/XRF.pdf> (Zugriff 3.2.2024).
- [6] Amberg S. et al., «Hydrologie am Brienzer- und Thunersee», in «Forschungsbericht über die Studienwoche 2021, Achseten», Forschungsgruppe **academia**, Wattwil (2021).
- [7] Erni S. et al., «Geologie im Zentralfinnischen Granitoid-Komplex», in «Forschungsbericht über die Studienwoche 2023, Kuru», Forschungsgruppe **academia**, Wattwil (2023).

Geologie im Zentralfinnischen Granitoid-Komplex

Sophia Erni, Ronja Hüppi, Cedric Palme, Jara Zahner

1. Einführung

Im diesjährigen Geologie-Projekt in Finnland wurden magmatische und metamorphe Gesteine in der Nähe von Kuru untersucht. Trotz der flachen Topographie des Gebiets war es möglich, Gesteinsproben in den zahlreich vorhandenen und gut zugänglichen Aufschlüssen in Steinbrüchen zu nehmen. Die Entstehung eines Gesteins kann aus verschiedenen Blickwinkeln nachvollzogen werden: Einerseits können das Gestein und das Gefüge der enthaltenen Mineralien von Auge bestimmt werden. Zusätzlich kann man die Mineralienzusammensetzung kleinskalig untersuchen, indem ein Dünnschliff (30 µm) angefertigt und unter einem Polarisationsmikroskop betrachtet wird. Andererseits kann man mittels Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie (XRF) ein Gestein bezüglich seiner elementaren Zusammensetzung analysieren.

Im Folgenden wird eine kurze Einführung zu magmatischen und metamorphen Gesteinen und zu Gängen gegeben und die geologische Geschichte des Gebiets skizziert. Dabei liegt der Fokus auf den projektrelevanten Informationen. Es folgt eine Übersicht der benutzten Methoden. Die Resultate zeigen die ermittelten verschiedenen Zusammensetzungen der gefundenen Gesteine und der beeindruckenden Gänge und Pegmatite. Die Resultate ermöglichen Hypothesen und Rückschlüsse zur Bildung der geologischen Formationen rund um den Lagerort Rajala in Finnland.

2. Theorie

2.1. Bildung magmatischer und metamorpher Gesteine

Die Erdoberfläche wird von einer Vielfalt an Gesteinen geprägt, welche sich durch geologische Prozesse über Millionen von Jahren gebildet haben. Unter der Erdkruste befinden sich Magmakammern, aus welchen die flüssige Gesteinsschmelze an die Erdoberfläche aufsteigt und durch rasche Erstarrung auskristallisiert. Solche magmatischen Gesteine werden auch Vulkanite oder Effusivgesteine genannt. Bleibt die Schmelze beim Aufstieg an die Erdoberfläche jedoch in kühleren, festen Gesteinen stecken, so erstarrt das Magma langsamer, sodass sich Plutonite bilden (auch Intrusivgesteine genannt). Solche Plutonite können aufgrund der langsameren Abkühlungszeit grössere Kristalle ausbilden.

Mithilfe eines Klassifikationsschemas für magmatische Gesteine (siehe Abb. 1) können Trends bei magmatischen Gesteinen abgeschätzt werden. Das dargestellte Verhältnis der Mineralien ermöglicht eine Einordnung in magmatische Gesteinstypen. Die vertikale Achse der Grafik zeigt die Mineralzusammensetzung eines bestimmten Gesteins in Volumenprozent und die horizontale den Siliziumoxid-Gehalt (SiO_2) in Massenprozent. Das Schema ist so zu lesen, dass links die felsischen Gesteine mit den hellen Mineralien und einem hohen Anteil am Hauptoxid SiO_2 einzuordnen sind. Je weiter rechts, desto mafischer und dementsprechend SiO_2 -ärmer sind die Mineralien, und desto mehr Magnesium und Eisen ist in den Mineralien enthalten. Zusätzlich nimmt der Natrium- und Kalium-Gehalt vom mafischen zum felsischen Bereich hin zu. Bei über 65 % (Massenprozent) an Siliziumoxid ist der Gesteinstyp felsisch, bei 52-65 % intermediär, bei 45-52 % mafisch und bei < 45 % ultramafisch. Mafische Gesteine erstarren beim Abkühlen der Schmelze bei höheren Temperaturen, während die felsischen bei tieferem Schmelzpunkt kristallisieren [1].

Metamorphe Gesteine hingegen entstehen in sekundären Prozessen aus magmatischen oder sedimentären Ursprungsgesteinen. Solche metamorphen Gesteine entstehen unter Einfluss von hoher Temperatur und hohem Druck, indem sich die chemischen Strukturen, die Mineralien und deren Anordnung in den Gesteinen verändern. Es existieren verschiedene Typen von Metamorphose. Ein Metamorphose-Typ ist die Kontaktmetamorphose. Dabei werden Gesteine an den Rändern von Magmakammern durch hohe Temperaturunterschiede an der Kontaktfläche metamorph verändert. Im Unterschied zur Kontaktmetamorphose unterliegen Gesteine in der Regionalmetamorphose grossräumig hohem Druck und Temperatur. Dadurch entsteht ein Bereich der tektonischen Deformation, in dem Scherkräfte wirken. In diesem Bereich weisen die Gesteine häufig Schieferungen und orientierte Mineralien auf [1].

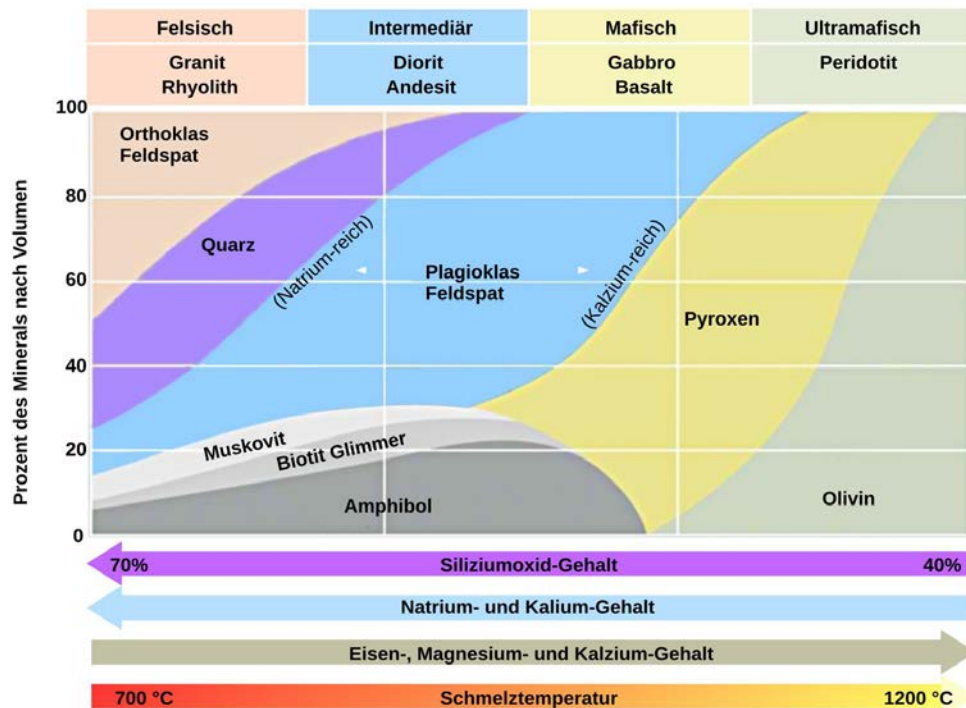


Abb. 1: Schema für die Einteilung von magmatischen Gesteinen in felsische und mafische Gesteine [2].

2.2. Magmatische Gänge

Magmatische Gänge entstehen durch hervordringendes Magma, das Spalten und Risse an schwachen Stellen bildet und auffüllt. Beim Abkühlen des Magmas können sich die Spalten vergrössern, sodass sich Gänge bilden. In solchen Gängen findet man oft spezielle und schön auskristallisierte Mineralien und mehr seltene Elemente als im Umgebungsgestein. Je nach Grösse der Kristalle spricht man von Aplit (feinkörnig) oder Pegmatit (grobkörnig). Grosse Pegmatite sind im Inneren des Gesteins oft mineralogisch in Zonen aufgeteilt, welche anhand von Abb. 2 veranschaulicht werden. In der Darstellung wird eine verallgemeinerte Konfiguration der Mineralien in den konzentrischen Zonen abgebildet. Während fließfähiges Magma in einen bereits existierenden Gesteinskörper einfließt, bildet sich eine wenige Zentimeter dicke Grenzzone am Rande des Pegmatits. Die pink dargestellte Zone wird als Wandzone bezeichnet und folgt nach innen auf die Grenzzone. Dieser Bereich kann mehrere Meter dick sein und Kristalle mit einer Länge von bis zu 30 cm enthalten. Mineralien wie Feldspäte, Quarz und Muskovit treten typischerweise in dieser Zone auf. In den Zwischenzonen, welche in der Abbildung grün gefärbt sind, können noch grössere Feldspat-, Quarz- und Muskovit-Kristalle auftreten als in der Wandzone. Die Kristallgrösse nimmt nämlich von der Grenzzone zum Kern hin zu. Die mittige Kernzone besteht fast ausschliesslich aus Quarz [3].

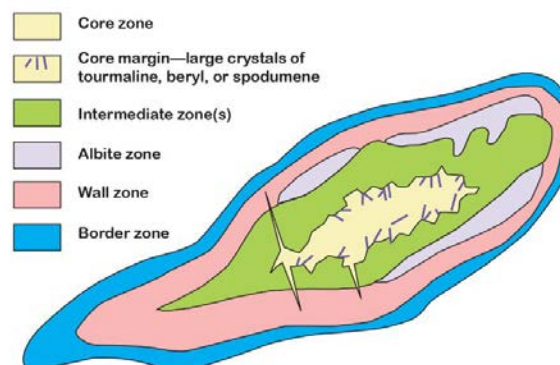


Abb. 2: Schema für die Gliederung von mineralogischen Zonen in einem Pegmatit [3]. Blau: Grenzzone, pink: Wandzone, lila: Albitzone, grün: Zwischenzone, gelb: Kernzone.

2.3. Geologische Geschichte des Gebiets

Finnland gehört geologisch gesehen zum Baltischen Schild (auch Fennoscandia genannt). Innerhalb der 2200 Millionen Jahre (2200 Ma) der Krustenevolution des Baltischen Schildes können fünf tektonische Zyklen unterschieden werden [4]:

- Der früharchaische Zyklus (> 2900 Ma vor heute) kann im Grundgebirge des späarchaischen Geländes festgestellt werden.
- Der späarchaische Zyklus (2900-2500 Ma) führte zur Entwicklung eines granitoiden Grünsteingürtels und der Geländeformen der Belomorian- und Kolan-Gneise.
- Der Svecokarelische Zyklus (2100-1750 Ma) war das grösste krustenbildende Ereignis im Schild. Elemente einer Gebirgsbildung (eines Orogens) vom zirkumpazifischen Typ sind in den Kareiden und Svecofenniden zu erkennen, die mit einer synchronen tektonisch-magmatischen Reaktivierung der archaischen Kruste einhergehen. Der Granulitkomplex von Lappland, ein Kollisionsgürtel im Kernbereich des Baltischen Schildes, stellt ein frühes Ereignis dieses Zyklus bei 2200-1900 Ma dar.
- Das Südwest-Orogen (1750-1550 Ma) ist ein kleineres Gebirgsbildungsereignis im südwestlichen Baltischen Schild.
- Der Sveconorwegische Zyklus (1200-900 Ma) überarbeitete die Gesteine des Südwest-Orogens mit wenig hinzugefügter Kruste.

Das Gebiet, welches in diesem Projekt untersucht wird, kann zum grössten Teil dem Zentralfinnischen Granitoid-Komplex (englisch: Central Finland Granitoid Complex, kurz CFGC) zugeordnet werden. Der CFGC umfasst ein Gebiet von 44 000 km² und liegt im zentralen Finnland (siehe Karte in Abb. 3).

Dominant treten felsische Gesteine auf, insbesondere Granite und Granodiorite. Selten lassen sich mafische Steine finden, deren Zusammensetzung generell dioritisch ist. Die plutonischen Gesteine werden nach der mineralischen Zusammensetzung, der Struktur und dem Grad der Deformation klassifiziert. Dabei können sie aufgrund der ausgeprägten Verformung des Gebiets in synkinematische und postkinematische Gesteine unterteilt werden. Synkinematische Ereignisse fanden während, postkinematische Ereignisse zwischen tektonischer Verschiebung und anderen geologischen Ereignissen statt. Die ältesten Gesteine des CFGC sind 1920-1910 Ma alte gneissische Tonalite, also leicht metamorphe Plutonite, die chemisch zwischen Granit und Diorit stehen [5].

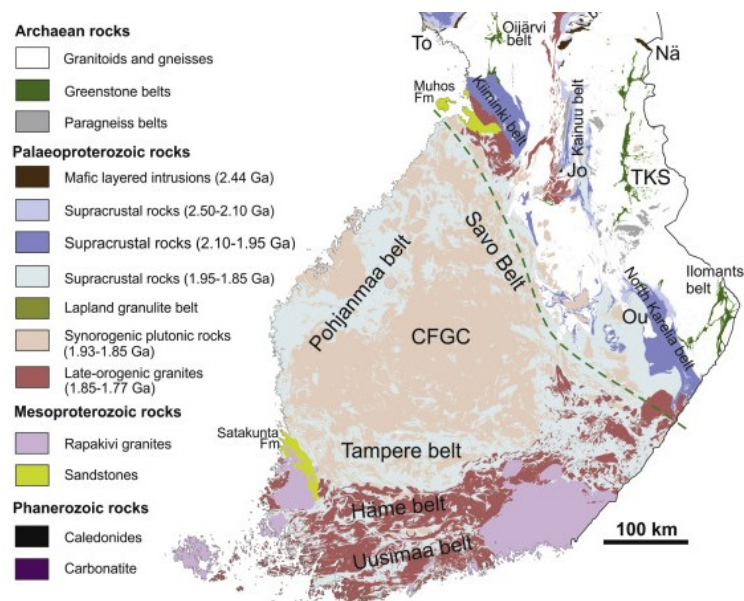


Abb. 3: Geologische Karte des südlichen Finnlands mit dem Zentralfinnischen Granitoid-Komplex (CFGC), der im Süden durch den Tampere-Gürtel (engl. belt) begrenzt wird. Die Legende ist nach Alter sortiert, die ältesten Gesteine (engl. archaean rocks) zuoberst und die jüngsten Gesteine (engl. phanerozoic rocks) zuunterst. Die im Projekt besuchten Standorte liegen im Gebiet mit synorogenen plutonischen Gesteinen (engl. synorogenic plutonic rocks) [6].

3. Methodik

3.1. Feldarbeit

Im Feld wurden an den Standorten von jeder Gesteinsart drei Gesteinsstücke von der Grösse von zwei Fäusten gesammelt. Davon diente eines als Handstück, eines für die XRF-Probe und eines für den Dünnschliff. An den Standorten wurden Fotos gemacht, um die Herkunft der Proben und den Aufbau der Gesteinsschichten nachvollziehen zu können. Weiter wurden die Proben nach der SPA-Methode beschriftet: Es wurde eine Nummer für den Standort (S), eine Nummer für die Probe (P) und ein bis zwei Buchstaben für die Art des Gesteins (A) zugewiesen. Diese Probennummerierung dient zur genauen Identifikation der Gesteinsprobe und wird im Resultate-Teil weiterverwendet.

3.2. Visuelle Gesteins- und Mineralienbestimmung

Ein Gestein ist aus Mineralien aufgebaut. Dies kann man nutzen, um eine erste optische Bestimmung vorzunehmen. Dabei werden in der Regel folgende Aspekte betrachtet:

- *Farbe*: Aufgrund der chemischen Zusammensetzung weisen Mineralien teilweise eine charakteristische Farbe auf. Es muss hierbei bedacht werden, dass Verunreinigungen oder eine schwankende Zusammensetzung die Farbe verändern können.
- *Strichfarbe*: Bei der Strichfarbe handelt es sich um die Farbe eines Minerals in pulverisierter Form. Diese ist oftmals nicht identisch mit derjenigen des grobkörnigen Minerals und ist meist charakteristischer. Um die Strichfarbe zu testen, ritzt man das grobkörnige Mineral auf einer Keramikplatte.
- *Glanz*: Unter Glanz versteht man die Art und Weise, wie ein Mineral Licht reflektiert. Es werden dabei verschiedene Arten von Glanz unterschieden: Metall-, Diamant-, Glas-, Fett-, Perlmutter- und Seidenglanz.
- *Transparenz*: Mithilfe der Transparenz wird beschrieben, wie Minerale das Licht passieren lassen. Man unterscheidet dabei durchsichtige, durchscheinende und opake Mineralien.
- *Habitus*: Mit dem Habitus kann beschrieben werden, was für eine innere Struktur bzw. Kristallform das Mineral aufweist. Dabei muss beachtet werden, dass mehrere Mineralien dieselbe Form haben können.
- *Magnetismus*: Mit einem Magneten können in einem Gestein magnetische Mineralien nachgewiesen werden. Dazu gehören Magnetit und Pyrrhotin [7, 8].

Die Proben wurden auf einige dieser Eigenschaften untersucht und die Ergebnisse dokumentiert. Zusätzlich wurden sie mithilfe eines Geiger-Müller-Zählers auf Spuren von Radioaktivität untersucht.

3.3. Dünnschliffe

Dünnschliffe sind Gesteinsscheiben, die auf eine Dicke von 30 µm geschliffen und auf einen Objektträger aufgeklebt werden. Wenn ein solcher Dünnschliff unter einem Polarisationsmikroskop betrachtet wird, können Mineralien im Detail untersucht werden. Ein Polarisationsmikroskop ist ein Mikroskop, das mit zwei Polarisationsfiltern ausgestattet ist. Jeder Filter lässt nur Licht in einer bestimmten Schwingungsrichtung passieren. Der eine Filter, der sogenannte Polarisator, befindet sich unterhalb der Probe. Der andere Filter, genannt Analysator, befindet sich oberhalb der Probe und kann ein- und ausgeschaltet werden. Mit ausgeschaltetem Analysatorfilter wird das Licht nur vom Polarisator verändert, es wird also nur eine Schwingungsrichtung zur Probe durchgelassen. Mit Analysatorfilter wird die Probe mit sogenannt gekreuzten Polarisatoren untersucht. Der Analysatorfilter steht in einem 90°-Winkel zum Polarisator, weswegen nur Licht in dieser um 90° gedrehten Schwingungsrichtung zum Auge gelangt. Daher ist ohne eingelegte Dünnschliffprobe mit dem Analysatorfilter kein Licht durch das Okular sichtbar. Bestimmte chemische Bindungen oder Strukturen können die Polarisationsrichtung von Licht aber ändern, wobei verschiedene Wellenlängen (Farben) des Lichts unterschiedlich gedreht werden. Unter gekreuzten Polarisationsfiltern werden diese Stoffe sichtbar und fallen durch ihre charakteristischen Farben auf. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung der Mineralien. Aber auch das Erscheinungsbild eines Minerals ohne den Analysatorfilter kann Hinweise für die Bestimmung liefern [9]. Deshalb wird in den Resultaten jeder Dünnschliff-Ausschnitt jeweils ohne und mit Filter gezeigt. Mithilfe eines Skripts zur Mineraloptik [10] wurden die Mineralien anhand ihrer Eigenschaften in den Dünnschliffen bestimmt.

3.4. Röntgenfluoreszenz-Analyse (XRF)

Bei der Röntgenfluoreszenz-Analyse (engl. X-Ray Fluorescence Spectrometer, kurz XRF) erfolgt die Bestrahlung der Proben durch Röntgenstrahlung gemäss Abb. 4. Die Energie dieser Strahlung bewirkt das Herausschlagen von Elektronen aus den inneren Schalen der Atome. Elektronen höherer Schalen fallen in diese Lücken zurück und emittieren dabei Röntgenstrahlung, die als Röntgenfluoreszenz bezeichnet wird. Die Frequenz der Röntgenphotonen ist charakteristisch für jedes Element. Ein Detektor misst die Intensität und Frequenz dieser Strahlung. Die Konzentration der gemessenen Elemente kann durch Kalibrationsmessungen ermittelt werden.

Für die Analyse der Elementvorkommen in Gesteinsproben werden diese zunächst geschnitten, dann zu feinem Pulver gemahlen und schliesslich zu Glaspillen geschmolzen. Die Röntgenfluoreszenz-Untersuchung erfolgt anschliessend an den Glaspillen. Zusätzlich wurde der Glühverlust (englisch: loss on ignition, kurz LOI) der Proben durch Erhitzen der Probe auf 1050 °C bestimmt. Dabei kann ein Gewichtsverlust durch Verlust von flüchtigen Bestandteilen oder auch eine Gewichtszunahme durch Oxidierung von FeO zu Fe₂O₃ festgestellt werden. Das Verglühen der Proben ist ebenfalls nötig für die weiteren Prozesse der Glaspillengerstellung. Die XRF-Messdaten werden mit dem Glühverlust korrigiert und die Anteile der Oxide werden berechnet. In den XRF-Daten sind die als Oxide vorkommenden Hauptelemente (z.B. CaO, Fe₂O₃) als Prozente notiert und die selteneren Spurenelemente (z.B. Rb, U) als ppm (engl. parts per million), also als Millionstel.

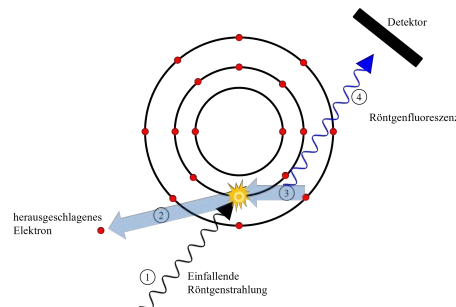


Abb. 4: Schema zur Funktion der Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie.

4. Resultate und Diskussion

4.1. Überblick der Standorte

Total wurden an 14 Standorten 46 verschiedene Gesteinsproben mit jeweils drei Gesteinsstücken genommen, gesamthaft über 150 kg Gestein. Davon wurden 23 Proben an der ETH Zürich mit der XRF-Analyse untersucht. Zusätzlich wurden 11 Dünnschliffe an der ETH Zürich hergestellt und an der KSW mit einem Polarisationsmikroskop begutachtet. Die Resultate werden im Folgenden nach Standorten aufgeschlüsselt und anhand der visuellen Gesteinsbestimmung, der Analyse von Dünnschliffen unter dem Polarisationsmikroskop und der Elementanalyse durch XRF charakterisiert.

Drei untersuchte Steinbrüche (Standorte 6-8, 13, 14) und ein Aufschluss entlang einer Strasse (Standort 11/12) befanden sich in der Nähe des Lagerhauses (Standort 0) und nahe dem Dorf Kuru (siehe Karte in Abb. 5). Diese Standorte befanden sich im Gebiet des Zentralfinnischen Granitoid-Komplexes (CFGC). Auf der geologischen Karte ist ersichtlich, dass primär Plutonite wie beispielsweise Granite, Diorite, Granodiorite und Gabbros in diesem Gebiet vorherrschend sind. Der Standort 9 lag geographisch und geologisch etwas abseits der übrigen Standorte. Standort 9 befand sich im Steinbruch Viitaniemi, nahe dem Dorf Orivesi. Geologisch gesehen lag Standort 9 am Rande des CFGC, und es dominierte mit Biotit-Paraschiefer ein metamorpher Gesteinstyp. Innerhalb dieser geologischen Situation können grundsätzlich kleinräumige geologische Prozesse, insbesondere Gangbildungen, dazu führen, dass verschiedenste Gesteinsarten gefunden werden können. Nach einem Überblick über Trends der Elementverteilung an allen untersuchten Standorten werden die besonders spannenden Standorte 9 und 13 im Detail behandelt.

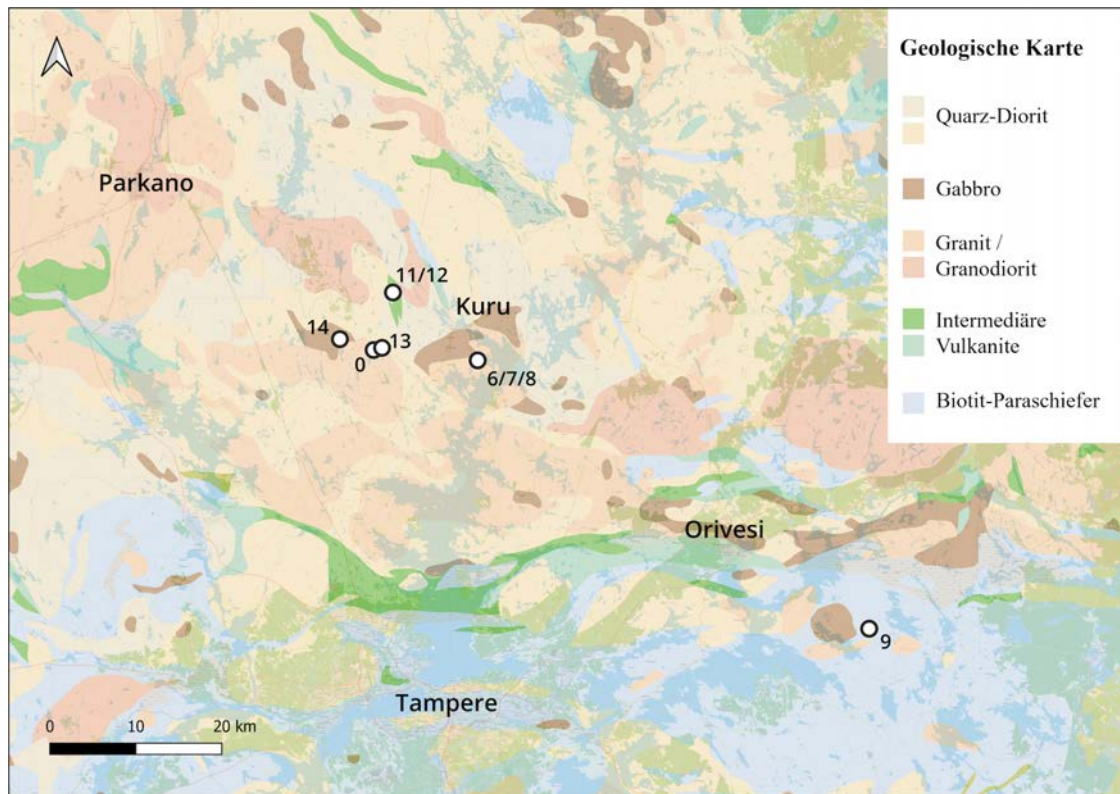


Abb. 5: Geologische Karte mit eingezeichneten Standorten. In der Legende sichtbar sind die geologischen Grundgesteine an den besuchten Standorten. Erstellt mit QGIS [11] und mit Karten-Material des Geological Survey of Finland (GTK) [12].

4.2. Überblick über die Elementverteilungen

Die Elementzusammensetzungen von 23 ausgewählten Proben wurden mittels XRF untersucht. Über alle Proben hinweg können einige generelle Aussagen über die im untersuchten Gebiet vorliegenden Gesteine getroffen werden. Standardmässig werden in der Geologie sogenannte Harker-Diagramme erstellt, in denen die Hauptoxide dem Quarzgehalt (SiO_2) gegenübergestellt werden. Diese Hauptoxide liegen in verhältnismässig hohen Mengen in den Proben vor und werden deshalb in Massenprozenten angegeben. Zusätzlich wurden mittels XRF auch Spurenelemente gemessen, die im vorliegenden Bericht jedoch nicht besprochen werden. Die Resultate der Hauptoxid-Zusammensetzungen aller gemessenen Proben sind in der Grafik in Abb. 6 dargestellt. Die gemessenen Proben weisen SiO_2 -Gehalte zwischen 52 und 77 % auf, es konnte also eine grosse Bandbreite von intermediären (52-65 % SiO_2) bis felsischen (> 65 % SiO_2) Gesteinen beprobt werden.

Grundsätzlich gilt bei magmatischen Gesteinen (siehe auch Abb. 1): Je mafischer ein Gestein ist (tiefere SiO_2 -Gehalte), desto höher sind die Magnesium-, Eisen- und Kalzium-Gehalte. Elemente, die typisch sind für mafische Gesteine, zeigen also laut Theorie eine negative Korrelation. Hingegen gilt: Je felsischer ein Gestein ist (höhere SiO_2 -Gehalte), desto mehr sind Elemente wie Kalium und Natrium angereichert. Diese typisch felsischen Elemente zeigen laut Theorie eine positive Korrelation.

Bei den gemessenen Proben zeigen die Aluminium-, Eisen-, Kalzium- und Magnesium-Oxidgehalte (in Abb. 6, Subgrafiken A–D) relativ klare negative Korrelationen mit SiO_2 , zeigen also die typischen Trends für magmatische Gesteine. Die Kalium- und Natrium-Oxidgehalte zeigen jedoch ein unklareres Bild. Der Natrium-Oxidgehalt liegt bei allen Proben zwischen 1 und 5 %, sowohl bei felsischen (> 65 % SiO_2) als auch bei den intermediären (52-65 % SiO_2) Gesteinen (in Abb. 6, Subgrafik E). Der Kalium-Oxidgehalt zeigt eine positive Korrelation mit SiO_2 , jedoch ist der Trend nicht ganz linear (in Abb. 6, Subgrafik F). Dieses atypische Muster könnte entstanden sein, weil in diesem Projekt nicht nur klassische magmatische Gesteine gefunden wurden, sondern auch magmatische Gesteine und Pegmatite. Es kann daher erwartet werden, dass die klare theoretische Sicht mit typisch mafischen und felsischen Elementen nicht immer zutrifft. Metamor-

Die Gesteine und Pegmatite zeigen oftmals komplexere Elementverteilungen. Die Elementanalysen zu den Proben von Standort 9 und Standort 13 werden in den jeweiligen Resultat-Teilen detaillierter besprochen.

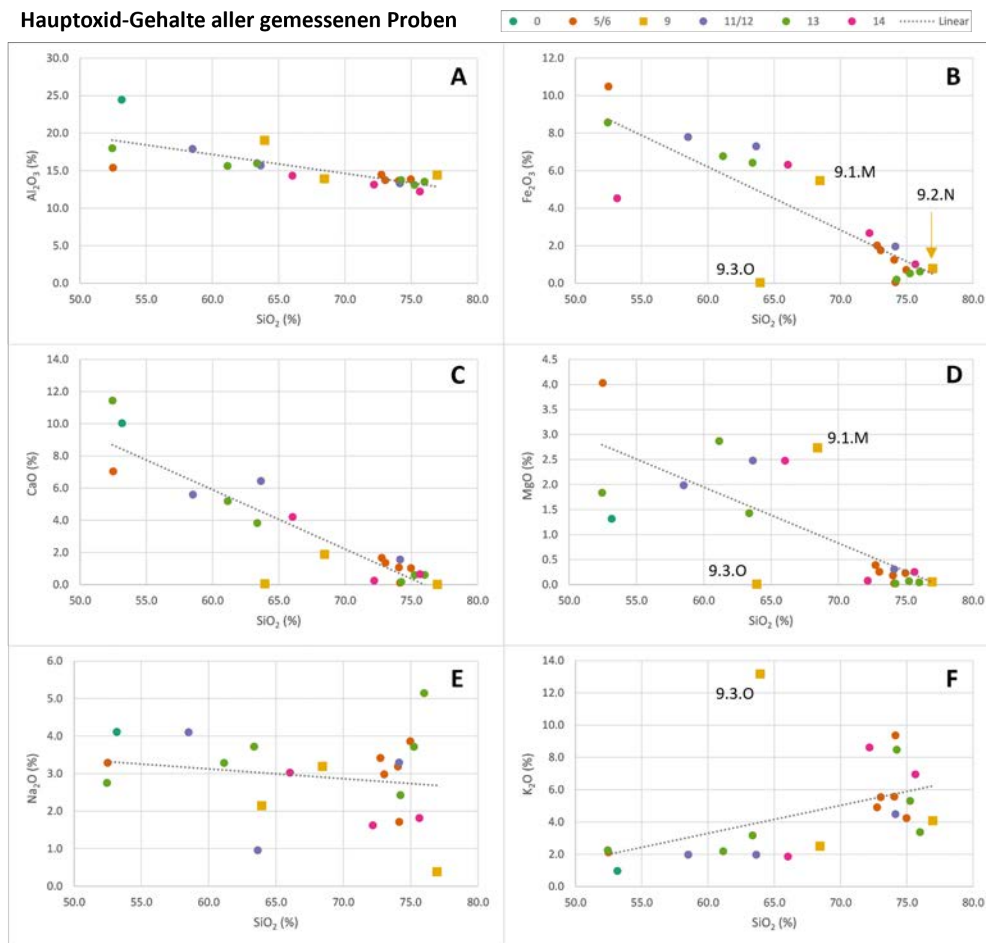


Abb. 6: Resultate der XRF-Analysen aller gemessenen Proben. Gegenüberstellung der Hauptoxide und SiO_2 . In der Grafik sind zusätzlich die Proben von Standort 9 beschriftet, Details dazu finden sich im Resultat-Teil von Standort 9.

4.3. Steinbruch Viitaniemi (Standort 9)

4.3.1. Probennahme und grobe Bestimmung

Der Steinbruch Viitaniemi war von 1935 bis ungefähr 1965 in Betrieb, und es wurden in zwei Abbau-Gruben insbesondere Kalifeldspat und daneben auch Quarz, Muskovit und andere Mineralien abgebaut. Die Proben, die in diesem Bericht beschrieben werden, stammen aus der östlichen Abbaugrube. In Viitaniemi können verschiedenste Mineralien gefunden werden, und ein Mineral wurde sogar nach diesem Steinbruch benannt, nämlich Viitaniemit. Das Gestein in der Viitaniemi-Mine ist reich an Lithium, Mangan, Eisen und Beryllium. Die vorhandenen Gesteinsstrukturen sind Pegmatite, also magmatische Gänge mit grossen Kristallen [13]. Die Probennahme erfolgte bei einem mehrere Meter breiten Gang. Es wurden das Grundgestein (9.1.M), das Gestein am Rand des Gangs (9.2.N) und gegen die Mitte des Gangs (9.3.M) beprobt (siehe Abb. 7). Zusätzlich wurde noch eine Probe von der Übergangszone der beiden Gesteinstypen 9.1.M und 9.2.N entnommen, welche bei den Dünnschliffen genauer beschrieben wird.

Das Grundgestein (Probe 9.1.M) ist dioritisch und enthält viele unterschiedliche Mineralien. In der Probe am Rand des Ganges 9.2.N kommen drei Mineralien dominant vor: Feldspat, Quarz (SiO_2) und Muskovit, welche unter anderem Kalium und Aluminium enthalten. Das Vorkommen von Muskovit deutet auf einen hohen Metamorphose-Grad hin, welcher in östlicheren Gebieten stärker ausgeprägt ist. Im Allgemeinen lassen sich in der Probe 9.2.N grosse Quarzkristalle finden, die fast idiomorph sind. Idiomorphe Kristalle haben eine voll ausgebildete Kristallgestalt, gut ausgeprägte Kristallflächen und die charakteristische Geometrie

des Minerals. Solche idiomorphen Kristalle bilden sich, weil sie zuerst aus der magmatischen Schmelze auskristallisieren und so unbeschränkt wachsen können, oder weil ausreichend Platz in den Klüften vorhanden ist. Da Quarz spät ausfällt, dürften in diesem Fall die räumlichen Bedingungen entscheidend gewesen sein. In der Probe 9.3.O, die aus der Mitte des Ganges stammt, kommen zwei Mineralien dominant vor: Feldspat und Quarz. Zusätzlich sind kleinere schwarze Mineralien vorhanden, wobei es sich wohl um Clinopyroxen handelt. Dies kann jedoch nicht abschliessend bestimmt werden, da in der untersuchten XRF-Probe nur Quarz und Feldspat vorhanden waren.

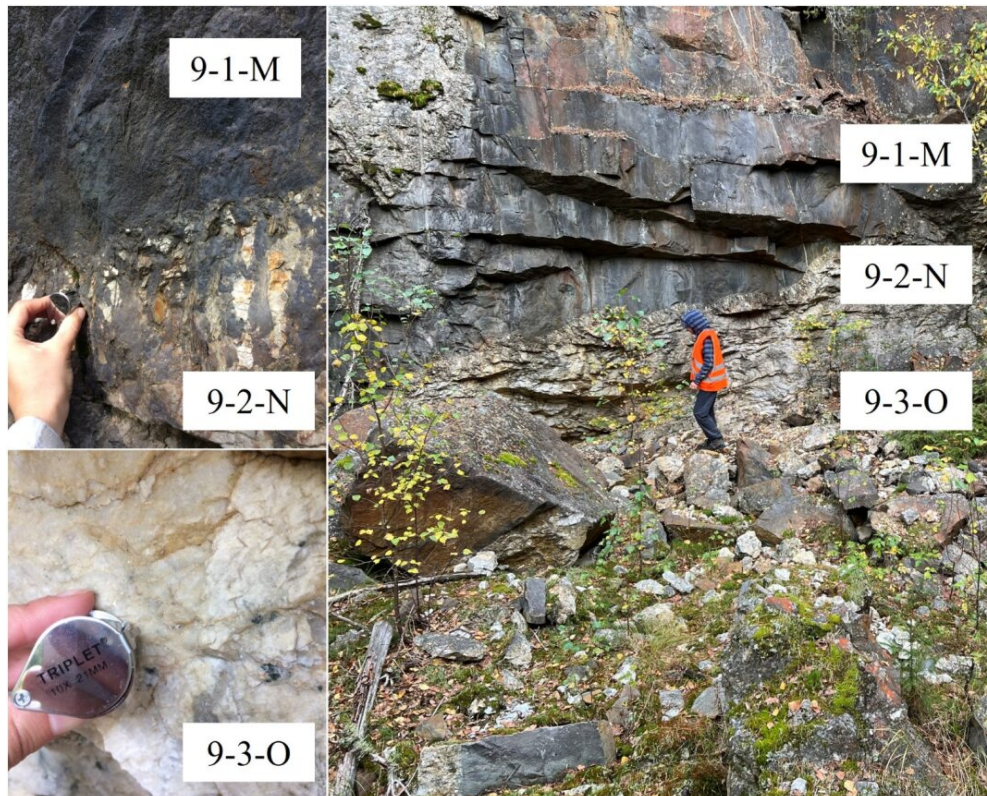


Abb. 7: Standort 9 bei Viitaniemi mit eingezeichneten Probepositionen.

4.3.2. Dünnschliffe

Bei den Kapiteln zu den Dünnschliff-Resultaten wurden für jeden Standort die erstellten Dünnschliffe genauer unter dem Polarisationsmikroskop betrachtet. Dabei konnte die Probe ohne Analysatorfilter betrachtet werden, sogenannte einfach polarisiert. Andererseits konnte der Dünnschliff mit eingeschaltetem Analysatorfilter untersucht werden, mit sogenannter gekreuzter Polarisation. Die Abbildungen der Dünnschliffe zeigen den selben Bildausschnitt jeweils links ohne und rechts mit Analysatorfilter. Im Folgenden wird der Analysatorfilter nur Filter genannt. Wird ein Mineral neu erwähnt, wird genauer beschrieben, wie es sich unter dem Polarisationsmikroskop mit und ohne Filter verhält.

Der Dünnschliff in Abb 8 wurde vom Gesteinstyp von Probe 9.1.M erstellt, jedoch direkt im Übergang zum Gesteinstyp von Probe 9.2.N. Es sind im Dünnschliff die Mineralien Plagioklas, Quarz und Clinopyroxen (CPX) erkennbar. Ohne Filter erscheinen diese Mineralien farblos, man kann aber die einzelnen Minerale anhand der klar sichtbaren Grenzen von den anderen unterscheiden, dem sogenannten Relief. Mit Filter erkennt man Plagioklas daran, dass er ein graues Streifenmuster aufweist. Quarz ist bestimmbar durch die gleichmässig graue Farbe und daran, dass die ganze Quarz-Fläche beim Drehen des Objektträgers gleichzeitig auslöscht, also dunkel wird. Clinopyroxen (CPX) ist an seiner schillernd bunten Färbung erkennbar, die sich beim Drehen des Objektträgers verändert.

Der Dünnschliff in Abb. 9 wurde ebenfalls direkt am Übergang von 9.1.M zu 9.2.N erstellt, aber im Gesteinstyp 9.2.N. Hier finden sich die Mineralien Quarz, Amphibol und Magnetit. Amphibol und Magnetit weisen bereits ohne Filter eine Färbung auf: Amphibol ist braun, Magnetit dunkel. Mit Filter ist Amphibol

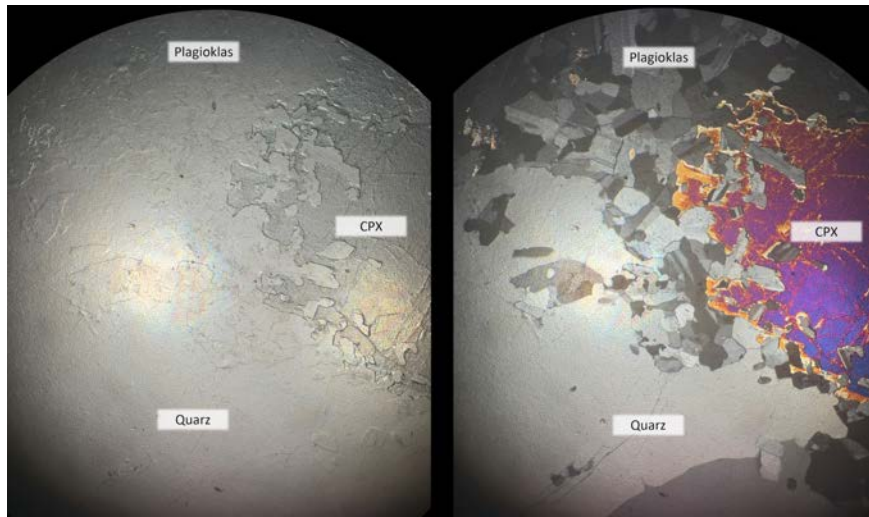


Abb. 8: Dünnschliff zum Gesteinstyp von Probe 9.1.M direkt im Übergang zum Gesteinstyp von Probe 9.2.N. Links: ohne Filter, rechts: mit Filter.

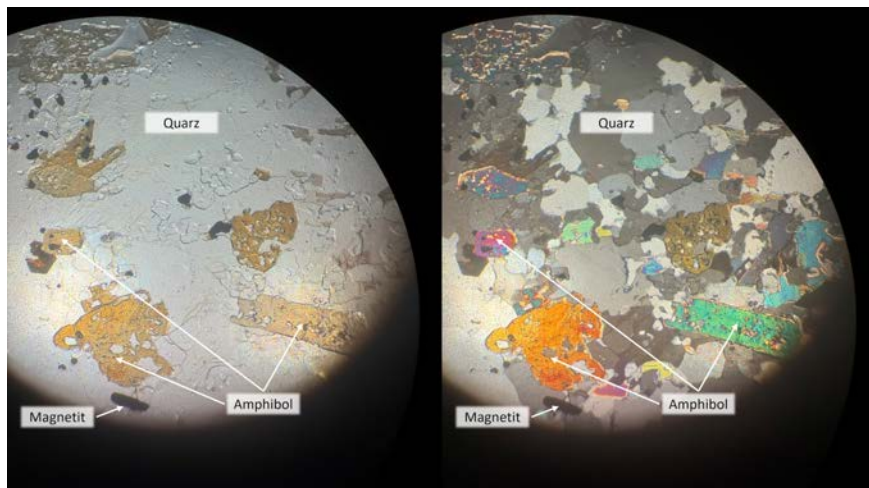


Abb. 9: Dünnschliff zum Gesteinstyp von Probe 9.2.N direkt im Übergang zum Gesteinstyp von Probe 9.1.M. Verschiedene Mineralien sind erkennbar.

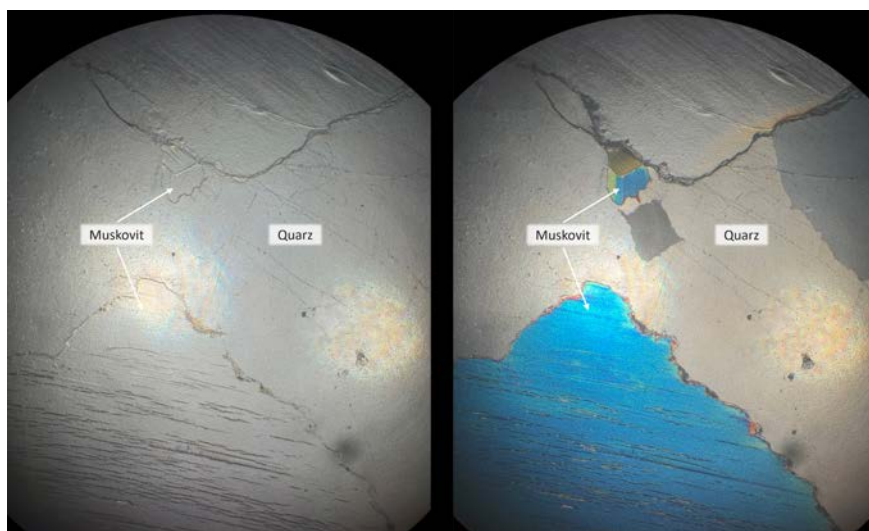


Abb. 10: Dünnschliff im Zentrum des Gesteinstyps von Probe 9.2.N. Hier sind primär die beiden Minerale Quarz und Muskovit vorhanden.

schillernd farbig und die Färbung ändert sich beim Drehen des Objektträgers, der Magnetit bleibt weiterhin dunkel.

Der Dünnschliff in Abb. 10 wurde im zentralen Bereich des Gesteinstyps 9.2.N erstellt. Hier treten die Mineralien Quarz und Muskovit auf. Beide sind ohne Polarisationsfilter farblos und nur unterscheidbar durch die klaren Grenzen und das unterschiedliche Muster, das sogenannte Relief. Mit dem Filter erscheint der Muskovit schillernd farbig und zeigt an den Rändern verschiedene Farben.

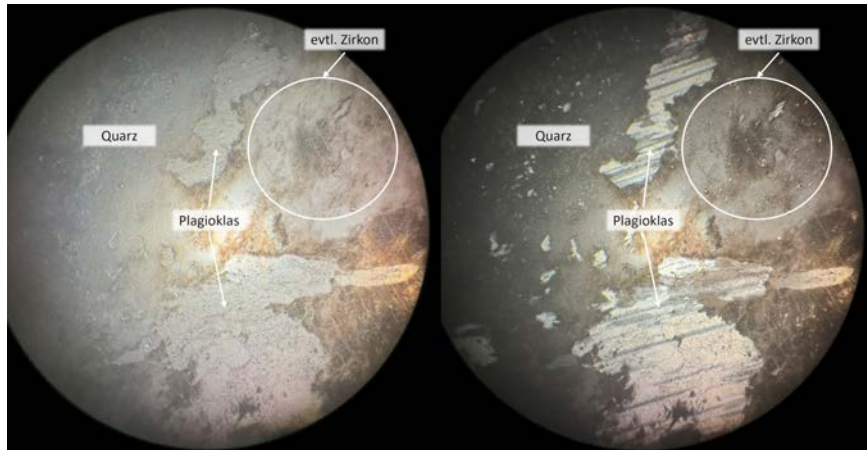


Abb. 11: Dünnschliff Probe 9.3.O, heller Teil mit Quarz, Plagioklas und evtl. Zirkon.

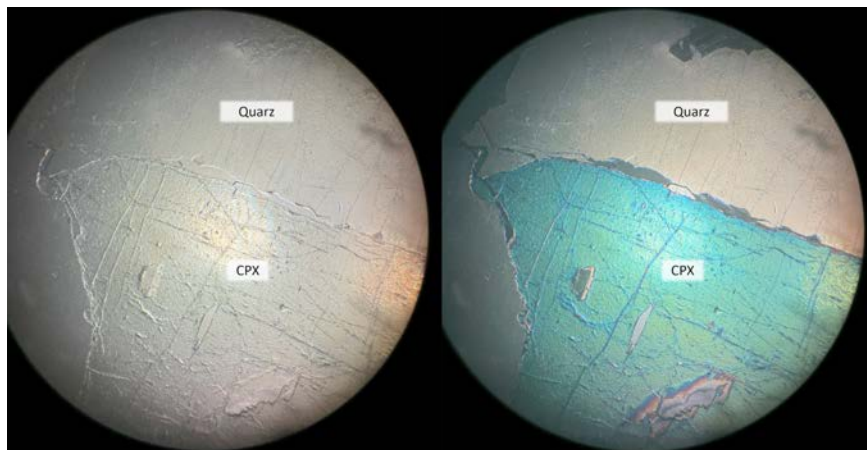


Abb. 12: Dünnschliff Probe 9.3.O, dunkler Teil mit Quarz und Clinopyroxen (CPX).

Die Probe 9.3.O zeigt als Handstück in der Gesteinsbestimmung zwei dominante Mineralien, Quarz und Feldspat, welche eher hell gefärbt sind (vgl. Abb. 7). Es sind im Handstück jedoch auch kleinere dunkle Mineralien vorhanden, welche visuell als Clinopyroxen eingeschätzt wurden. Wenn diese Probe 9.3.O nun als Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop betrachtet wird, können ebenfalls diese zwei Bereiche (der helle Bereich in Abb. 11 und der dunkle Bereich in Abb. 12) im Detail betrachtet werden. Im hellen Teil der Probe (siehe Abb. 11) lassen sich die Mineralien Quarz und Plagioklas erkennen. Zusätzlich findet man kleinere Einschlüsse im Quarz. Es könnte sich dabei um Zirkon handeln, dies konnte jedoch nicht genauer überprüft werden. Untersucht man den dunklen Bereich der Probe 9.3.O, sind im Dünnschliff (siehe Abb. 12) tatsächlich Quarz und Clinopyroxen (CPX) erkennbar.

4.3.3. Elementanalyse mit XRF

Bei der Gegenüberstellung der Hauptoxide und SiO_2 (siehe nochmals Diagramm in Abb. 6, mit beschrifteten Proben von Standort 9 in gelb) fallen die Proben von Standort 9 im Vergleich zu den anderen gemessenen Proben auf. Oftmals liegen diese Proben weit unter- oder oberhalb der linearen Trendlinie aller gemessener Proben. Die Probe 9.2.N beispielsweise enthält trotz des hohen SiO_2 -Gehalts fast kein Natriumoxid. Theoretisch würde ein typisches magmatisches Gestein mit diesem hohen SiO_2 -Gehalt einen hohen

Natriumoxid-Gehalt zeigen. Die Probe 9.2.N ist jedoch kein typisches magmatisches Gestein sondern eine Pegmatit-Probe mit viel Muskovit. Dies könnte die Abweichung von der Theorie teilweise erklären, da Muskovit kein Natrium enthält. Weder Probe 9.2.N noch Probe 9.3.O enthalten Kalziumoxid (CaO), im dunklen Grundgestein 9.1.M wurde jedoch etwas Kalziumoxid nachgewiesen. Dieses Muster zeigt sich bei fast allen typisch mafischen Oxiden (Oxide von Ca, Fe, Mg, Ti). Nur beim Aluminiumoxid konnten bei allen drei Proben von Standort 9 ähnliche Werte zwischen 14 und 19 % festgestellt werden. Generell gesehen sind also die mafischen Komponenten im dunklen Grundgestein in normaler oder leicht überdurchschnittlicher Menge vorhanden. Jedoch sind diese mafischen Komponenten im pegmatitischen Ganggestein (in 9.2.N und 9.3.O gleichermassen) praktisch nicht enthalten.

Spurenelemente werden in Mineralien vor allem dann eingebaut, wenn sie ein chemisch ähnliches Element im Mineral ersetzen können. Ein Beispiel dafür ist das Spurenelement Rubidium (Rb), welches das häufige Element Kalium (K) ersetzen kann. Als wichtiger geochemischer Index wird normalerweise das molare Verhältnis von Kalium zu Rubidium (K/Rb) gebildet um herauszufinden, wie stark das Kalium durch Rubidium ersetzt wurde. Ein tiefes Verhältnis von $K/Rb < 150$ zeigt, dass viel Kalium in Muskoviten oder Feldspäten durch Rubidium ersetzt wurde. Ein tiefes Verhältnis von $K/Rb < 150$ ist aber auch ein Indikator dafür, dass eine Pegmatit-Bildung hydrothermal erfolgte, also Wasser von hoher Temperatur beteiligt war [14, 15].

Die Berechnung des K/Rb-Verhältnisses zeigte beim Standort 9 Werte weit unter 150 an (9.1.M: 82.6, 9.2.N: 74.5 und 9.3.O: 100.7). Diese Werte weisen darauf hin, dass der Pegmatit von Standort 9 hydrothermal gebildet wurde. Bei fast allen restlichen gemessenen Proben liegt das K/Rb-Verhältnis über 150. Die eine Ausnahme ist Probe 13.1.Y mit $K/Rb = 146.9$, siehe Resultate von Standort 13. Die andere Ausnahme ist Probe 6.1.J. ($K/Rb = 150.1$), welche auffallend grosse Kristalle enthält und auch pegmatitisch sein könnte. Auch im K/Rb-Diagramm (siehe Abb. 13) fallen die Proben von Standort 9 auf. Die Proben von Standort 9 enthalten viel Rubidium (> 500 ppm). Der besonders hohe Kalium-Gehalt in Probe 9.3.O ist nachvollziehbar, da diese Probe praktisch nur aus Quarz und Feldspat besteht.

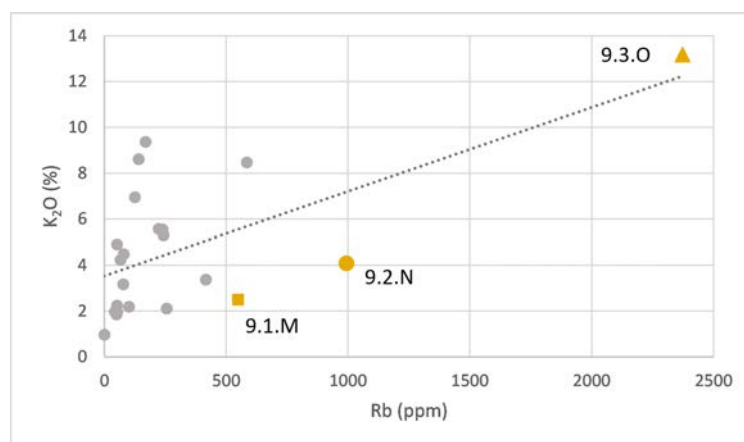


Abb. 13: Gegenüberstellung von Kaliumoxid und Rubidium. Die Proben von Standort 9 sind hervorgehoben, die restlichen Proben sind grau dargestellt.

4.3.4. Pegmatit-Aufbau

Der gefundene Gang am Standort 9 entspricht ziemlich exakt dem Schema eines Pegmatits (siehe erneut Abb. 2). Der Übergang zwischen dem Umgebungsgestein (9.1.M) und der Grenzzone des Pegmatits (9.2.N) ist sichtbar oben links in Abb. 7 und wird auch in den Dünnschliffen in Abb. 8 und Abb. 9 gezeigt. Die Probennahme der Gesteinsstücke von Probe 9.2.N fand etwas weiter entfernt von der Pegmatit-Übergangszone statt. In Probe 9.2.N sind grössere Muskovite und fast idiomorphe Quarz-Kristalle sichtbar. Dies spricht dafür, dass Probe 9.2.N bereits aus der Zwischenzone des Pegmatits stammt. Bei der Probe 9.3.O handelt es sich wohl noch nicht um die Kernzone, da darin neben Quarz auch noch viel Feldspat vorhanden ist. Die tatsächliche Kernzone konnte nicht beprobt werden, da sie von Schutt bedeckt war. Die Kristallgrösse nimmt beim gefundenen Gang an Standort 9 tendentiell von der Grenzzone zur Kernzone hin zu. Der gefundene Gang an Standort 9 entspricht also nach verschiedenen Kriterien fast dem Idealbild eines Pegmatits [3].

4.4. Steinbruch Ristikuusi (Standort 13)

4.4.1. Probennahme und grobe Bestimmung

Der Steinbruch Ristikuusi östlich des Lagerhauses (Standort 13) konnte detailliert beprobt werden (siehe Abb. 14). Auffällig sind die verschiedenen Gänge, die an diesem Aufschluss das Grundgestein durchstossen. Die Gänge durchschneiden einander, wodurch die zeitliche Abfolge der Bildung einiger Gänge ersichtlich wird. Durchschneidet einer der Gänge einen anderen, so ist dieser zeitlich gesehen später entstanden. Ersichtlich ist dies in der Abb. 15 beim horizontalen rot markierten Gang, der die vertikalen blau und gelb markierten Gänge durchschneidet. Somit ist dieser der jüngste. Um herauszufinden, worin sich die Zusammensetzung der Gänge unterscheidet, wurde von jedem Gang mindestens an einer Stelle eine Probe genommen.



Abb. 14: Standort 13 beim Steinbruch Ristikuusi. Man beachte im Vergleich mit Abb. 15, dass einige Gänge bereits ohne Markierung klar erkennbar sind. Ersichtlich ist in dieser Abbildung ebenfalls, dass der in Abb. 15 rot markierte horizontale Gang den gelb markierten vertikalen Gang durchschneidet.

Die Proben, die im Bericht besprochenen werden, sind ebenfalls in der Abb. 15 eingezeichnet. Es werden nur sechs von neun gesammelten Proben besprochen, nämlich 13.1.Y, 13.2.Z, 13.3.AA, 13.4.AB, 13.7.AE und 13.8.AF, da bei den übrigen keine XRF-Beprobung vorgenommen wurde.

Beim dunklen Grundgestein (Probe 13.2.Z) konnten von Auge die Mineralien Magnetit und Feldspat erkannt werden. Es handelt sich um einen Diorit. Das Grundgestein ist an einigen Stellen magnetischer als an anderen. Die Gänge bestehen aus rötlichem granitischem Gestein mit Kalifeldspat und Quarz (Abb. 15: Proben 13.1.Y links in rot, 13.4.AB in blau und 13.7.AE rechts in rot). Die Probe 13.8.AF wurde nicht im Detail bestimmt. Die auffällige grün-braune Fläche (Probe 13.3.AA in gelb) liegt als eine dünne Schicht von grünen Kristallen vor und wird im Kapitel 4.4.2 im Detail besprochen.

4.4.2. Fokus auf Probe 13.3.AA

Insbesondere wurde bei der Bestimmung der Mineralien von der Probe 13.3.AA ein Fokus auf das grüne Mineral gelegt, da es nur bei dieser Probe vorkommt. Bei der Bestimmung von Hand kamen verschiedene Mineralien infrage, weshalb der Dünnschliff zur Hilfe genommen wurde. Unter dem Polarisationsmikroskop sind in Probe 13.3.AA sowohl Quarz als auch Alkalifeldspat erkennbar (siehe Abb. 16). Das grüne Mineral ist als Bänderung in der Dünnschliff-Probe enthalten. Es zeigt ohne Analysatorfilter (Abb. 16 links) eine dunkle Farbe und mit Filter leuchtend-bunte Interferenzfarben (Abb. 16 rechts). Zusätzlich wurden die XRF-Resultate zur Bestimmung des grünen Minerals hinzugezogen. Im Vergleich zum Umgebungsgestein (13.2.Z) und zu den verschiedenen Gängen enthält die Probe 13.3.AA erhöhte Kalzium- und Eisen-Gehalte, jedoch einen tiefen Magnesium-Gehalt. Durch die Kombination der Dünnschliff-Merkmale mit den XRF-Resultaten der Probe konnte das grüne Mineral als Epidot bestimmt werden. Epidot weist eine doppelprismatische Kristallform auf und enthält Kalzium und Eisen, aber kein oder kaum Magnesium. Unter dem

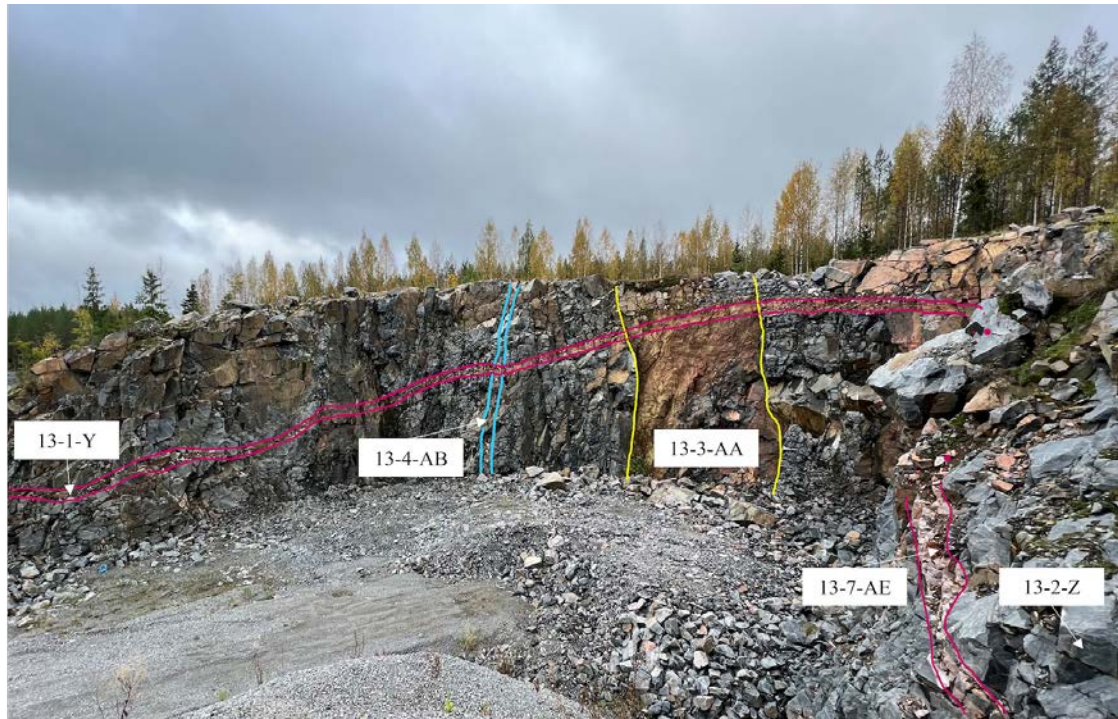


Abb. 15: Standort 13 mit eingezeichneten Probennummern und markierten Gängen. Probe 13.8.AF befindet sich ausserhalb des Ausschnitts.

Polarisationsmikroskop sollte Epidot die in der Dünnschliff-Probe beobachtete leuchtend-bunte Interferenzfarbe zeigen. Sowohl die Interferenzfarben im Dünnschliff, die von Auge sichtbaren Merkmale, als auch die Elementgehalte der Probe 13.3.AA stimmen mit den oben genannten Charakteristika von Epidot überein. Bei Epidot handelt es sich um eine hydrothermale Kluftfüllung, welche bei niedriggradiger Kontaktmetamorphose entsteht. Aufgrund des Metamorphosegrads kann der Epidot der Grünschiefer-Fazies zugeordnet werden, welche bei relativ schwacher Metamorphose an einer Kontaktfläche entstehen kann. Daher wurde die Hypothese aufgestellt, dass der Epidot bei der Kontaktmetamorphose vom dioritischen Umgebungsgestein und dem granitischen Ganggestein entstanden ist. Dabei könnte das Eisen im Epidot aus dem Umgebungsgestein (vgl. Probe 13.2.Z) und das Kalzium aus dem Feldspat des Gangmaterials stammen.

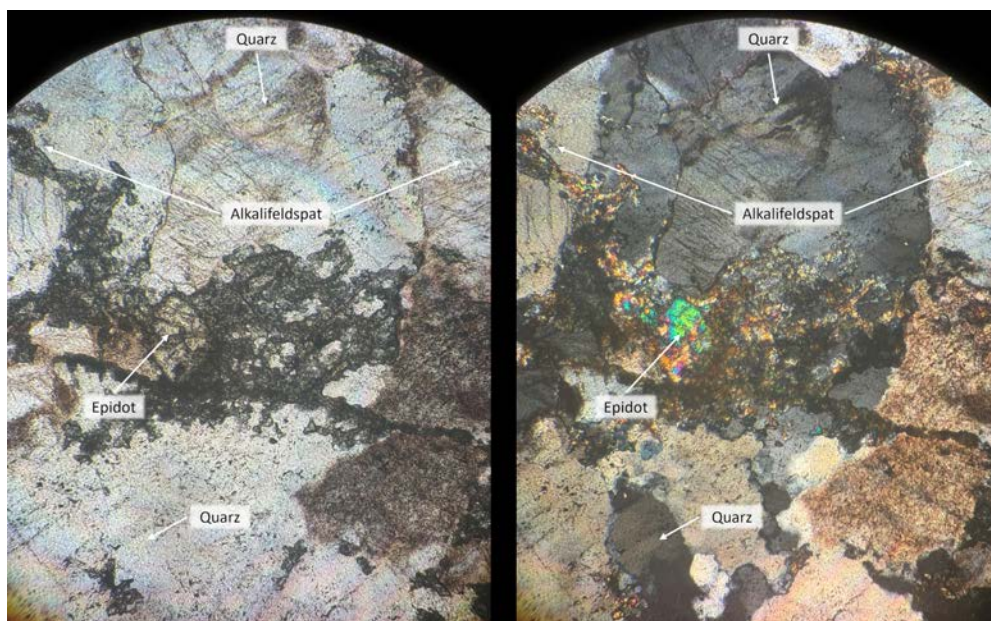


Abb. 16: Dünnschliff Probe 13.3.AA.

4.4.3. Elementanalyse mit XRF

Die Resultate der Elementanalyse der Proben von Standort 13 (siehe Abb. 17) entsprechen ziemlich genau den Trends über alle Proben (siehe nochmals Abb. 6). Auch in den Proben von Standort 13 sind die typischen mafischen Elemente (Al, Fe, Ca, Mg) in den Proben mit tiefem SiO_2 -Gehalt angereichert (siehe Abb. 17, Subgrafiken A–D). Dieser Trend ist anhand der Theorie für magmatische Gesteine erwartbar. Die Grundgestein-Probe 13.2.Z und die ähnliche Probe 13.7.AE enthalten relativ viel Natriumoxid, trotz ihres tiefen SiO_2 -Gehalts (siehe Abb. 17, Subgrafik E). Die Probe 13.1.Y aus dem horizontalen Gang enthält jedoch noch mehr Natriumoxid mit einem hohen SiO_2 -Gehalt. Wenn die Trendlinie nur über die Proben von Standort 13 gebildet wird, entspricht der Natriumoxid-Trend der Theorie für magmatische Gesteine, und die Menge Natriumoxid nimmt mit zunehmendem SiO_2 zu. Über alle Proben hinweg zeigt sich nämlich nur ein diffuser Trend für Natriumoxid. Dieser diffuse Natriumoxid-Trend wird von Proben von anderen Standorten verursacht.

Die besondere Probe 13.3.AA ist über alle Proben hinweg eine der Proben mit dem tiefsten SiO_2 -Gehalt von etwa 52 %. Das Grundgestein (Probe 13.2.Z) hat einen SiO_2 -Gehalt von etwa 63 %. Einen ähnlichen Wert von 62 % zeigt erstaunlicherweise die Probe 13.7.AE, da diese Probe eigentlich im gleichen horizontalen Gang genommen wurde wie 13.1.Y. Entweder wurde bei der Messung von 13.7.AE noch Grundgestein mitgemessen, oder der horizontale Gang hat tatsächlich unterschiedliche Bestandteile. Die Elementverteilung von Probe 13.1.Y aus dem horizontalen Gang ähnelt eher dem vertikalen anderen Gang 13.4.AB. Ebenfalls ähnlich dazu ist die Probe 13.8.AF, die an einem leicht anderen Standort genommen wurde und nicht weiter besprochen wird. Diese drei Standorte haben einen SiO_2 -Gehalt um 75 %. Diese Ganggesteine sind granitischer und felsischer als das intermediäre Diorit-Grundgestein (Probe 13.2.Z). Alles in allem zeigt Standort 13 ein typisches Muster entsprechend der Theorie für magmatische Gesteine.

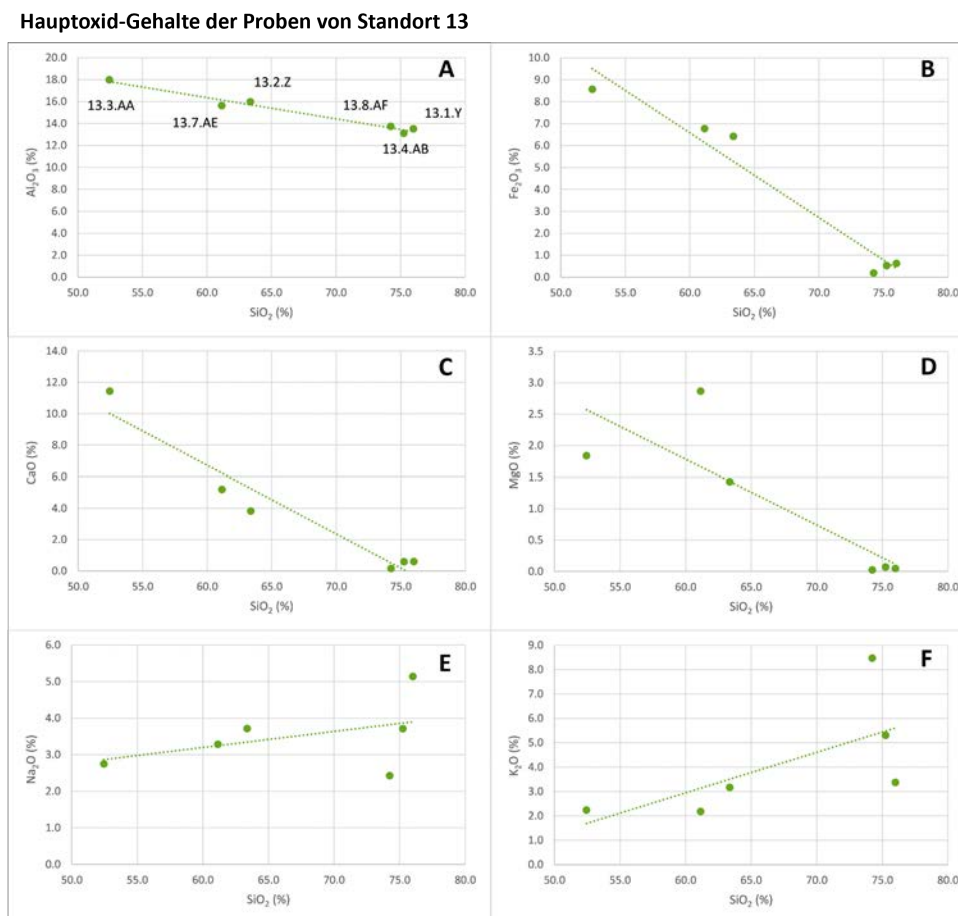


Abb. 17: Elementanalyse der Proben von Standort 13 mit einer Auswahl von Hauptoxiden dargestellt gegenüber SiO_2 . Man beachte erneut, dass sich immer SiO_2 auf der x-Achse befindet, die Standorte also von links nach rechts geordnet sind.

5. Fazit

Die Vielfalt an geeigneten und zugänglichen Standorten überraschte die Projektgruppe positiv. Sowohl die ersten besuchten Standorte 0-8 als auch die Standorte 11-12 waren relativ unspektakulär. Der sehr bekannte Steinbruch Viitaniemi (Standort 9) war darauffolgend ein Highlight. Erstaunlich waren die Steinbrüche der Standorte 13 und 14, die weniger als 10 km vom Lagerhaus entfernt lagen. Diese Standorte wurden erst vor Ort durch andere Projektgruppen beziehungsweise durch Recherche auf lokalen Karten gefunden. Rückblickend wäre ein detaillierter Fokus auf einige wenige Standorte ideal gewesen, jedoch wurden die tollsten Standorte erst gegen Ende des Lagers entdeckt.

Im diesjährigen Projekt wurden anders als in einigen vorangegangenen Geologie-Projekten Glaspillen für die XRF-Analysen erstellt. Diese Methode eignet sich besonders für magmatische und metamorphe Gesteine. Mit einem für Gesteine kalibrierten XRF-Messgerät konnten die Glaspillen am Institut für Geochemie und Petrologie der ETH Zürich gemessen werden. Die Vielfalt von spannenden Standorten wurde durch akribische Laborarbeit und Gesteinsbestimmung erforscht. Der vorliegende Bericht konnte nur einen Ausschnitt der erhaltenen Daten aufzeigen.

6. Dank

Wir bedanken uns herzlich bei allen Beteiligten für ihre Hilfe beim Projekt. Bei Adrian Blatter (Kanti Wattwil) bedanken wir uns für seine Hilfe bei der Gesteinsbestimmung und der Datenauswertung. Für den Zugang zum Steinbruch Viitaniemi danken wir Saga Jenniina und Arja Valiaho vom Gesteinsmuseum in Eräjärvi. Wir konnten die Laborarbeiten am Institut für Geochemie und Petrologie der ETH Zürich durchführen. Dabei bedanken wir uns insbesondere bei Lydia Zehnder für die Unterstützung bei der Laborarbeit und für die XRF-Messungen. Unser Dank gilt ebenfalls Romain Alosius für das Sägen unserer Proben und Andreas Jallas für die Herstellung der Dünnschliffe.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Grotzinger J. und Jordan, T., «Press/Siever Allgemeine Geologie», Springer Spektrum, 7, 1–769 (2017).
- [2] Schorn S., «Mineralogische Beschreibung von magmatischen Gesteinen nach Streckeisen», <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/QAPF> (Zugriff 04.01.2024).
- [3] Perkins D., «Petrology: An Introduction to Igneous and Metamorphic Rocks and Processes», University of North Dakota, <https://opengeology.org/petrology/> (Zugriff 04.01.2024, Stand 2022).
- [4] Lahtinen R., «Main geological features of Fennoscandia», in «Geological Survey of Finland», Special Paper 53, 13–18 (2012).
- [5] Nironen M., «Summary: Central Finland granitoid complex – Explanation to a map», Tutkimusraportti - Geologian Tutkimuskeskus, 1–45 (2003).
- [6] Hanski E., «Synthesis of the Geological Evolution and Metallogeny of Finland», Mineral Deposits of Finland, 39–71 (2015).
- [7] Fischer G. und Bohrmann G., «Skript Übung Gesteinsbestimmung», https://www.geo.uni-bremen.de/statisch/inf_b_downloads/442/Skript_Gesteinskunde_ISSU.pdf (Zugriff 06.12.2023).
- [8] Anonym, «Optical properties of minerals», <https://geologyscience.com/geology/optical-properties-of-minerals/> (Zugriff 06.12.2023).
- [9] Poetsch C. und Seybold L. «Erzeugung von linear polarisiertem Licht», https://geowiki.geo.lmu.de/wiki/Erzeugung_von_linear_polarisiertem_Licht#Analysator (Zugriff: 15.02.2024).

- [10] Stosch H.-G., «Skript zur Kristalloptik II – Mineralmikroskopie», [https://www.agw.kit.edu/downloads/Studiengang/Kristalloptik%20-%20Mineralmikroskopie%20\(Stosch,%2021MB\).pdf](https://www.agw.kit.edu/downloads/Studiengang/Kristalloptik%20-%20Mineralmikroskopie%20(Stosch,%2021MB).pdf) (Zugriff 15.02.2024, Stand 14.10.2009).
- [11] «QGIS – Ein freies Open-Source-Geographisches-Informationssystem», <https://www.qgis.org/de/site/> (Version 3.28.0 Firenze).
- [12] Geological Survey of Finland GTK, «TK Kalliopera WMS (MapServer)», https://gtkdata.gtk.fi/arcgis/rest/services/Rajapinnat/GTK_Kalliopera_WMS/MapServer (Zugriff 25.02.2024).
- [13] Lahti, S. I., «On the granitic pegmatites of the Eräjärvi area in Orivesi, southern Finland», Geological Survey of Finland, Bulletin **314**, 1–82 (1981).
- [14] Steiner B., «Tools and workflows for grassroots Li–Cs–Ta (LCT) pegmatite exploration», Minerals, **9** (8), 1–23 (2019).
- [15] Ballouard C., Poujol M., Boulvais P., Branquet Y., Tartèse R. und Vignerresse J.-L., «Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition», Geology **44** (3), 231–234 (2016).

Die Flechtendiversität in der Umgebung von Rajala, Finnland

Thomas Albrecht, Gian Flurin Gantenbein, Madlaina Gantenbein,
Fiona Gubelmann, Jonas Jaskolski, Yannik Lützen

1. Einführung

Eine Flechte ist eine Symbiose zwischen einer Alge und einem Pilz. Weltweit existieren circa 25 000 Arten. Bei diesem Projekt war das Ziel, in der Region rund um unseren Lagerort Rajalan leirikeskus die Diversität der Flechten zu erfassen. Es ist interessant, Flechten zu erforschen, da sie Teil der Biodiversität eines Ökosystems sind und ein guter Indikator für die Luftqualität einer Region sind. Zudem treten sie in einer grossen Vielfalt von Aussehen, Form und Grösse auf.

Das Projekt wurde in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil ging es um das Sammeln möglichst vieler verschiedener Flechtenarten in der Umgebung von Rajala. Im zweiten Teil wurden Flechten in verschiedenen alten Wäldern untersucht, um so Zusammenhänge zwischen dem Waldalter und der Diversität der Flechten zu studieren. Total wurden 294 Proben von Flechten genommen. Die Arten der Flechten wurden durch Untersuchungen des Substrats, Nachweis artspezifischer Flechtenmerkmale und die Anwendung chemischer Tests bestimmt.

2. Theorie

2.1. Allgemeines

Flechten sind überall auf der Welt vertreten und können mit Hilfe ihrer Symbiosepartner auch in Lebensräumen überleben, die zum Beispiel extrem heiss, kalt oder trocken sind. Es gibt rund 25 000 verschiedene Arten, wobei aber nur 2000 Arten in Mitteleuropa vorkommen [1]. Dies ist eine ähnlich hohe Vielfalt wie z. B. bei Moosen. Flechten werden aufgrund ihrer Wuchsform in drei Gruppen eingeteilt, nämlich Blatt-, Strauch- und Krustenflechten. Auf eine Unterart der Strauchflechten, die Bartflechten, wurde speziell geachtet. Die Krustenflechten wurden hingegen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da sich die Bestimmung aufgrund der enormen Vielfalt der Krustenflechten als äusserst komplex erweist.

2.2. Spezifische Merkmale einer bestimmten Flechte

Der Aufbau einer Flechte ist in Abb. 1 vereinfacht dargestellt. Dieser ist wichtig für die Bestimmung der Flechte und sollte daher möglichst genau erfasst werden. Der sichtbare Flechtenkörper wird Lager oder auch Thallus genannt. Die sogenannte obere Rinde, welche die Ober- und Unterseite des sichtbaren Flechtenkörpers bedeckt, ist ein dichtes Pilzgeflecht und bildet die äusserste Schicht (A). Dieses schützt die Flechte vor der Aussenwelt und hat die Aufgabe, Wasser und die darin gelösten Mineralstoffe aufzunehmen, und Schutz gegen Krankheitserreger und gegen das intensive Sonnenlicht zu bieten. Die Verdunstung des Wassers kann jedoch nicht verhindert werden. Zwischen den Rinden liegt der eigentliche Flechtenkörper, welcher auch das Mark genannt wird. Die Schicht unter der oberen Rinde beherbergt Algenzellen (B). Diese übernehmen die Funktion der Photosynthese. Darunter befinden sich die Hyphen (einzelne Pilzfäden, C), deren Hauptaufgabe die Verteilung von Nährstoffen innerhalb der Flechte ist. Die unterste Schicht besteht wiederum aus einem dichten Pilzgeflecht (Innenrinde) mit Haftorganen (Rhizinen, D) [3].

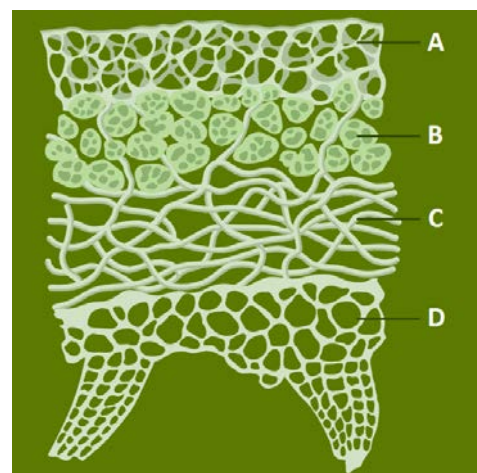


Abb. 1: Grafik zum Aufbau einer Flechte (bearbeitet nach [2]).

Flechten verfügen über viele äusserlich erkennbare Merkmale. Diese kommen nicht immer bei allen Flechten vor, doch kann auch das Fehlen bestimmter Merkmale charakteristisch für eine bestimmte Flechtenart sein. Die visuelle Bestimmungsarbeit in diesem Projekt fokussierte sich auf die fünf auffälligsten Merkmale einer Flechte.

Auffälligere Auswüchse des Thallus, welche an kleine Trompeten erinnern können, werden Apothezien genannt. Sie sind flach und scheibenförmig und besitzen meistens einen Rand. Dieser Rand kann sowohl gleichfarbig als auch andersfarbig als das Innere der Scheibe sein (vgl. Abb. 2a). Apothezien sind die Fortpflanzungsorgane der Flechte, sie beherbergen die Sporenlager mit Pilzsporen.

Auf der Oberfläche des Thallus, vor allem an seinem Rand, kann es zudem noch Cilien geben (vgl. Abb. 2b). Diese sehen aus wie kleine Härchen. Sie haben meistens die gleiche Farbe wie der Flechtenkörper.

Auf der Unterseite der Flechte befinden sich oft wurzelähnliche Fäden namens Rhizinen, die den Flechtenkörper mit dem Substrat verbinden. Sie sind am Rand der Flechte oder nach dem Entfernen vom Substrat ersichtlich. Meistens sind sie braun bis schwarz gefärbt. Rhizinen können mit Wurzeln verglichen werden, dienen aber lediglich zur Befestigung der Flechte am Substrat und nicht zur Nährstoffaufnahme (vgl. Abb. 2c).

Ein weiteres Merkmal sind die Sorale. Sorale sind eine Ansammlung von Soredien. Diese sehen aus wie lose Staubkörner auf der Oberfläche der Flechte. Sie können durch den Wind verweht werden und bilden neue Flechten, wenn sie an einem Ort mit guten Konditionen landen (vgl. Abb. 2d).

Das letzte Erkennungsmerkmal sind die Isidien. Dies sind Auswüchse des Flechtenkörpers. Die Form kann von kugelrund zu stiftförmig oder korallenartig verzweigt sehr variieren. Wenn Isidien abbrechen, werden sie ebenfalls vom Wind verweht und bilden neue Flechten (vgl. Abb. 2e).



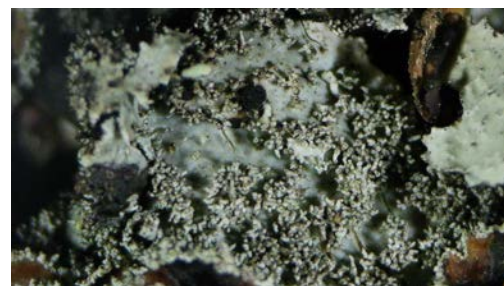
(a) Apothezien.



(b) Cilien [4].



(c) Rhizinen [5].



(d) Sorale.



(e) Isidien.

Abb. 2: Eine Übersicht über die fünf Merkmale zur Unterscheidung von Flechten.

2.3. Wuchsformen

2.3.1. Blattflechten

Um Halt am Substrat zu finden, haben Blattflechten verschiedene Typen von Haftorganen. Die häufigste Art sind Rhizinen (siehe Abb. 2c). Blattflechten wachsen von einem Punkt aus flach auf einer Oberfläche, und fixieren sich mit den Rhizinen zusätzlich an dieser Oberfläche.

Blattflechten wachsen durch ein Längenwachstum der Lappen, die sich unregelmässig gabeln. Egal in welche Richtung ein Lappen wächst, bleiben die Wachstumsgeschwindigkeit und die Anzahl der Gabelungen grundsätzlich gleich. Dies führt unter idealen Bedingungen zu einem kreisförmigen Lager (vgl. Abb. 3a) [6].

2.3.2. Strauchflechten

Strauchflechten bilden Lager, die frei in den Raum wachsen und vom Substrat deutlich abstehen. Diese Wuchsform ist lediglich an einem Punkt mit dem Substrat verbunden. Halt am Substrat finden die Strauchflechten entweder mithilfe eines krustenförmigen Geflechts, oder sie wachsen und verheddern sich mit anderer Vegetation wie Flechten, Moos oder Zwergsträuchern (vgl. Abb. 3b) [6].

Bartflechten sind eine Unterart der Strauchflechten. Sie sind sehr buschige Flechten, die meist von Bäumen herunterhängen. Bartflechten sind ein Merkmal für eine gute Luftqualität (vgl. Abb. 3c) [6].

2.3.3. Krustenflechten

Krustenflechten bilden die artenreichste Untergruppe der Flechten. Sie sind fest mit ihrem Substrat verwachsen und schwer davon zu trennen. Eine Krustenflechte besteht aus einem von 0.1 bis mehrere Millimeter grossen Lager. Dieses kann bei Austrocknung leichte Risse bekommen, und die einzelnen dadurch entstehenden Felder werden dann als Areolen bezeichnet. Lagerteile können sowohl flach, als auch kugelig, hochgewölbt oder korallenartig verzweigt sein (vgl. Abb. 3d) [7].



(a) Blattflechte.



(b) Strauchflechte.



(c) Bartflechte.



(d) Krustenflechte [7].

Abb. 3: Eine Übersicht über die unterschiedlichen Wuchsformen von Flechten.

3. Methodik

3.1. Feldarbeit

Bei der Probennahme an einem gewählten Standort wurde ein Quadrat mit einer Diagonale von 10 m ausgemessen und in diesem Proben von möglichst allen verschiedenen Flechtenarten entnommen. Dazu wurde die gewählte Flechte zuerst mit einer Pinzette vom Substrat gelöst und im Anschluss in einem Papiersack verpackt. Ausserdem wurden vor Ort wichtige Merkmale in Bezug auf Wuchsform und Aufbau der jeweiligen Flechte notiert. Bei jedem Quadrat wurden die Koordinaten des Mittelpunktes erfasst.

3.2. Bestimmung

Die Flechten wurden zuerst in ihre Untergruppen Blatt-, Strauch- oder Bartflechte eingeteilt. In diesen Untergruppen wurden dann weitere Unterteilungen anhand der sichtbaren Merkmale gemacht. Dazu wurden der Aufbau der Flechte, sowie ihre Farbe und das Substrat genutzt. Visuell sind die Unterschiede zwischen verschiedenen Arten oft unauffällig, was die Bestimmung für Personen mit geringer Expertise schwierig macht. Aufgrund der hohen Sammelmenge an Flechten und der begrenzten Zeit für Auswertungen wurde deshalb nur eine Flechte pro Gruppe genauer untersucht. Diese Flechte wurde unter dem Mikroskop betrachtet und anschliessend verschiedenen chemischen Tests unterzogen. Zur Bestimmung wurden zwei Bestimmungsbücher für Flechten verwendet [8, 9].

3.3. Chemische Reaktionen

Flechten reagieren je nach Art unterschiedlich auf bestimmte Chemikalien. Aufgrund von Farbveränderungen lässt sich die Art bestimmen oder zumindest eine mögliche Bestimmung einer Flechte bekräftigen. Solche Tests sind also ein wichtiger Teil der Bestimmung von Flechten. In diesem Projekt wurden vier verschiedene Tests genutzt, nämlich Lösungen von Kaliumhydroxid (K-Test), Natriumhypochlorid (C-Test), Salpetersäure (N-Test) und Jod (J-Test).

Für die Tests wurde jeweils eine Flechte unter dem Mikroskop platziert und mit einer Pipette und einem Skalpell Tropfen der Lösungen auf die Oberfläche und auch auf aufgeschnittene Teile der Flechte gegeben. Während des Auftragens der Lösung musste auf eine mögliche Farbveränderung geachtet werden. Die Verfärbungen können längerfristig bleiben, aber auch nur für eine Sekunde auftreten und dann wieder verschwinden.

3.4. Standorte

Es wurden Proben rund um die Lagerstätte Rajalan leirikeskus genommen. Auf der linken Karte in Abb. 4 ist unser Lagerort innerhalb von Finnland erkennbar. In der rechten Karte ist mit verschiedenen Farben gekennzeichnet, wo die verschiedenen Probengruppen gesammelt wurden. Näheres zur Farbcodierung ist später in diesem Kapitel erklärt. An der Westseite des Sees wurden viele Flechten entnommen, sowie nordöstlich von Rajalan leirikeskus. Ausserdem wurde als Sammelplatz für das Gebiet «Urwald» der Nationalpark Seitseminen genutzt.



Abb. 4: Gesamtübersicht über alle gesammelten Proben in der Region Rajala.

Insgesamt wurden die Standorte in drei Alterskategorien aufgeteilt: Jungwald, mittelalter Wald und Urwald. In diesen drei Kategorien wurden jeweils fünf Standorte zufällig ausgewählt. An diesen Standorten wurde von jeder Flechtensorte eine Probe genommen. So konnte versucht werden, auf die Flechtendiversität der verschiedenen Alterskategorien des Waldes zu schliessen. Die Standorte sind in Abb. 5 wie folgt farblich codiert: weiss für Jungwald, blau für mittelalten Wald und rot für Urwald. Zudem wurden einige Flechten, welche zufällig gefunden wurden (ohne taktisches Vorgehen) mit hellgrünen Punkten markiert. Diese werden im folgenden Beifang genannt. Flechtenproben um den Standort See sind mit violetten Punkten markiert. Die Probe auf der Insel (GPS-Nr. 44) ist hellblau markiert.

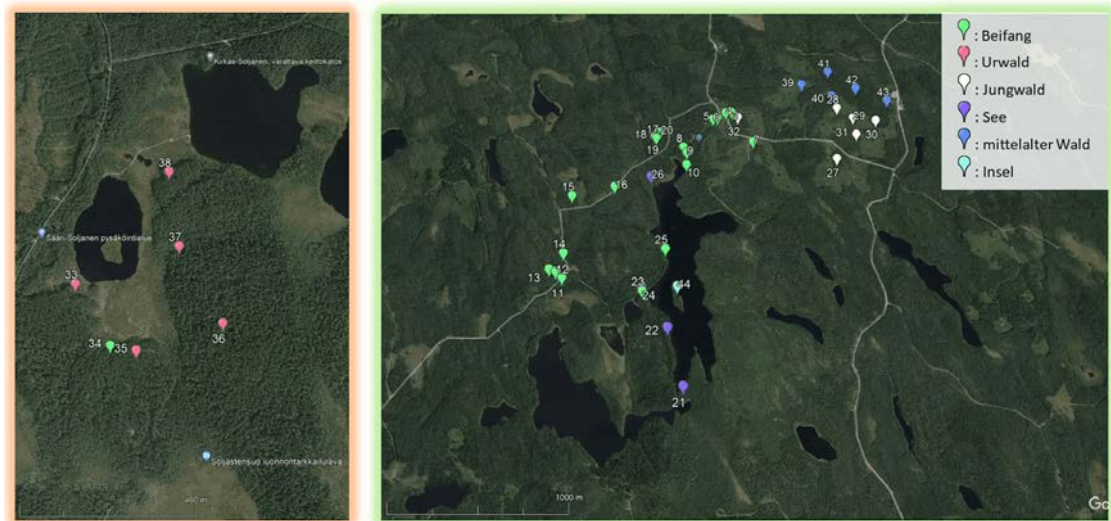


Abb. 5: Auf der linken Seite die Detailübersicht zum Gebiet Urwald und auf der rechten Seite zum jungen und mittelalten Wald.

4. Ergebnisse

4.1. Artenvielfalt

Die 294 gesammelten Flechten wurden optisch und chemisch in 88 unterschiedliche Gruppen eingeteilt. Diese Gruppen entsprechen nicht zwingend biologischen Arten und werden in Folge deshalb Typen genannt. Ein Teil dieser Typen wurde mithilfe chemischer Tests und Bestimmungsbüchern genauer bestimmt. In Abb. 6 sind die bestimmten Flechtenarten dargestellt.



(a) *Menegazzia terebrata*



(b) *Melanelixia subargentifera*



(c) *Hypogymnia physodes*



(d) *Lecidella elaeochroma*



(e) *Parmelia sulcata*



(f) *Massjukiella candelaria*

Abb. 6: Eine Auswahl der gesammelten Flechtenarten, die bestimmt werden konnten.

4.2. Diversität in Bezug auf das Waldalter

Im Jungwald wurden 25, im mittelalten Wald 34 und im Urwald 31 Typen identifiziert. Anhand derer Häufigkeiten an den verschiedenen Standorten konnten der Shannon-Index sowie die Evenness quantifiziert werden. Der Shannon-Index ist ein Mass für die Artenvielfalt wie auch die Variabilität von Vegetationen. Er nimmt bei grosser Artenvielfalt und hoher Variabilität zu. Die Evenness ergänzt diesen Index und beschreibt die Verteilung der Arten in den verschiedenen Vegetationstypen. Je näher die Evenness bei 1 liegt, desto regelmässiger sind die Arten verteilt. Die Berechnung dieser Werte wurde anhand der **academia-SOP-A0016** gemacht [10]. Dabei wurde anstelle des standardmässig verwendeten Deckungsgrades die Auftretensfrequenz der Typen für die Berechnung benutzt. Ausserdem wurde der Fehler der Indizes aufgrund der kleinen statistischen Basis nicht berechnet, weshalb die Resultate lediglich qualitativ zu verstehen sind. Die berechneten Werte befinden sich im zu erwartenden Wertebereich und sind in Tab. 1 dargestellt. Ebenfalls wurde ein Venn-Diagramm mit der Anzahl vorkommender Typen in den drei Wäldern angefertigt, dargestellt in Abb. 7.

	Jungwald	mittelalter Wald	Urwald
Shannon-Index	3.10	3.26	3.40
Evenness	0.96	0.92	0.99
Anzahl Typen	25	34	31

Tab. 1: Shannon-Indizes sowie Evenness und Anzahl Typen der drei untersuchten Wälder.

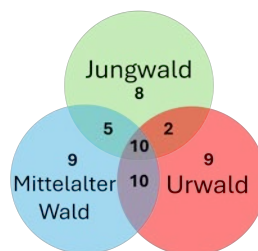


Abb. 7: Anzahl der Flechtenarten pro Wald.

4.3. Arten-Areal Beziehung

Mittels der Daten von den repräsentativen Standorten wurden eine Arten-Areal-Kurve sowie ihre doppelt-logarithmische Darstellung erstellt, die in Abb. 8 zu sehen sind. Sie geben die durchschnittliche Artenzahl in Beziehung zur Anzahl untersuchter Probestandorte (Plots) an, wobei die Balken die Standardabweichungen darstellen. Für die Erstellung des Diagramms wurde ein Programm genutzt, das anhand von tausendfachem zufälligem Kombinieren von Plots Mittelwerte bildet und somit einen Wert für die entsprechende Artenzahl berechnet.

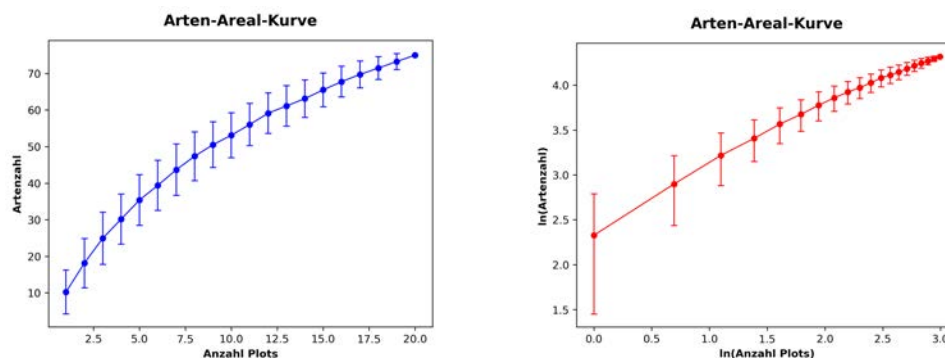


Abb. 8: Arten-Areal-Kurven mit Standardabweichungen als Balken dargestellt, rechts in doppelt-logarithmischer Darstellung.

5. Diskussion

5.1. Flechtenbestimmung

Die genaue Bestimmung der Flechten konnte aus zeitlichen Gründen nicht vollständig vorgenommen werden. Von den 88 Typen wurden 24 zur Bestimmung ausgewählt, wovon 11 Typen relativ gut auf Artebene bestimmt werden konnten. Bei 6 Typen konnte nur die Gattungszugehörigkeit bestimmt werden, und bei den restlichen 7 Typen fehlen systematische Zuordnungen. Farbreaktionen konnten beim C-Test (9), beim K-Test (21), beim J-Test (11) und beim N-Test (9) beobachtet werden. Besonders spektakulär war die Reaktion des K-Tests mit *Melanelixia subargentifera*, da dabei die Flechtenoberfläche mosaikähnlich erschien.

5.2. Diversität in Bezug auf das Waldalter

Wie anhand der Evenness (Tab. 1) erkannt werden kann, scheinen die Flechtenarten innerhalb eines Waldes bei allen drei verschiedenen Wäldern gleichmässig verbreitet zu sein. Der Shannon-Index und auch die Anzahl gesammelter Typen zeigen, dass die Artenvielfalt im Jungwald geringer ist als im mittelalten Wald und im Urwald. Unter Zuhilfenahme von Abb. 7 lassen sich noch weitere Aussagen zur Artenvielfalt machen. In unserer Studie wurden 10 Flechtentypen gefunden, die in allen Wäldern vorkommen. Jeder Wald hat ausserdem rund neun Typen, die ausschliesslich dort gedeihen. Trotz grosser räumlicher Distanz gibt es eine grosse Überlappung zwischen dem mittelalten Wald und dem Urwald. Dies lässt sich wahrscheinlich dadurch erklären, dass ein Grossteil der durchsetzungsfähigen Arten, die auch im Urwald vorkommen, im mittelalten Wald schon genug Zeit hatten, sich zu etablieren. Im Jungwald und dem mittelalten Wald scheint es auch einige Arten zu geben, die sich schnell verbreiten und relativ gut durchsetzen können. Später werden sie möglicherweise verdrängt durch dominantere Arten. Es kommen auch wenige Arten vor, die nur im Urwald und im Jungwald anzutreffen sind. Diese Arten sind möglicherweise durch Zufall schon früh in den Jungwald geraten und konnten sich so dort verbreiten.

5.3. Arten-Areal Beziehung

Wie die Arten-Areal-Kurven in Abb. 8 zeigen, steigt die Artenzahl mit zunehmender Fläche, was auch zu erwarten ist. Über die effektive Artenzahl lässt sich keine wirkliche Aussage machen, da dies von den Einschränkungen der Probennahme abhängt, so zum Beispiel wurden keine Krustenflechten gesammelt. Die doppelt-logarithmische Darstellung entspricht angenähert einer Geraden mit einer Steigung von ungefähr $2/3$. Daraus lässt sich ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Artenzahl und der Fläche bestimmen: Eine Verachtfachung der Fläche führt zu einer Vervierfachung der Artenzahl. Dieser Zusammenhang ist jedoch mit äusserster Vorsicht zu geniessen, da nur wenige Proben auf einer relativ kleinen Fläche gesammelt wurden.

6. Fazit

In diesem Projekt wurde die Fähigkeit zur Bestimmung einzelner Flechten verbessert und damit Wissen dazu gewonnen.

Die Ergebnisse im Bezug auf die Diversität anhand des Waldalters entsprachen teilweise den Erwartungen der Gruppe. Der Urwald weist sowohl den höchsten Shannon-Index als auch die grösste Evenness auf, was bei einem Urwald auch erwartet wird. Die höchste Typenzahl im mittelalten Wald und die höhere Evenness im Jungwald im Vergleich zum mittelalten Wald wurden nicht erwartet. Ebenfalls wurde festgestellt, dass im Jungwald ein beachtlicher Anteil der Typen verschieden ist von jenen im mittelalten Wald und dem Urwald. Allgemein scheint es in jedem der Wälder Typen zu geben, die ausschliesslich dort vorkommen. Für aussagekräftigere Resultate müssten mehr Daten produziert werden. Das Projekt ist aber ein gelungener Methodentest zur Flechtenbestimmung.

Trotz der grossen Anzahl gesammelter Proben konnte das Flechten-Projekt wie geplant und mit den erwünschten Auswertungen durchgeführt werden. Alles in allem war das Projekt als Testlauf sehr erfolgreich und ermöglicht eine Weiterentwicklung und Weiterführung in anderen Regionen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Wikipedia, «Flechte», <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Flechte&oldid=241104395> (Zugriff 23.01.2024).
- [2] sofator, «Anatomie Flechte», https://dlu2r2pnzqmal.cloudfront.net/content_images/images/14077/original/11380_Anatomie_Flechte_%281%29.svg?1656681205 (Zugriff 02.02.2024).
- [3] sofator, «Flechten Bau und ökologische Bedeutung», <https://www.sofator.ch/biologie/videos/flechten-bau-und-oekologische-bedeutung> (Zugriff 02.02.2024).
- [4] McCune B. und Yang S., «26276CiliaEdited.jpg», <https://lichens.twinferntech.net/pnw/images/medium/Parmotrema/crinitum/26276CiliaEdited.jpg> (Zugriff 08.02.2024).
- [5] Uebel E., «Peltigera praetextata showing rhizines», https://en.wikipedia.org/wiki/Rhizine#/media/File:Peltigera_praetextata-4.jpg (Zugriff 08.02.2024).
- [6] Scheidegger C., Keller C. und Stofer S., «Flechten der Schweiz - Vielfalt, Biologie, Naturschutz», 1. Auflage, Haupt Verlag, Bern (2023).
- [7] Castelazo T., «Rock covered with multicolored patches of lichen.jpg», https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rock_covered_with_multicolored_patches_of_lichen.jpg (Zugriff 11.01.2024).
- [8] Wirth V. und Kirschbaum U., «Flechten einfach bestimmen - Ein zuverlässiger Führer zu den häufigsten Arten Mitteleuropas», 2. Auflage, Quelle & Meyer Verlag, Wiebelsheim (2017).
- [9] Wirth V., Hauck M. und Schultz M., «Die Flechten Deutschlands (Bd. 1 & 2)», Ulmer Verlag, Stuttgart (2013).
- [10] academia-SOP-A0016, «Auswertung Vegetationsaufnahmen» (V04, 21.03.2014).

Duftanalyse von Pilzen

**Selma Dellenbach, Sarah Heusser, Lars Hüppi, Fiona Jäger,
Benigno Rossi, Nico Schulthess**

1. Einleitung

Pilze sind faszinierende Lebewesen, welche weder den Tieren noch den Pflanzen angehören. Sie sind einem eigenen Reich zugehörig, dem Reich der Pilze. Die meisten Menschen kennen Pilze mit ihren charakteristischen Aromen als eine Zutat in Gerichten. Passend dazu stehen in unserem Projekt die vielen unterschiedlichen Gerüche der Pilze im Vordergrund. Im diesjährigen Pilzprojekt wurden Pilze im Feld für die Analyse ihrer Aromastoffe gesammelt. Es wurden vorzugsweise Pilze gesammelt, welche einen sehr auffallenden und charakteristischen Duft hatten. Dieser wurde im Feld durch eine einfache Geruchsprüfung getestet. Duft wird durch flüchtige Moleküle verursacht, welche als Geruchs- oder Aromastoffe bekannt sind. Um einen Duft zu analysieren, wurden die Duftkomponenten durch Gaschromatografie in verschiedene Aromastoffe aufgetrennt, welche dann im Massenspektrometer identifiziert wurden. Für jede Pilzprobe wurde je eine Headspace-Probe und ein Dichlormethan-Auszug hergestellt. Die Headspace-Methode funktioniert ähnlich wie das menschliche Geruchsorgan. Bei dieser Methode werden nur die flüchtigen Stoffe aus der Luft analysiert, während die Proben des Dichlormethan-Auszugs Auskunft zu den geschmacklichen Komponenten geben, da deren Stoffe teilweise gelöst werden. Diese beiden Methoden wurden untereinander verglichen, um eventuelle Unterschiede der Methoden selber zu analysieren. Das Ziel unserer Messungen war, die unterschiedlichen Düfte von verschiedenen Pilzarten zu untersuchen und herauszufinden, ob es für jede Art charakteristische Inhaltsstoffe ihres Duftes gibt.

2. Gerüche von Pilzen

Bei der Pilzbestimmung sind Gerüche nicht selten essenzielle Erkennungsmerkmale einer Art, da viele Arten einen charakteristischen und deutlichen Geruch haben. Der Geruch der Pilze besteht aus chemischen Verbindungen, welche Duftkomponenten genannt werden. Die Duftkomponenten eines Pilzes werden hauptsächlich im Fruchtkörper gebildet und bei der Sporenbildung an die Umgebung abgegeben. Der Geruch eines einzelnen Pilzes kann aus bis zu 150 unterschiedlichen Duftkomponenten zusammengesetzt sein. Der Pilzgeruch kann sich während des Alterungsprozesses des Fruchtkörpers verändern und hängt von verschiedenen Ausseneinflüssen ab. An der Zusammensetzung der Komponenten ist speziell, dass es gewisse Komponenten gibt, welche den typischen Pilzduft ausmachen. Zu diesen Komponenten gehören vor allem C8-Verbindungen wie beispielsweise 1-Octen-3-ol [1, 2], welches bei der enzymatisch-oxidativen Zersetzung von Linolsäure entsteht [3]. Zudem wird ein Teil vom 1-Octen-3-ol zu 1-Octen-3-on oxidiert [3], was in kleinen Mengen auch nach Pilz riecht. Jedoch müssen diese C8-Verbindungen nicht in jedem Pilz vorkommen, und deshalb gibt es Pilze, welche keinen oder nur einen leichten Pilzduft aufweisen. Auch die Geruchskomponenten, welche Insekten anlocken, die sich von Pilzen oder von Pilzen produzierten Substraten ernähren, sind von grosser Bedeutung in der Pilzbestimmung. Der Pilzgeruch hat noch viele weitere Funktionen, diese sind jedoch irrelevant bei der Pilzbestimmung, da es zu diesen keine Bestimmungskriterien gibt. Mithilfe der menschlichen Geruchswahrnehmung werden Pilzgerüche beschrieben und benannt, um sie bestimmten Pilzfamilien zuzuordnen. Für die Bestimmung der Pilze ist hauptsächlich die dominante Geruchskomponente wichtig, welche sich typischerweise aus mehreren Geruchsmolekülen zusammensetzt. Als dominante Geruchskomponente bezeichnet man den Geruch, der beim Riechen deutlich in den Vordergrund tritt [4].

3. Methodik

3.1. Probenverarbeitung

Die Pilze, die für die Bestimmung verwendet worden sind, wurden in Rajala, Finnland, gesammelt. Insgesamt wurden Pilzfruchtkörper von 14 Arten gesammelt: Graublättriger Schwefelkopf (*Hypholoma capnoides*), Grünblättriger Schwefelkopf (*Hypholoma fasciculare*), Durchbohrter Leistling oder Trompetenpfeiffer-

ling (*Cantharellus tubaeformis*), Eierschwamm oder Echter Pfifferling (*Cantharellus cibarius*), Birkenrotkappe (*Leccinum versipelle*), Birkenröhrling (*Leccinum scabrum*), Kuhröhrling (*Suillus bovinus*), Ziegenlippe (*Xerocomus subtomentosus*), Steinpilz (*Boletus edulis*), Gallenröhrling (*Tylopilus felleus*), Habichtspilz (*Sarcodon imbricatus*), Zimthautkopf (*Cortinarius cinnamomeus*), Kahler Erlenschnitzling (*Naucoria scolicina*) und Graubrauner Seidenkopf (*Cortinarius anomalus*). Es wurden wenn möglich Pilzarten gewählt, die untereinander nach Inhaltsstoffen verglichen werden können; zum Beispiel der Grün- und der Graublättrige Schwefelkopf. Diese beiden Pilzarten waren besonders interessant, da sie beide einen sehr ähnlichen Geruch aufweisen, der Grünblättrige Schwefelkopf aber einen bitteren Geschmack besitzt, der Graublättrige Schwefelkopf hingegen nicht. Die Pilzproben wurden am Sammeltag weiter verarbeitet, damit möglichst wenig des Geruchs verloren ging und sich die Pilze so wenig wie möglich zersetzten. Sie wurden grob von Verschmutzungen wie Waldboden und Pflanzenresten gereinigt. Grosse Fruchtkörper wurden klein geschnitten und danach in einen Multischneider gegeben. Im Multischneider wurden alle Pilze zu einer groben Masse gehäckselt. Diese wurde in zwei Teile geteilt: Der eine Teil wurde im Trockenschrank bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschliessend gemörsert, der andere Teil wurde direkt weiterverarbeitet. Bei genügend grosser Probenmenge wurden aus beiden Teilen Proben für eine Headspace-Analyse (vgl. Kap. 3.2) sowie Dichlormethan-Auszüge (vgl. Kap. 3.3) hergestellt.

3.2. Geruchsanalyse mittels Headspace-Methodik

Für die Analyse der Proben wurde zum einen die Headspace-Methodik verwendet. Dabei kann die Konzentration der flüchtigen Duftstoffe mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC-MS) ermittelt werden. Bei der Headspace (bzw. Kopf- oder Dampfraum)-Technik mussten die frischen Pilzproben sofort in Headspace-Vials gegeben und anschliessend eingefroren werden. Die getrockneten Pilze wurden ebenfalls in Headspace-Vials gegeben und bei Raumtemperatur aufbewahrt. Headspace-Vials sind etwa 8 cm grosse Gläschen, die für die Headspace-Methode entwickelt wurden. Auf dem Deckel des Vials befindet sich in der Mitte eine dünne Membran, welche leicht von einer Nadel durchstochen werden kann.

Vor der Messung wurden die Proben für 20 min bei 65 °C erwärmt. Dadurch stellt sich im Gasraum über der Probe ein Gleichgewicht der flüchtigen Bestandteile zwischen Gasraum und Probe ein. Dann wurde mit einer Spritze ein Teil des Gases aus dem Dampfraum entnommen und in den GC injiziert. Die Funktionsweise der GC-MS-Messung ist im Kap. 3.4 beschrieben.

3.3. Dichlormethan-Extraktion (DCM-Extraktion)

Eine Lösungsmittelextraktion ist ein Verfahren, bei dem man einen oder mehrere Stoffe aus der Probe in einem geeigneten Lösungsmittel löst. Für die DCM-Extraktion wurde das gemörserte Pulver der getrockneten Pilze in Probegläschen abgefüllt und bis zum Erstellen der Extraktion aufbewahrt. Auch die frischen Pilzproben wurden für diese Methode verwendet. Hierfür wurde die gehäckselte Probe sofort vakuumiert und eingefroren, damit nicht nur so wenig Geruch wie möglich verloren ging, sondern auch der mikrobielle Abbau in den Proben verhindert wurde.

Von den frischen und pulverisierten Proben wurden jeweils 4 g bzw. 1 g abgewogen und in Probegläschen gefüllt. Dazu wurden 25 mL DCM gegeben. Die Gefässe wurden für sieben Wochen in den Kühlschrank gestellt, damit die Stoffe genügend Zeit hatten, sich zu lösen. Danach wurden die Probegläschen mit DCM auf ihr Anfangsvolumen aufgefüllt. Die Probenreste wurden aus der Flüssigkeit abfiltriert, da für die Messung nur das Filtrat mit den darin gelösten Stoffen benötigt wurde. Für die Messung wurde vom GC-MS ein wenig Filtrat angesogen und verdampft. Dabei entstand Gas, welches in die Trennsäule des GC-MS gespiesen wurde.

3.4. Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC-MS)

Im GC-MS werden die Stoffkomponenten vom Gaschromatographen (GC) aufgetrennt und die einzelnen Komponenten im Nachgang vom Massenspektrometer (MS) identifiziert. Damit eine Gaschromatographie durchgeführt werden kann, muss die Probe gasförmig sein oder zuerst verdampft werden. Die gasförmige Probe wird anschliessend mit dem Trägergas in die Trennsäule des GCs injiziert. Bei der Gaschromatographie bildet die Trennsäule die stationäre Phase und das Trägergas die mobile Phase. Die Trennung erfolgt,

weil die einzelnen Bestandteile der Probe in der Trennsäule unterschiedlich mobil sind und dementsprechend unterschiedlich lange brauchen, um die Säule zu durchqueren. Somit kommen die einzelnen Stoffe zu unterschiedlichen Zeitpunkten, den sogenannten Retentionszeiten, aus der Trennsäule.

Um die aufgetrennten Bestandteile der Probe eindeutig zu identifizieren, wird jeder Bestandteil einzeln mit einem MS gemessen. Dafür wird der Bestandteil zunächst kontrolliert in ionisierte Bruchstücke gespalten. Anschliessend werden diese Ionen dem MS zugeführt, wo das Verhältnis von Masse zu Ladung (m/Q) der einzelnen Ionen gemessen wird. Die Verteilung der Masse-Ladungsverhältnisse wird Fragmentationsmuster genannt und widerspiegelt die Häufigkeit der einzelnen Ionen. Deshalb ist das Fragmentationsmuster charakteristisch für ein jeweiliges Molekül. Um ein gemessenes Fragmentationsmuster einem Molekül zuzuordnen, wurde das Fragmentationsmuster mit der NIST-Datenbank [5] abgeglichen und der Bestandteil wurde dem am besten übereinstimmenden Molekül zugewiesen.

4. Resultate und Diskussion

Während über alle Headspace-Proben insgesamt 80 unterschiedliche Moleküle nachgewiesen wurden, waren in den Dichlormethan-Auszügen nur 17 unterschiedliche Moleküle bestimmbar. Da die Ausbeute der Headspace-Proben deutlich grösser und vielfältiger ist, beschränkt sich die Auswertung und Diskussion der Daten in diesem Kapitel auf die Headspace-Proben.

4.1. Auswertung der GC-MS Daten

In einem ersten Schritt wurden sämtliche gemessenen Moleküle mit einer gemessenen absoluten Stoffmenge unter $1.5 \cdot 10^5$ gelöscht, weil deren Messungen typischerweise unzuverlässig und die zugehörigen Molekülzuordnungen oftmals zweifelhaft waren. Danach wurden alle gemessenen Komponenten nach Retentionszeiten sortiert. Übergreifend über alle Proben wurden ähnliche Retentionszeiten zu einzelnen Komponenten zusammengefasst, wenn die jeweiligen Fragmentationsmuster ähnlich waren. Dabei wurde angenommen, dass alle Messungen innerhalb einer Komponente dem gleichen Molekül entsprechen. Die Zuordnung einer Komponente zu einem Molekül basiert dabei auf der Bestimmung durch den Datenbankabgleich (vgl. Kap 3.4). Teilweise konnte eine Komponente klar als ein Molekül identifiziert werden, weil die Fragmentationsmuster fast aller Messungen durch den Datenbankabgleich dem gleichen Molekül oder allfälligen Stereoisomeren zugeordnet wurden. Falls eine Komponente nicht klar einem einzelnen Molekül zugeordnet werden konnte, wurde eine Sammelklasse definiert, die alle identifizierten Moleküle enthält.

In mehreren Fällen kam es vor, dass innerhalb derselben Probe zwei unterschiedliche Moleküle bei einer nahezu identischen Retentionszeit und einem sehr ähnlichen Fragmentationsmuster gemessen wurden und somit derselben Komponente zugeordnet wurden. Da dies zu einer überhöhten gemessenen Stoffmenge in der Komponente führen würde, wurde jeweils das Molekül entfernt, wo die Übereinstimmung mit dem Fragmentationsmuster in der Datenbank tiefer war.

Zur Überprüfung auf systematische Verunreinigungen wurden zwei Blankproben gemessen, die jeweils nur Luft und kein Probenmaterial enthielten. Diejenigen Komponenten, die in den Blankproben enthalten waren, wurden deshalb bei sämtlichen Proben entfernt.

4.2. Stoffe mit Verdacht auf externe Herkunft

Obwohl Blankproben verwendet wurden, um systematische Verunreinigungen zu erkennen, wurden einige Stoffe in den Pilzproben gemessen, die nicht in den Blankproben enthalten waren, aber trotzdem wahrscheinlich auf eine Verunreinigung zurückzuführen sind. Diese Stoffe werden hier zuerst besprochen.

In sämtlichen Pilzproben wurde Dichlormethan (DCM) gemessen. Für das Vorkommen von DCM gibt es zwei Theorien. Die eine ist, dass ein Teil des DCMs eingeschleust wurde, welches für die Reinigung der Einspritznadel des GC-MS-Gerätes verwendet wurde. Jedoch ist dies eher unwahrscheinlich, da die Blankproben kein Dichlormethan enthielten. Deshalb wäre die zweite Theorie hier wahrscheinlicher: Die Headspace-Proben wurden zusammen mit den DCM-Auszügen gelagert und zur ZHAW in Wädenswil transportiert. Die Blankproben wurden hingegen erst unmittelbar vor der GC-MS-Messung an der ZHAW erstellt und waren somit nie im Kontakt mit den DCM-Auszügen. Da die Probengläser der DCM-Auszüge nicht komplett dicht waren, liegt der Schluss nahe, dass ein Teil des DCM aus den Probengläsern entwichen ist und sich in den

Headspace-Vials angesammelt hat.

Eine weitere mögliche Verunreinigung ist Ethanol, das in allen frischen und nahezu allen getrockneten Proben gemessen wurde. Einerseits wurde Ethanol verwendet, um das Labormaterial zu reinigen, bevor eine neue Probe verarbeitet wurde, was die Proben mit Ethanol verunreinigt haben könnte. Dies würde auch erklären, weshalb kein Ethanol in der Blankprobe enthalten war. Dennoch ist nicht auszuschliessen, dass Ethanol natürlicherweise in Pilzen enthalten ist. In der weiteren Auswertung wird Ethanol jedoch nicht betrachtet, da eine Verunreinigung nicht ausgeschlossen werden kann.

4.3. Frische Pilzproben

Eine Übersicht über die Zusammensetzung der frischen Pilzproben ist in Abb. 1 dargestellt. In praktisch allen Pilzproben sind 3-Octanon und 1-Octen-3-ol mengenmässig dominant. Dies ist gemäss der Literatur auch zu erwarten, da der typische Pilzduft vor allem aus solchen C8-Verbindungen besteht [1, 4, 6, 7]. Ebenso gehört 3-Octanol, welches in den Proben einen deutlich kleineren Anteil aufweist, zu diesen erwarteten Duftstoffen.

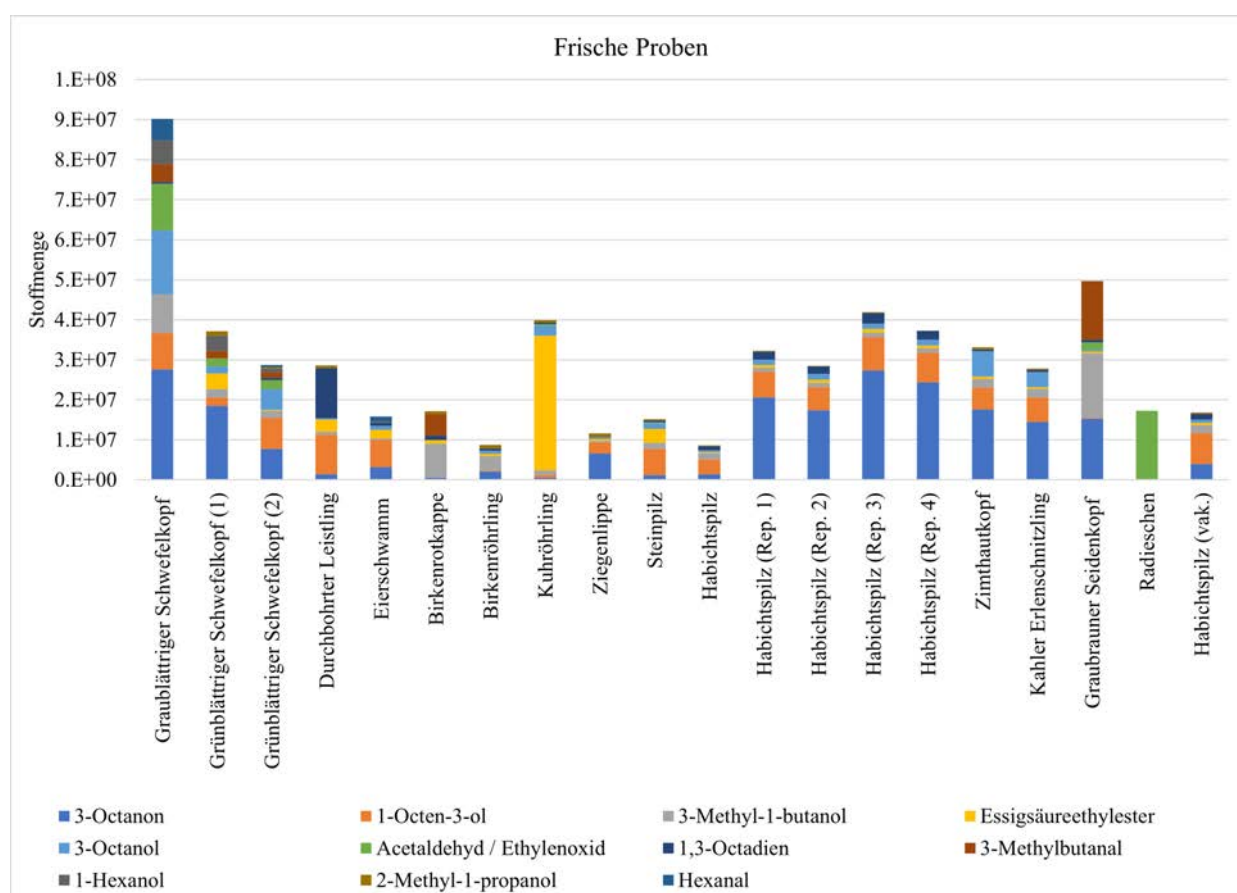


Abb. 1: Im Diagramm sind die Stoffmengen der am stärksten vertretenen Moleküle in den Headspace-Proben der frischen Pilze dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind im Diagramm nur die Moleküle enthalten, deren Anteil an der insgesamt gemessenen Stoffmenge die Grenze von 5 % nicht unterschreitet. Zudem sind Stoffe mit Verdacht auf externe Herkunft (Dichlormethan und Ethanol, vgl. Kap. 4.2) nicht im Diagramm dargestellt. Eine Tabelle mit sämtlichen gemessenen Duftkomponenten befindet sich in Appendix A.

Jedoch gibt es auch Stoffe, die in allen frischen Proben vorgekommen sind, die eher auf Verunreinigungen hindeuten, wie zum Beispiel 3-Methyl-1-butanol. Doch auch das Vorkommen dieses Stoffes kann erklärt werden. Die frischen Pilzproben sollten von der Verarbeitung her bis zu den Messungen die ganze Zeit über tiefgefroren sein. Wegen eines Missverständnisses wurden die Pilzproben nach der Rückreise aus Finnland für zwei Wochen im Kühlschrank anstelle des Gefrierfaches gelagert. Die Proben hatten deshalb bereits

leicht zu gären begonnen. 3-Methyl-1-butanol gehört zur Gruppe der Alkohole und entsteht bei der Hefegärung aus der Aminosäure Leucin.

Es gab noch einige Moleküle (C8-Verbindungen), die in Pilzen erwartet werden, jedoch nicht in allen Proben vorkamen. Das wären hier: 1-Octen-3-ol und 3-Octanol, welche in allen Proben ausser der Birkenrotkappe vorkamen, und 1,3-Octadien, welches abgesehen vom Grünblättrigen Schwefelkopf in allen Proben vorkam. Ebenfalls in allen Proben mit Ausnahme vom Graublättrigen Schwefelkopf kam Essigsäureethylester vor. Vor allem im Kuhröhrling war es in sehr grossen Mengen vorhanden. Bei diesem Stoff ist der Grund des Vorhandenseins nicht ganz klar. Essigsäureethylester ist als Geruchsstoff bekannt, deshalb wird vermutet, dass dieser Stoff natürlich in Pilzen vorhanden ist.

4.4. Getrocknete Pilzproben

Die für Pilze typischen C8-Verbindungen wie 1-Octen-3-ol [1, 4, 6, 7] konnten in den getrockneten Pilzproben nicht in ausreichendem Masse nachgewiesen werden, um eine aussagekräftige Analyse durchzuführen. Wie in Abb. 2 zu erkennen ist, sind Ethanol und Essigsäure die einzigen zwei Stoffe, welche in auffällig vielen getrockneten Proben gefunden wurden. Essigsäure kommt bei gewissen Pilzen wie der Morchel als

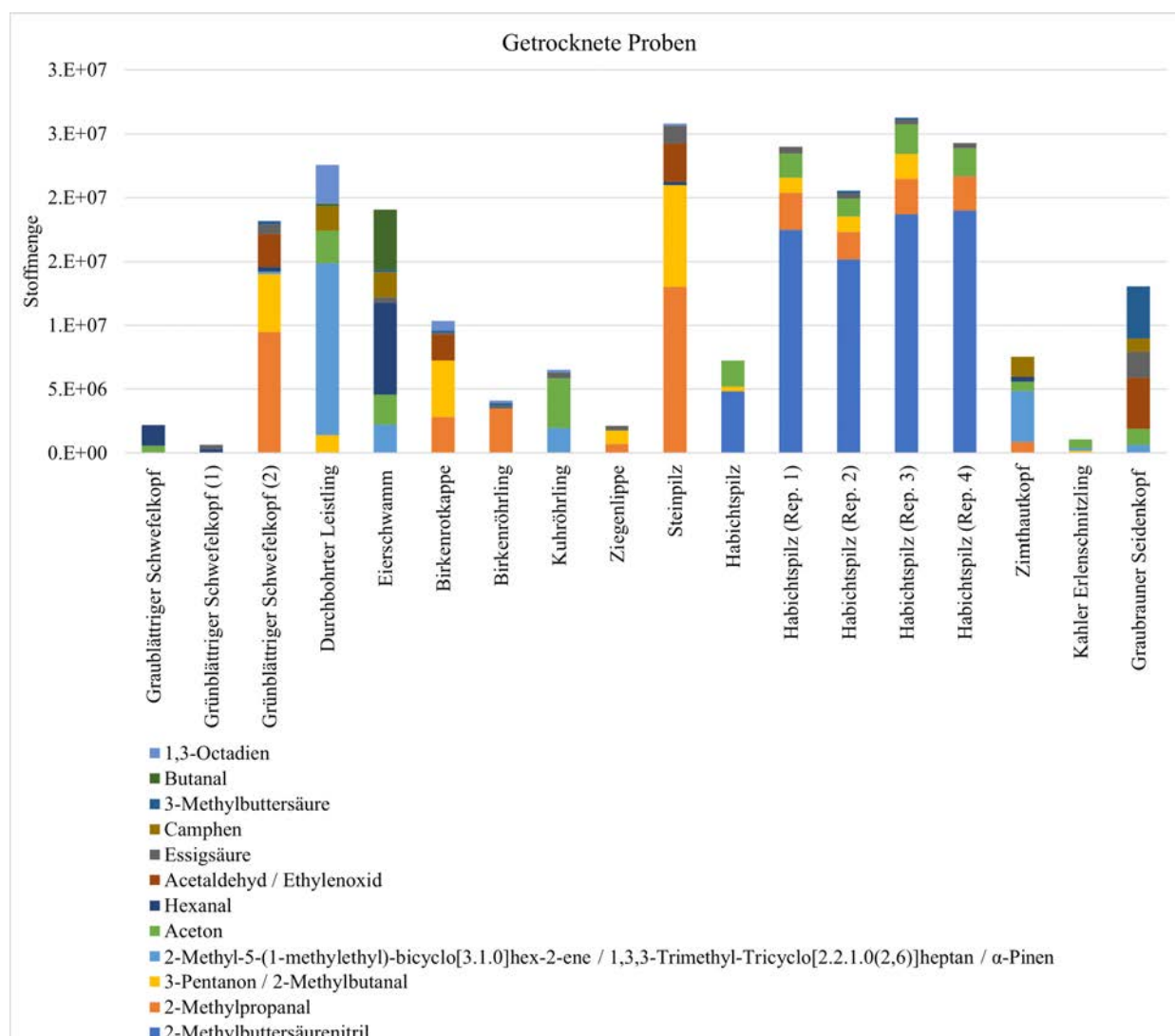


Abb. 2: Im Diagramm sind die Stoffmengen der am stärksten vertretenen Moleküle in den Headspace-Proben der getrockneten Pilze dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind im Diagramm nur die Moleküle enthalten, deren Anteil an der insgesamt gemessenen Stoffmenge die Grenze von 5 % nicht unterschreitet. Zudem sind Stoffe mit Verdacht auf externe Herkunft (Dichlormethan und Ethanol, vgl. Kap. 4.2) nicht im Diagramm dargestellt. Eine Tabelle mit sämtlichen gemessenen Duftkomponenten befindet sich in Appendix B.

typischer Geschmacksstoff vor [3]. Zudem enthalten Pilze viele Proteine, und die Geschmacks- und Geruchsstoffe sind oftmals Produkte des enzymatischen Abbaus dieser Proteine durch den Pilz selbst. Es ist deshalb durchaus möglich, dass beim Abbau dieser Aminosäuren auch Essigsäure entsteht. Mit ziemlich grosser Sicherheit lässt sich aber sagen, dass die Essigsäure ein Teil des Pilzdufts ist und nicht durch eine Verunreinigung in die Pilzproben gelangt ist. Abgesehen von den obigen Stoffen wurde keiner der Stoffe oft genug festgestellt, um ihn als charakteristischen Pilzduft zu bezeichnen.

4.5. Repetitionsproben

Für die vier Habichtspilz-Repetitionsproben wurden mehrere Fruchtkörper gehäckselt und vermischt, so dass genügend homogenes Probenmaterial für mehrere Proben zur Verfügung stand. Die Messwerte der Repetitionsproben wurden verglichen, um die Präzision der Methodik abzuschätzen.

Bei den frischen Proben fällt sogleich auf, dass in allen Proben die gleichen Geruchskomponenten vorhanden sind. Schaut man die Werte jedoch etwas genauer an, bemerkt man, dass die gemessene absolute Stoffmenge von Probe zu Probe variieren kann. Nimmt man Essigsäureethylester als Beispiel, bekommt man für die frischen Repetitionsproben folgende Werte: $6.53 \cdot 10^5$, $8.01 \cdot 10^5$, $9.60 \cdot 10^5$ und $6.64 \cdot 10^5$. Bei 2-Butanon variieren die Werte von $1.63 \cdot 10^5$ bis zu $9.83 \cdot 10^5$. Anders verhält sich zum Beispiel Isoamylalkohol. Bei diesem Duftstoff streuen die Werte zwischen $1.00 \cdot 10^6$ und $1.11 \cdot 10^6$.

Bei den getrockneten Proben ist es ähnlich wie bei den frischen: Es sind die gleichen Stoffe in allen Proben vorhanden. Im Gegensatz zu den frischen Proben sieht man aber, dass es kaum Unterschiede zwischen den Werten gibt. Die einzige Ausnahme ist, wie schon bei den frischen Proben, der 2-Butanon-Wert. So liegen hier die Werte zwischen $1.60 \cdot 10^5$ und $4.80 \cdot 10^5$.

In Abb. 3 ist das Ganze mithilfe eines Diagrammes veranschaulicht. Für diese Grafik wurde jeweils der Mittelwert eines Stoffes, der in mindestens zwei Proben vorkam, ermittelt. Die Einzelwerte wurden durch den Mittelwert dividiert. Je näher diese Punkte auf dem Diagramm bei 1 sind, desto ähnlicher ist die Konzentration dieses Stoffes in jeder Probe.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass man mithilfe dieser Methode einen guten Mittelwert der chemischen Verbindungen in den Proben herausfinden kann. Dieser kann je nachdem exakter sein als eine Einfachprobe. Bei einer Einfachprobe kann ein kleiner Fehler zu Fehlinterpretationen führen. Hat man jedoch mehrere Proben, dann fallen extreme Messwerte auf und können dadurch besser eingeschätzt werden.

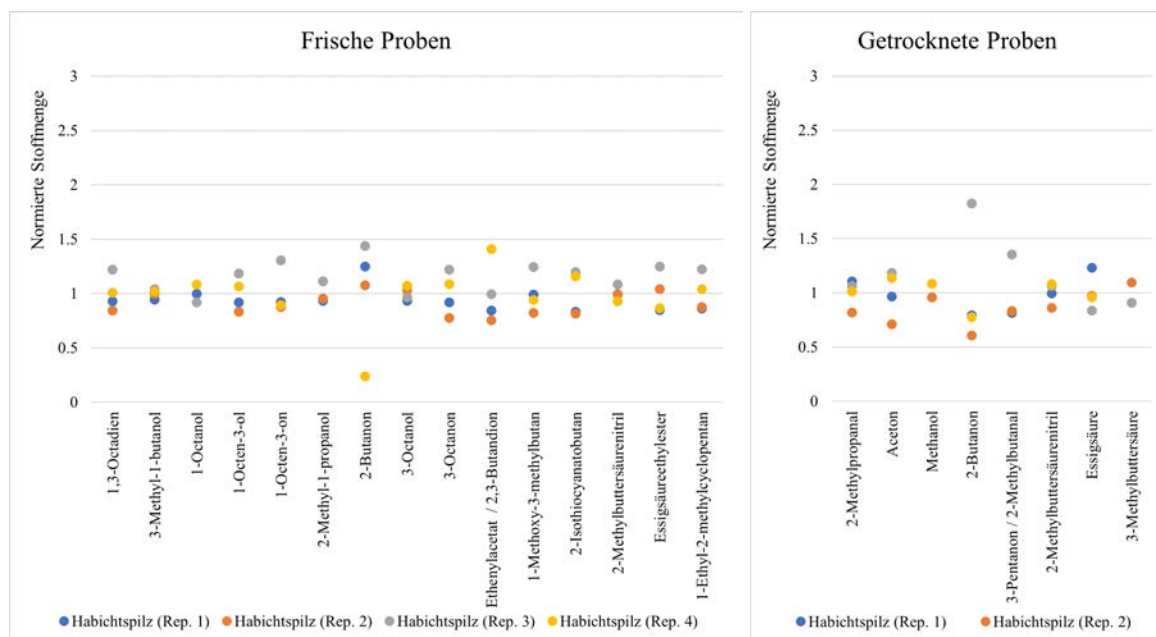


Abb. 3: In dieser Grafik ist das Verhältnis der gemessenen Stoffmenge und der mittleren Stoffmenge für die frischen und getrockneten Repetitionsproben dargestellt. Dabei wurden nur diejenigen Stoffkomponenten verwendet, die in mindestens zwei der Repetitionsproben eine Konzentration von mehr als $1.5 \cdot 10^5$ aufweisen.

4.6. Einfluss durch das Vakuumieren

Aus dem frischen Probenmaterial der Habichtspilz-Repetitionsproben wurde ein weiterer Teil vor der Erstellung der Headspace-Probe vakuumiert, um mögliche Auswirkungen auf den Duft durch das Vakuumieren festzustellen. Die Zusammensetzung dieser Probe ist in Abb. 1 bei Habichtspilz (vak.) dargestellt und kann direkt mit den Habichtspilzproben Rep. 1 bis Rep. 4 verglichen werden, da diese vom selben Ausgangsmaterial hergestellt wurden. Erwartungsgemäss ist die Gesamtmenge an Duftstoffen in der vakuumierten Probe im Mittel 49 % tiefer als in den Vergleichsproben. Sämtliche Hauptbestandteile des Duftes sind in der vakuumierten Probe noch enthalten, jedoch haben sich die Anteile der einzelnen Duftmoleküle stark verändert. Besonders stark abgenommen hat der Anteil von 3-Octanon (−82 %), während die Abnahme von 3-Octanol (−51 %) ungefähr im selben Verhältnis wie die Gesamtmenge steht. Die gemessene Menge an Essigsäureethylester (−17 %) ist nur leicht gesunken und die Mengen an 1-Octen-3-ol (+11 %), 3-Methyl-1-butanol (+79 %) und 1,3-Octadien (+33 %) sind sogar höher als vor dem Vakuumieren.

Da die nicht vakuumierten Proben mit etwas Luft in Headspace-Vials lagerten, ist es möglich, dass Alkohole wie 1-Octen-3-ol und 3-Methyl-1-butanol vermehrt zu Ketonen oxidiert wurden, was bei der vakuumierten Probe aufgrund des Luftentzugs erschwert war. Das würde die relative Zunahme dieser beiden Alkohole in der vakuumierten Probe erklären.

4.7. Vergleich von getrockneten und frischen Pilzen

Bei der Auswertung der Geruchskomponenten wurden die getrockneten und die frischen Pilzproben miteinander verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass manche Komponenten fast ausschliesslich bei frischen, andere nur bei trockenen Proben vorkamen. Es gibt auch solche, die bei beiden Behandlungsarten etwa gleich präsent waren. Natürlich sind jene Komponenten spannend, welche deutlich häufiger bei der einen Aufbereitungsart vorkamen, und deshalb werden diese nun genauer diskutiert.

In den frischen Pilzproben wurden im Gegensatz zu den getrockneten Pilzproben viele C8-Verbindungen, wie 3-Octanol, 3-Octanon, 1-Octen-3-ol und 1-Octen-3-on vorgefunden, obwohl solche C8-Verbindungen in den getrockneten wie auch in den frischen Pilzen vorkommen sollten [4, 7]. Warum diese Verbindungen in den getrockneten Proben nicht nachgewiesen werden konnten, ist unklar. Zudem ist bemerkenswert, dass der Stoff 2-Methyl-1-propanol in jeder frischen Probe vorkam, jedoch in keiner einzigen getrockneten.

Andererseits konnten in den getrockneten Proben verschiedene Terpene nachgewiesen werden. Zu den gemessenen Terpenen gehören 2-Methyl-5-(1-methylethyl)-bicyclo[3.1.0]hex-2-en, 1,3,3-Trimethyl-Tricyclo[2.2.1.0(2,6)]heptan, α -Pinen, Camphen, Limonen und 3-Caren.

Bei den anderen Geruchskomponenten waren entweder zu wenig Daten vorhanden oder es konnte kein Unterschied zwischen getrockneten und frischen Proben festgestellt werden. Die Unterschiede zeigen, dass es entscheidend ist, ob die Proben getrocknet oder frisch verarbeitet wurden.

4.8. Duft verwandter Pilzarten

Aufgrund der gezielten Probennahme konnten unterschiedliche Pilzarten innerhalb ihrer Gattung verglichen werden. In diesem Kapitel wird das anhand der frischen Pilzproben diskutiert, die gemessene Zusammensetzung ist in Abb. 1 ersichtlich. Verglichen wurden dabei die Schwefelköpfe (Grau- und Grünblättriger Schwefelkopf), die Leistlinge (Durchbohrter Leistling und Eierschwamm) und die Röhrlinge (Birkenrotkappe, Birkenröhrling, Kuhröhrling, Ziegenlippe und Steinpilz).

Im Graublättrigen Schwefelkopf sind grössere Mengen an unterschiedlichen Duftstoffen enthalten, wohingegen bei den beiden Grünblättrigen Schwefelköpfen hauptsächlich Ethanol, 3-Octanon und 3-Octanol enthalten sind. Die Leistlinge unterscheiden sich hauptsächlich durch den hohen 1,3-Octadien-Anteil beim Durchbohrten Leistling, welcher beim Eierschwamm nicht vorhanden ist. Bei den Röhrlingen sticht der Kuhröhrling deutlich heraus. Bei ihm wurde eine erhebliche Menge an Essigsäureethylester gemessen. Essigsäureethylester ist ein Stoff, welcher bei der Fermentation entstehen kann. Der Kuhröhrling war schon ziemlich reif und es ist durchaus möglich, dass bereits eine erhebliche Menge an Bestandteilen vom Pilz unter anderem zu Essigsäureethylester zersetzt wurde. Zudem stammt der Kuhröhrling als einzige Probe aus der Familie der Schmierröhrlingsverwandten, während alle anderen Röhrlingsproben zur Familie der Dickröhrlingsverwandten gehören, was die unterschiedliche Zusammensetzung auch erklären könnte. Eine eher kleine Abweichung war bei der Birkenrotkappe und dem Birkenröhrling herauszulesen. Beide enthalten nämlich

kaum 1-Octen-3-ol. Dies ist zwar eine Überraschung, jedoch ist es interessant, dass diese zwei Pilze, welche die einzigen gemessenen Raufussröhrlinge sind, ähnlich bis gleiche Duftstoffe enthalten.

4.9. Pilze mit Rettichgeruch

Im Feld wurden Pilze gefunden, welche bei der Geruchprobe an Rettich erinnerten. Dabei handelt es sich um den Zimthautkopf und den Kahlen Erlenschnitzling. Deshalb wurde als Vergleichsprobe eine Headspace-Probe von einem Radieschen hergestellt, dessen Zusammensetzung ebenfalls in Abb. 1 dargestellt ist. Beim Vergleich dieser beiden Pilzproben mit der Radieschenprobe konnten keine eindeutigen Übereinstimmungen gefunden werden. Die Pilze und das Radieschen weisen bei den Aromastoffen nur unregelmässige Gemeinsamkeiten auf. Die meisten Stoffe, die im Radieschen enthalten sind, wurden in keinem der Pilze nachgewiesen. Leider konnte hier also keine Verbindung festgestellt werden. Was aber auffällt ist, dass gewisse Kohlenstoffverbindungen wie 1-Butanol, welche fast alle Pilze gemeinsam besitzen, nicht im Radieschen vorhanden sind. Ebenso sind viele Stoffe wie Methanthiol, Dimethylsulfid, Dimethyldisulfid und Dimethyltrisulfid nur im Radieschen enthalten und in keiner Pilzprobe. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Stoffe, welche den charakteristischen Geruch des Radieschens ausmachen, in den Pilzen, deren Geruch ebenfalls an Rettich erinnert, nicht enthalten sind.

5. Fazit

In unserem Projekt wurden Pilze auf ihre Düfte analysiert und unterschiedliche Aspekte verglichen. Abschliessend kann man sagen, dass die Messungen mit dem Gaschromatographen und der Headspace-Methode ziemlich gut funktioniert haben. Es konnten einige qualitative und quantitative Aussagen bezüglich der Düfte in den gesammelten Pilzproben gemacht werden. Zu den auffälligen Stoffen gehört vor allem 3-Octanon, welches in allen Proben vorkam. Es gibt aber auch Stoffe, welche in allen Pilzen erwartet wurden, jedoch in einigen Arten nicht aufgefunden wurden. Zu diesen gehören 1-Octen-3-ol und 3-Octanol, welche in allen Pilzen ausser der Rotkappe gefunden wurden, und 1,3-Octadien, welches im Grünblättrigen Schwefelkopf gefehlt hat. Diese Tatsache ist insofern interessant, dass genau Stoffe wie diese den typischen Pilzduft ausmachen.

Leider schlichen sich einige Verfahrensfehler ein, welche die Resultate beeinträchtigten. Darunter fallen die potentiellen Verunreinigungen durch Dichlormethan und Ethanol, sowie die beginnende Gärung der Pilze, welche aus der falschen Lagerung der frischen Proben resultierte. Diese Fehler sind zwar ärgerlich, jedoch liefern sie wichtige Informationen zur Behandlung der Proben. Bei zukünftigen Duftprojekten müssen die oben genannten Aspekte unbedingt beachtet werden.

Eine Idee für eine mögliche Fortsetzung dieses Projekts wäre zum Beispiel ein genauerer Artenvergleich. Es könnten weniger Pilzarten gesucht, dafür aber mehr Proben pro Art gesammelt und untersucht werden. Es gäbe die Möglichkeit, analog zu Aisala et al. [6] einen Teil der Pilze vor der Messung zu kochen und das Aroma der rohen mit den gekochten Pilzen zu vergleichen.

6. Danksagung

Unser herzliches Dankeschön geht an die Fachgruppe Umweltanalytik der ZHAW in Wädenswil. Besonders hervorheben möchten wir die Unterstützung von Alexander Mistretta, der uns im Labor der ZHAW bei unseren Messungen mit seinem Engagement und Fachwissen beraten und begleitet hat. Ein besonderer Dank gilt auch Dr. Susanne Kern, die es uns ermöglicht hat, die Messungen an der ZHAW in einem ihrer Labore durchzuführen. Wir möchten uns herzlich für die angenehme Zusammenarbeit, die grosszügige Unterstützung und die Zeit, welche sie sich für uns genommen haben, bedanken.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Pinho P. et al., «Aroma compounds in eleven edible mushroom species: Relationship between volatile profile and sensorial characteristics », in: «12th Weurman Flavour Research Symposium», S. 467–471 (2008).
- [2] Tian R. et al., «Analysis of aromatic components of two edible mushrooms, *Phlebopus portentosus* and *Cantharellus yunnanensis* using HS-SPME/GC-MS», *Results in Chemistry* **4** (2022).
- [3] Belitz H. D. et al., «Lehrbuch der Lebensmittelchemie», Springer-Verlag, 6. Auflage (2007).
- [4] Oschatz M. L. und Krisai-Greilhuber I., «Pilzduft-und Pilzgeruchsfamilien, eine Klassifikation für Pilzgerüche», *Austrian J. Mycol* **30** (2022).
- [5] Linstrom P. J. und Mallard W. G., «NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69», V12, National Institute of Standards and Technology (2001).
- [6] Aisala H. et al., «Odor-contributing volatile compounds of wild edible nordic mushrooms analyzed with HS–SPME–GC–MS and HS–SPME–GC–O/FID», *Food chemistry* **283** (2019).
- [7] Buchbauer G. et al., «The aroma of edible mushrooms. Headspace analysis using GC/FID and GC/FTIR/MS: Kopfraum-Analyse mittels GC/FID und GC/FTIR/MS», *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung* **197** (1993).

A. GC-MS-Messwerte der frischen Pilzproben

Duftkomponente	Absolut gemessene Stoffmenge [10 ⁶]																				
	Mittlere Retentionszeit [min]	Graublättriger Schwefelkopf	Grünblättriger Schwefelkopf (1)	Grünblättriger Schwefelkopf (2)	Durchbohrter Leistling	Eierschwamm	Birkenrotkappe	Birkenröhrling	Kuhröhrling	Ziegenlippe	Steinpilz	Habichtspilz	Habichtspilz (Rep. 1)	Habichtspilz (Rep. 2)	Habichtspilz (Rep. 3)	Habichtspilz (Rep. 4)	Zimthautkopf	Kahler Erlenschnitzling	Graubrauner Seidenkopf	Radieschen	Habichtspilz (vak.)
Methanthiol	4.32																			0.49	
Isocyanensäure	4.63		0.56																		
Acetaldehyd / Ethylenoxid	4.69	11.60	1.98	2.23					0.39		0.28									1.96	17.23
Dimethylsulfid	5.33																			0.33	
Octan	5.94				0.41	0.15															
1-Methoxy-3-methylbutan	6.14																				
2-Methylpropanal	6.47	0.92	0.26				0.60						0.77	0.64	0.97	0.73	0.37	3.61			
Aceton	6.65	0.49				0.27						0.18					0.16		0.18		0.29
1-Ethyl-2-methylcyclopentan	6.85				0.17	3.37							0.34	0.34	0.48	0.41	0.31	0.18			
4-Octen	7.48						0.24														
Butanal	7.90	0.24																			
Essigsäureethylester	8.06		3.79	0.18	3.05	2.05	0.83	0.55	33.66	0.47	3.47	0.24	0.65	0.80	0.96	0.66	0.51	0.43	0.50		0.64
Methanol	8.37	0.35	0.70			0.27						0.30	0.85	0.74	0.98	0.16		0.99		1.98	
Butanon	8.50																				
3-Pentanon / 2-Methylbutanal	8.73			0.26																	
Dichlormethan	8.95	4.57	4.16	3.58	3.01	3.09	4.03	3.15	2.48	2.82	2.34	2.93	3.39	3.32	3.47	3.09	3.23	3.58	4.06	4.42	4.21
3-Methylbutanal	9.04	4.42	1.92	1.44			5.39												14.74		
Ethanol	9.18	8.21	45.24	60.62	20.85	30.05	61.79	60.71	144.22	44.28	61.85	34.34	22.24	18.63	22.94	21.04	30.48	23.30	3.51	14.08	7.75
1,3-Octadien	9.60	0.46		0.47	12.54	0.81	1.15	0.65	0.44	0.20	0.37	1.04	2.02	1.83	2.65	2.19	0.48	0.55	0.60		1.44
Propansäureethylester	9.70																	0.36			
Isobuttersäureethylester	9.84		0.16																		
Ethenylacetat / 2,3-Butandion	10.25	0.56	0.50	0.33			0.46	0.17		0.36		0.24	0.27	0.25	0.32	0.46	0.24	0.31			0.53
3-Hepten-1-in	10.35				0.60																
Pentanal	10.38	0.39																			
2-Hexanon / 2-Methyl-2-(1-methylethyl)oxiran	10.65	0.27																			
2-Methyl-5-(1-methylethyl)-bicyclo[3.1.0]hex-2-ene / 1,3,3-Trimethyl-1-Tricyclo[2.2.1.0(2,6)]heptan / α-Pinen	11.22				0.15																
2-Butanol	11.22												0.15								
1-Propanol	11.57							0.61		0.22	0.16		0.16		0.22			0.18			
Toluol	11.86																		0.33		
2-Butenal	12.09	0.32																			
3-Methylbuttersäureethylester	12.18																		0.30		
Dimethyldisulfid	12.63																			2.90	

Duftkomponente	Mittlere Retentionszeit [min]	Absolut gemessene Stoffmenge [10 ⁶]																			
		Graublättriger Schwefelkopf	Grünblättriger Schwefelkopf (1)	Grünblättriger Schwefelkopf (2)	Durchbohrter Leistling	Eierschwamm	Birkenrotkappe	Birkenröhrling	Kuhröhrling	Ziegenlippe	Steinpilz	Habichtspilz	Habichtspilz (Rep. 1)	Habichtspilz (Rep. 2)	Habichtspilz (Rep. 3)	Habichtspilz (Rep. 4)	Zimthautkopf	Kahler Erlenschnitzling	Graubrauner Seidenkopf	Radieschen	Habichtspilz (vak.)
Hexanal	12.76	5.39		0.52	1.16																0.37
2,2-Methyl-1-propanol	12.81		1.12	0.37	0.60					0.41	0.25	0.16	0.16	0.19	0.71	0.61	0.52	0.39			0.93
2,2-Methylbuttersäurenitril	12.98											0.42	0.65	0.65							
Essigsäureisopentylester	13.50																		0.38		
1-Butanol	13.99	0.25																			
2,2-Methyl-1-butanol	15.31	9.67	2.15	1.86	0.72	0.48	8.63	1.13	0.25	1.58	1.59	1.00	1.06	1.11	1.08		2.29	2.11	16.08		1.90
2,2-Pentylfuran / Hexansäureethylester	15.96	1.35	3.50	1.32																	
2,2-Methyl-4-heptanon	16.01				0.16																
1-Pentanol	16.23	1.06																			
3-Octanon	16.61	27.56	18.47	7.74	1.37	3.14	0.47	2.06	0.50	6.58	1.40	20.66	17.38	27.38	24.38		17.57	14.52	15.23		4.00
2-Methylbuttersäure-3-methylbutylester	16.86																		0.22		
2,2-Isothiocyanobutan	17.07										0.30	0.87	0.85	1.25	1.21						
3-Methylbuttersäure-3-methylbutylester	17.20																		1.34		
Acetoin	17.49							0.26							0.27						0.16
1-Octen-3-on	17.65	1.00	0.35	0.30	0.22	0.37			0.15	0.19		0.25	0.23	0.35	0.24	0.23	0.24				0.18
1-Hexanol	18.30	6.00	3.76	0.92	0.32																
2-Isopropyl-5-methyl-2-hexenal	18.87																		0.37		
3-Octanol	19.03	16.00	1.79	5.25	0.37	1.07		0.73	2.47	0.40	0.41	1.30	1.43	1.34	1.49	6.34	3.82	0.37	0.37		0.70
Dimethyltrisulfid	19.66																			0.18	
Acrylsäurebutylester	19.78				0.21																
Octansäureethylester	19.97		0.17																		
1-Octen-3-ol	20.08	9.13	2.15	7.72	6.78			0.21	0.73	2.86	6.48	3.71	6.43	8.29	7.46	5.42	6.05	0.25			7.78
2-Octenal	20.38				0.27																
Essigsäure	20.47	0.86								0.39					0.20						
2-Ethylhexanol	20.84	0.17																			
1-Octanol	22.08	0.31	0.17									0.17		0.15	0.18						0.19
Benzaldehyd	22.43	0.32																			
2,3-Butandiol	22.51		0.22							2.15					0.65						
2-Octen-1-ol	23.12	0.39		0.24	0.25					0.19											0.43
4-(2,2-Dimethyl-6-methylencyclohexyl)-2-butanon	26.53																1.83				
1,2,3,4,4a,5,6,7-Octahydro-2,5,5-trimethyl-2-naphthalenol	27.83																0.45				
5-Methyl-2-phenyl-2-hexenal	30.68																		0.62		

B. GC-MS-Messwerte der getrockneten Pilzproben

Duftkomponente	Absolut gemessene Stoffmenge [10 ⁶]																	Mittlere Retentionszeit [min]
	Graublättriger Schwefelkopf	Grünblättriger Schwefelkopf (1)	Grünblättriger Schwefelkopf (2)	Durchbohrter Leistling	Eierschwamm	Birkenrotkappe	Birkenröhrling	Kuhröhrling	Ziegenlippe	Steinpilz	Habichtspilz	Habichtspilz (Rep. 1)	Habichtspilz (Rep. 2)	Habichtspilz (Rep. 3)	Habichtspilz (Rep. 4)	Zimthautkopf	Kahler Erlenschnitzling	Graubrauner Seidenkopf
Isocyanäure	4.63					0.46												3.97
Acetaldehyd / Ethylenoxid	4.69	2.60				2.05				3.01								
Dimethylsulfid	5.33									1.40								
Octan	5.94			0.46														
Propanal	6.10				0.44													
2-Methylpropanal	6.47		9.47			2.81	3.49		0.70	13.03		2.92	2.16	2.80	2.67	0.88		
Aceton	6.65	0.56		2.54	2.34			3.90			2.04	1.88	1.39	2.31	2.21	0.75	0.70	1.25
1-Ethyl-2-methylcyclopentan	6.85			1.11														
Butanal	7.90			0.20	4.67									0.18				
Essigsäureethylester	8.06					0.25												
Methanol	8.37											0.16	0.16		0.18	0.32	0.29	
Butanon	8.50		0.25	0.24	0.39	0.31	0.30			0.47		0.21	0.16	0.48	0.20			
3-Pentanone / 2-Methylbutanal	8.73		4.54	1.39		4.42			1.06	7.95	0.35	1.16	1.19	1.93			0.19	
Dichlormethan	8.95	8.62	25.78	84.10	6.53	28.50	10.89	22.72	16.91	6.31	5.46	20.55	34.66	24.92	10.58	62.65	23.25	79.84
3-Methylbutanal	9.04				2.02													
Ethanol	9.18		0.43	0.32	0.41	12.48		0.74		2.96	0.30	0.18	0.16	5.32		0.30	0.45	
1,3-Octadien	9.60			3.05		0.76	0.18	0.19		0.16								
Ethylenacetat / 2,3-Butandion	10.25	0.33								0.25								
Pentanal	10.38	0.23																
2-Hexanon / 2-Methyl-2-(1-methylethyl)oxiran	10.65				0.38													0.26
Methylisocyanid	10.97																	0.66
2-Methyl-5-(1-methylethyl)-bicyclo[3.1.0]hex-2-ene / 1,3,3-Trimethyl-1-Tricyclo[2.2.1.0(2,6)]heptan / α-Pinen	11.22		0.19	13.48	2.21			1.96								3.97	0.20	
1-Propanol	11.57									0.60								
1,3,3-Trimethyl-tricyclo[2.2.1.0(2,6)]heptan / 3-Caren	12.23			2.75	0.30			0.30								0.18		
Camphen	12.29			1.90	1.99											1.54		1.02
Dimethyldisulfid	12.63					0.58												
Hexanal	12.76	0.33	0.34		7.20					0.27						0.39		
2-Methylbuttersäurenitril	12.98										4.85	17.48	15.17	18.68	18.98			
β-Pinen	13.28			0.29												3.25		
2-Heptanon	15.12				0.22													
2-Methyl-1-butanol	15.31	1.04	0.60					0.35		1.23								0.24
Limonen	15.45			0.34	0.54											0.93		0.52

Duftkomponente	Absolut gemessene Stoffmenge [10 ⁶]																		
	Mittlere Retentionszeit [min]	Graublättriger Schwefelkopf	Grünblättriger Schwefelkopf (1)	Grünblättriger Schwefelkopf (2)	Durchbohrter Leistling	Eierschwamm	Birkenrotkappe	Birkenröhrling	Kuhröhrling	Ziegenlippe	Steinpilz	Habichtspilz	Habichtspilz (Rep. 1)	Habichtspilz (Rep. 2)	Habichtspilz (Rep. 3)	Habichtspilz (Rep. 4)	Zimthautkopf	Kahler Erlenschnitzling	Graubrauner Seidenkopf
1,8-Cineol	15.75					0.39													0.18
2-Pentylfuran / Hexansäureethylester	15.96			0.17		0.38													
3-Octanon	16.61										0.32								
2-Ethyl-2-hexenal	17.75					0.20													
6-Methyl-5-hepten-2-on	18.34								0.16										0.75
2-Methyl-1,3-oxathian	18.51																		0.36
2-Isopropyl-5-methyl-2-hexenal	18.87																		
1-Octen-3-ol	20.08								0.45										
Essigsäure	20.47		0.30	0.74		0.43	0.15	0.22	0.47	0.36	1.39		0.54	0.43	0.37	0.42			2.06
2-Decanon	21.28				0.18														
Isobuttersäure	22.42																		0.44
Essigsäurebornylester	23.06																0.20		0.26
3-Methylbuttersäure	24.14			0.28		0.20	0.16	0.20						0.20	0.17				4.12

Zoologische Studien in der Region Rajala

Marileen Colruyt, Jorin Haller, Andreas Heeb, Jari Meier,
Cora Oppliger, Michael Strässle

1. Einführung

Finnland verfügt über eine besonders vielfältige Fauna. Im Rahmen der Forschungsreise der **academia** Ende September 2023 nach Finnland wurde diese genauer untersucht. Das vorliegende Projekt wurde auf zwei wesentliche Bereiche fokussiert. Zum einen wurde eine Kamerafalle konstruiert, mit welcher es möglich ist, qualitativ hochwertige Fotos von Wildtieren aufzunehmen. Das Ziel war es, Fotos von grösseren Wildtieren wie Elchen oder Luchsen zu erzielen. Um besser einschätzen zu können, wo sich das Aufstellen einer Kamerafalle lohnt, wurde ebenfalls gezielt nach Wildtieren gesucht. Um die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Tierbeobachtung zu erhöhen, wurden drei zusätzliche Wildkameras installiert und mehrere Beobachtungsfahrten am Morgen und Abend durchgeführt. Im Rahmen des zweiten Projektteils wurden Eulen und ihre Gewölle gesucht. Die Gewölle wurden auf ihren Inhalt untersucht und, sofern möglich, der entsprechenden Eulenart zugeordnet.

2. Theorie

2.1. Kamerafalle

Um auch in Gebieten mit geringer Dichte an Wildtieren einzelne Individuen nachweisen zu können, eignen sich Kameras, die einen Standort rund um die Uhr überwachen. Im Grunde genommen braucht eine Kamerafalle folgende Dinge, um zu funktionieren: Einen Bewegungssensor, um Tiere zu erkennen, eine Kamera, die das Bild macht und eine Lichtquelle, die für gute Beleuchtung des Tieres sorgt. Der Bewegungssensor informiert die Kamera über ein Signalkabel, wenn sich etwas vor dem Sensor befindet. Dadurch wird die Kamera ausgelöst und ein Bild aufgenommen. Auf dem Blitzschuh der Kamera befindet sich ausserdem ein Wireless Transmitter, der bei jeder Auslösung ein Signal an zwei entsprechende Wireless Receiver sendet, welche direkt mit zwei Blitzern, also der Lichtquelle, verbunden sind.

Um jedoch Erfolge zu erzielen, muss ein geeigneter Ort für die Kamerafalle gefunden werden. Generell geeignete Orte sind Wildwechsel, die von Tieren oft genutzt werden. Ein Wildwechsel ist am Boden erkennbar und sieht aus wie ein kleiner Trampelpfad, der durch den Wald führt. In unwegsamen Gebieten werden Wildwechsel strikter befolgt und sind deutlicher erkennbar als in gut gängigen Gebieten. Wildtiere gehen im Allgemeinen sehr sparsam mit ihrer Energie um und bevorzugen einfache Wege. Um solche Wildwechselpfade zu finden, kann es hilfreich sein, selbst einen Weg durch das Dickicht zu suchen, um zu verstehen, wo die Tiere am ehesten durchlaufen. Ebenfalls kann es hilfreich sein, sich an natürliche Leitlinien wie Flüsse, Seeufer oder Felsbänder zu halten. Auch Strassen und Wanderwege werden von Tieren genutzt. Allerdings ist es oft nicht erlaubt, Kamerafallen an von Menschen begangenen Wegen aufzustellen wegen des Persönlichkeitsschutzes. Ebenfalls werden Kamerafallen leider oft entwendet, wenn sie zu gut sichtbar und nicht gesichert sind.

2.2. Gewölle

Als Gewölle werden ausgewürgte unverdauliche Nahrungsreste von verschiedenen Vogelarten bezeichnet. Diese werden in einem speziellen Magen der Vögel komprimiert und danach hochgewürgt. Meistens sind sie grau bis braun (vgl. Abb. 6a) und ähneln Tierdung. Gewölle von verschiedenen Vogelarten unterscheiden sich fundamental in ihrem Inhalt. Während bei Krähen neben Nahrungsresten wie Nüssen auch Steinchen, Sand oder sogar Plastikmüll zu finden sind, enthalten Gewölle von Möwen häufig Fischgräten oder Teile von Krebsen. Gewölle von Greifvögeln und Eulen bestehen hingegen oft nur aus Knochen, Fell, Federn oder Insektenteilen. In diesem Projekt wurden vor allem Gewölle von Greifvögeln, insbesondere Eulen, untersucht. Die Inhaltsstoffe der Gewölle liefern wertvolle Informationen über die primären Nahrungsgrundlagen der lokalen Eulen. Sie bilden also eine gute Grundlage für eine Nahrungsstudie. Da sich die verschiedenen Eulenarten in ihrer Ernährungsweise teils sehr stark unterscheiden, ist es möglich, Gewölle anhand der Grösse

und ihren Inhaltsstoffen der entsprechenden Spezies zuzuordnen. Es ist auch möglich, anhand gefundener Gewölle Aussagen über den Beutetierbestand oder den Lebensraum der ansässigen Eulen zu treffen, weil sich Eulen auch innerhalb einer Art je nach Futterangebot sehr unterschiedlich ernähren.

Um Gewölle zu finden, muss man das Verhalten der Eulen im Untersuchungsgebiet kennen. Gewölle werden oft am selben Ort wieder ausgeschieden, an dem die Beute verzehrt wurde. Solche Orte sind zum Beispiel gut gelegene Baumhöhlen, erhöhte Baumstümpfe oder die Tageseinstände der Eulen. Dementsprechend ist das Auffinden von Gewölle am einfachsten, wenn die Eulen selbst lokalisiert werden können. Theoretisch wäre es besonders effizient, die Eulen direkt anhand ihrer Rufe zu lokalisieren und dann in einem begrenzten Gebiet, in dem die Eulen ihre Jagdgebiete oder auch Tageseinstände haben, nach Gewölle zu suchen. Ein Grossteil der europäischen Eulen führt eine sogenannte Herbstbalz durch, die je nach Art von Anfang September bis in den Winter hinein andauert. Sie dient den meist monogam lebenden Eulenpaaren dazu, sich nach dem Sommer wieder zu finden und ihre Reviergrenzen zu festigen. Während dieser Zeit ist die Rufaktivität deutlich erhöht, was das Auffinden der Eulen erheblich erleichtert.

2.3. Eulenarten

In Finnland kommen 11 Eulenarten vor, darunter der Raufusskauz, der Habichtskauz, der Waldkauz, der Sperlingskauz, der Bartkauz, der Uhu, und die Spurbereule. In den nächsten Unterkapiteln wird genauer auf den Raufusskauz und den Habichtskauz eingegangen, da ihre bevorzugten Habitate in der Region des Studienggebietes zahlreich vorhanden sind. Ebenfalls befanden sich der Raufusskauz und der Habichtskauz zu der Zeit, als das Lager stattfand, in ihrer Herbstbalz, und wären somit leichter zu hören und zu finden [1].

2.3.1. Raufusskauz (*Aegolius funereus*)

Der Raufusskauz, der zur Familie der Eulen und Käuze gehört, kommt in den Alpen und Mittelgebirgen sowie im gesamten borealen Waldgürtel vor (Abb. 1, rechts). Dort lebt er vor allem in Nadelwäldern, lokal auch in Mischwäldern. Im Süden kommt er vor allem in Gebirgen vor. Der Raufusskauz ist überwiegend ein Standvogel. Das bedeutet, dass er das ganze Jahr über in einem Gebiet bleibt und nicht in den Süden zieht. Er brütet in Schwarzspechthöhlen und in natürlichen Baumhöhlen geeigneter Grösse. Er bevorzugt alte, hochstämmige, mit Laubbäumen durchsetzte, gut strukturierte Nadelwälder ohne Unterholz. Er besiedelt aber auch reine Fichtenwälder verschiedener Altersklassen. Bei gutem Kleinsäugerangebot siedelt er gerne in Rufkontakten, das heisst ungefähr 1 Paar pro km² [2].



Abb. 1: Bild eines Raufusskauzes (links, [3]) und Verbreitungsgebiet des Raufusskauzes (rechts, [4]).

Der Raufusskauz ernährt sich hauptsächlich von Wirbeltieren, vor allem von Kleinsäugetieren wie Feld- und Waldmäusen. Er frisst aber auch Vögel und Frösche, selten Insekten. Bei gutem Nahrungsangebot kann sich ein Männchen mit bis zu drei Weibchen paaren. Der Raufusskauz hat eine Länge von ca. 25 cm, ein Gewicht von 90-120 g und ähnelt dem Steinkauz. Die Gewölle sind durchschnittlich 32 mm lang, mit einem Durchmesser von 11-16 mm und besitzen eine bauchige Form [5].

2.3.2. Habichtskauz (*Strix uralensis*)

Der Habichtskauz ist vor allem in Nordosteuropa (Schweden, Finnland, postsowjetischer Raum) und in den Gebirgen Südosteuropas (Rumänien, Ostslowakei) verbreitet (Abb. 2, rechts). Der Habichtskauz benötigt offene Flächen und naturnahe Wälder. Er ist nicht wählerisch in Bezug auf die Art des Waldes, ob Nadel-, Laub- oder Mischwald, solange es sich um dichte boreale Wälder mit Altholzbestand handelt. Allerdings hat er einen grossen Raumbedarf. In den durchschnittlichen Habitaten des Habichtskauzes in Skandinavien brüten etwa 5-7 Paare auf 100 km², wobei die Nestabstände zwischen zwei und vier Kilometern liegen. Das bedeutet, dass der Habichtskauz trotz seiner weiten Verbreitung sehr schwer zu finden ist, da die wenigen Tiere weit verstreut leben und die Reviere entsprechend gross sein können.

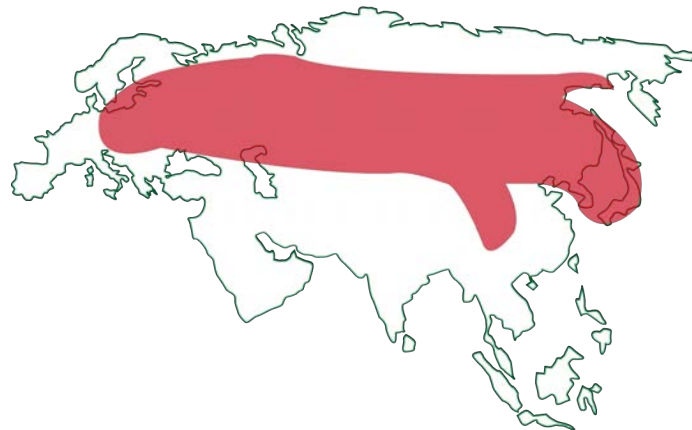


Abb. 2: Bild eines Habichtskauzes (links, [6]) und Verbreitungsgebiet des Habichtskauzes (rechts, [7]).

Der Habichtskauz ist sowohl Ansitz- als auch Suchflugjäger, wobei er die Ansitzjagd bevorzugt [2]. Er kann Beutetiere bis zur Grösse eines kleinen Hasen oder einer Auerhenne schlagen. Mäuse und Spitzmäuse bilden jedoch zu allen Jahreszeiten die Nahrungsgrundlage. Der tägliche Nahrungsbedarf schwankt saisonal zwischen 147 und 255 g, für ein nichtbrütendes Paar wurde ein Jahresbedarf von 109 kg Lebendgewicht an Beute errechnet. Habichtskäuze legen ganzjährig Nahrungsdepots in Höhlen, Spalten, aber auch in morschen Baumstümpfen an. Die Farbe des Habichtskauzes ist hellgrau mit breiten dunkelbraunen Streifen. Er hat einen ziemlich langen, gut gerundeten, stark quergestreiften Schwanz und einen runden Kopf. Die Augen sind schwarzbraun [2, 5].

Die Gewölle des Habichtskauzes sind bis zu 94 mm lang, bis zu 35 mm dick und durchschnittlich 62 × 25 mm gross. Sie sind sehr fest und an den Enden leicht zugespitzt. Da Habichtskäuze ausserhalb der Brutzeit häufig ihre Tageseinstände wechseln, sind die Gewölle schwer zu finden.

3. Methode

3.1. Platzierung der Kamerafalle und der Wildkameras

Bei der Suche nach einem geeigneten Standort für die Kamerafallen wurde zunächst das Gebiet erkundet. Dabei wurden viele Faktoren berücksichtigt, insbesondere Wildwechsel und mögliche Tierspuren. Ebenfalls helfen dabei bereits gemachte Tierbeobachtungen (vgl. Kap. 3.2). Nachdem ein geeigneter Ort gefunden wurde, an dem Tiere zu erwarten waren, war es wichtig, einen geeigneten Standort für die Kameras zu wählen, von wo aus die Kamera freie Sicht auf ein allfälliges Tier hat. Im Folgenden wird zwischen Kamerafalle und Wildkamera unterschieden (Abb. 3). Die Wildkameras (Abb. 3a) sind die drei kleineren Kameras, mit denen die lokale Fauna überwacht wurde. Die Kamerafalle (Abb. 3b) ist die grössere, die mit Hilfe einer Spiegelreflexkamera qualitativ hochwertige Bilder liefern soll. Die Kamerafalle ist grösstenteils selbst gebaut.



(a) Wildkamera.



(b) Kamerafalle.

Abb. 3: In der Studienwoche verwendete Kameratypen zum Nachweis von Wildtieren.

Für den Aufbau der Kamerafalle wurde die Kamera in einer wasserdichten Kiste befestigt, in welche ein Loch für die Linse ausgeschnitten wurde. Dann wurde das Ganze auf ein Stativ montiert. Zuletzt wurden der Sensor und die beiden Blitze montiert. Für die Blitze wurde eine Konstruktion aus Holzpflocken, Kabelbindern und Plastikbehältern verwendet. Die Holzpflocke wurden mit Kabelbindern an den Bäumen befestigt oder direkt in den Boden geschlagen. Die Kunststoffbehälter, die den Blitz vor Feuchtigkeit schützen sollten, wurden an die Pflocke geschraubt (Abb. 4a).



(a) Befestigung eines Blitzes.



(b) Wildkamera mit Spanngurt befestigt.

Abb. 4: Detailansichten zum Setup der Kamerafalle resp. der Wildtierkamera.

Der Bewegungssensor wurde meist direkt mit einem weiteren Pflock in den Boden geschlagen und so ausgerichtet, dass er alle Bewegungen erfassen konnte. Er ist über ein Kabel mit der Kamera verbunden und sendet ein Signal, wenn sich etwas vor dem Sensor befindet. Die Blitze wurden über ein Remote Set ausgelöst. Bei der Platzierung der Kamera war darauf zu achten, dass weder Äste noch andere Gegenstände die Sicht auf die Kamera oder den Sensor behindern. Die Lichtquellen sollten so positioniert werden, dass das Tier von allen Seiten beleuchtet wird, um harte Schatten auf den Bildern zu vermeiden. Die Tarnung des ganzen Setups ist optional. Tiere werden eher durch Gerüche oder Geräusche aufgeschreckt, nicht unbedingt

durch eine Kamera, die einfach so im Wald steht. Da Menschen zwangsläufig Gerüche und andere Spuren hinterlassen, sollte die aufgestellte Kamera jedoch nicht zu oft aufgesucht werden, um die Tiere nicht zu verscheuchen.

Die Installation der Wildkameras ist einfacher als die der Kamerafalle, da sie mit einem Spanngurt an einem Baum befestigt werden können (Abb. 4b). Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Wildkameras in einer geeigneten Höhe angebracht werden, um möglichst Tiere aller Grössen fotografieren und sicher identifizieren zu können. Wildkameras haben oft unterschiedliche Aufnahmewinkel. Je grösser der Winkel, desto mehr von der Umgebung wird erfasst, was nützlich ist, wenn man nicht genau weiss, wo sich das Tier aufhält.

3.2. Tiere beobachten

Es wird oft berichtet, dass in Finnland viele Wildtiere wie Rentiere, Elche, Hirsche, Hasen, Eulen und vielleicht sogar Wölfe und Bären beobachtet werden können. Im Rahmen dieses Projektes war eines der Ziele, Wildtiere nachzuweisen. Die beste Zeit für Tierbeobachtungen ist während der Abend- und Morgendämmerung. An mehreren Abenden wurden zu Fuss verschiedene Gebiete rund um das Lagerhaus erkundet. Zusätzlich wurden die Landstrassen in der weiteren Umgebung an zwei Tagen in der Morgen- und Abenddämmerung mit Autos abgefahren. Auf diese Weise konnten wesentlich grössere Strecken als zu Fuss zurückgelegt und unwegsame Gebiete einfacher durchquert werden. Um die Chancen auf Tierbeobachtungen zu erhöhen, wurden Taschenlampen, eine Infrarotkamera, ein Nachtsichtgerät und ein Vogelmikrofon eingesetzt. Anhand der gesichteten Wildtiere konnte dann entschieden werden, wo die Foto- oder Kamerafallen aufgestellt werden sollten bzw. wo es sich lohnt, nach Gewölle zu suchen.

3.3. Gewölle suchen

Gewölle sind oft dort zu finden, wo die Eulen ihre Beute fressen und verdauen. Das können Orte wie Baumstümpfe, andere geeignete Sitzwarten oder die sogenannten Tageseinstände sein. Während acht Tagen wurde intensiv nach geeigneten Habitatsstrukturen gesucht. Stimmte ein untersuchtes Gebiet mit den Habitatansprüchen der Eulen überein, wurde dort der Boden genauer auf Gewölle abgesucht. Diese können je nach Bodenbeschaffenheit sehr schwer zu finden sein, da sie meist recht klein und graubraun sind. Zusätzlich wurde an den Abenden nach rufenden Eulen gesucht, um die Untersuchungsgebiete ein wenig einzugrenzen.

4. Resultate

Mit der Kamerafalle konnten keine Resultate erzielt werden. Mit den Wildkameras hingegen wurden ein Elch (Abb. 5), zwei Schneehasen und einige Drosseln aufgenommen. Während den verschiedenen Abend- und Morgenausfahrten sowie den Beobachtungsausflügen zu Fuss konnten Elche, Rehe, Schneehasen, verschiedene Raufusshühner, zahlreiche andere Vögel und Eichhörnchen beobachtet werden. Für Bilder waren die Beobachtungsumstände aber oft zu schwierig. Eine Eule wurde lediglich an einem Abend gehört, diese allerdings auch auf weite Distanz. Die Nachsuche nach der Eule in diesem Gebiet blieb erfolglos.



Abb. 5: Mit einer der Wildkameras fotografierter Elch.

Während der Studienzeit wurden zwei Gewölle gefunden, wobei eines besser erhalten war als das andere. Das besser erhaltene Gewöll Nr. 1 war ca. 3 cm lang und lag mit einem weiteren Gewöll auf einem bemoosten Baumstrunk (Abb. 6a). Es wurde darin viel Fell und Federn, dazu auch einige unidentifizierbare Knochen und mehrere Nagezähne von Mäusen gefunden (Abb. 7). Im weniger gut erhaltenen Gewöll Nr. 2 (Abb. 6b) wurden hauptsächlich Fell und Insektenteile, jedoch keine Federn oder Knochen gefunden (Abb. 8).



(a) Gewöll Nr. 1, höchstwahrscheinlich von einem Raufusskauz.



(b) Das durch die Witterung beschädigte Gewöll Nr. 2.

Abb. 6: Die gefundenen Gewölle in der Auffindesituation.



Abb. 7: Knochen und Nagetierzähne als Bestandteile des gefundenen Gewölls Nr. 1, das vermutlich von einem Raufusskauz stammt.

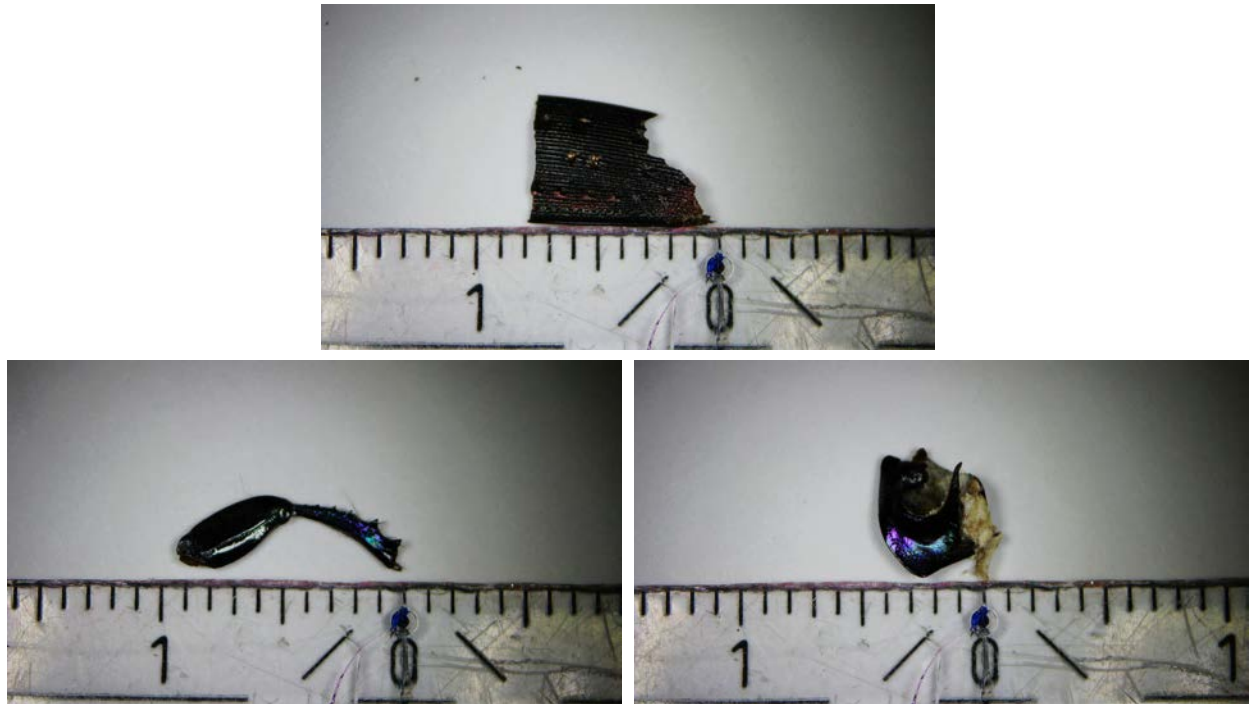


Abb. 8: Käferreste als Bestandteile des Gewölls Nr. 2, das vermutlich von einem Greifvogel stammt.

5. Diskussion

Während der zwei Wochen konnten verschiedene spannende Tierbeobachtungen gemacht werden. Von den Kamerafallen wurden ein Elch, zwei Schneehasen und einige Drosseln aufgenommen. Ebenfalls konnten während den verschiedenen Abend- und Morgenausfahrten Elche, Rehe, Schneehasen, verschiedene Raufusshühner, zahlreiche andere Vögel und Eichhörnchen beobachtet werden. Das Studiengebiet weist durchaus eine spannende Fauna auf.

Es stellte sich jedoch schnell heraus, dass die Dichte an Wildtieren in Finnland wesentlich niedriger war als erwartet. Zwei der Standorte, an denen Wildkameras aufgestellt wurden, erwiesen sich als nahezu ergebnislos. Beim dritten Standort wurde die Wildkamera nicht richtig in Betrieb genommen. Die Anzahl aufgenommener Videos der Wildkameras hält sich dementsprechend eher in Grenzen. Eine zusätzliche Herausforderung war die mit 10 Tagen beschränkt verfügbare Zeit während der Finnlandexpedition. Normalerweise würden diese Wildkameras über mehrere Monate unberührt in der Natur verbleiben, wodurch mehr Bilder aufgenommen werden können. Die Wildtierdichte in Finnland wurde von der Projektgruppe überschätzt, und die gesichteten Säugetiere waren zudem sehr scheu. Selbst Eichhörnchen und Mäuse wurden äusserst selten gesichtet.

Mit der selbstgebauten Kamerafalle konnten während dem Lager keine Erfolge erzielt werden. Das lag hauptsächlich daran, dass zwei Kabel im Sensor falsch verkabelt waren und dadurch ein Kurzschluss ausgelöst wurde. Der Kurzschluss hatte zur Folge, dass die Kamera nicht richtig funktionierte und sich der Akku viel zu schnell entlud. Allerdings stellte sich dies erst nach dem Lager heraus. Nach dem Beheben des Problems in Wattwil wurde die Fotofalle in Eschenbach SG aufgestellt, um sie zu testen. Durch heftigen Regenfall während dieser Zeit stellte sich heraus, dass das Gehäuse des Sensors nicht wasserdicht war und das Sensorboard nass wurde. Weitere Reparaturen und Feldversuche wurden durchgeführt, mit dem Ziel, in einem zukünftigen Zoologiestudienprojekt qualitativ hochwertige Bilder von Wildtieren aufnehmen zu können.

Während des Lagers wurde an einem Abend eine Eule in weiter Distanz gehört. Die darauffolgende Nachsuche in dem Gebiet blieb aber erfolglos. Insgesamt wurden zwei unterschiedlich gut erhaltene Gewölle gefunden. Die Analyse dieser Gewölle war erfolgreich, denn verschiedene spannende Bestandteile wie Knochen und Federn konnten identifiziert werden. Aufgrund der Inhaltsstoffe, des Fundortes und der Grösse des besser erhaltenen Gewölls Nr. 1 kann angenommen werden, dass das Gewöll von einem Raufusskauz stammt. Das zweite, etwas schlechter erhaltene Gewöll Nr. 2 enthielt im Gegensatz zum anderen keine Knochen und Zähne, sondern hauptsächlich Fell und Insektenteile. Das Gewöll stammt wahrscheinlich von einem

Greifvogel. Greifvögel haben eine stärkere Magensäure als Eulen, in welcher Knochen und Federn aufgelöst werden können. Einer Art konnte dieses Gewöll jedoch nicht zugeordnet werden, da es eher alt war und seine Form verloren hatte. Generell stellte sich die Gewöllsuche als herausfordernder dar als angenommen. Dies liegt möglicherweise daran, dass in Finnland nur eine begrenzte Zeit zur Suche verfügbar war und dass das abgesuchte Gebiet nur wenige Eulen beherbergte. Ebenfalls schien es so, als ob die ansässigen Eulen kaum oder gar keine Herbstbalz durchführten. Deshalb konnten keine klaren Gebietseingrenzungen für die Gewöllsuche gemacht werden. Weiter erschwert wurde die Gewöllsuche dadurch, dass es in Finnland vor dem Lager länger und stark geregnet hatte, und die Gewölle sich möglicherweise bereits aufgelöst hatten.

6. Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Projekt trotz vieler Probleme ein grosser Erfolg war. Sowohl die Kamerafalle als auch das angeeignete Wissen über Gewölle und deren Analysen bieten gute Grundlagen für zukünftige Projekte. Weil nur wenige Gewölle für eine genaue Analyse gefunden wurden, konnte die Auswertungsphase hauptsächlich dazu genutzt werden, Probleme bei der Kamerafalle zu identifizieren und beheben. Bei einem nächsten Zoologie-Projekt sollte für höhere Erfolgchancen vermehrt der Kontakt mit Einheimischen gesucht werden. So können Orte mit einer höheren Eulen- beziehungsweise Kauzpopulation besser identifiziert werden. Dies würde sich auch beim Aufstellen der Fotofalle lohnen, denn mit dem lokalen Wissen könnte ein Wildtierpfad viel leichter gefunden werden.

7. Dank

An dieser Stelle möchten wir uns bei unserem Luchsexperten und Wildtierfotografen Lars Begert bedanken, der uns beim Beantworten unserer vielen Fragen und mit Tipps zu Kamerafalle und Wildkameras zur Seite stand. Bei ihm durften wir auch seine eigene Kamerafalle anschauen, und er hat sich mehrere Stunden Zeit genommen, um uns alles zu zeigen und zu erklären. Ebenfalls möchten wir uns bei Christian Bircher, Physikkassistent der Kanti Wattwil, herzlich bedanken. Er hat massgeblich dazu beigetragen, dass die Kamerafalle professionell aussieht, und die Elektronik stimmt. Ausserdem hat er die Kamerafalle mehrmals getestet und Fehlerquellen entdeckt, die wir nicht finden konnten.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Vogelbeobachtung in Finnland: <https://www.discoveringfinland.com/de/naturattraktionen/birdwatching/> (Zugriff: 21.2.2024).
- [2] Peterson R., Mountfort G. und Hollom P. A. D., «Die Vögel Europas», Paul Parey Verlag, 14. Auflage (1985).
- [3] Raufusskauz: http://media.featherbase.info/images/speciesimages/000537_full.jpg (Zugriff: 21.2.2024).
- [4] Lebensraum Raufusskauz: <https://de.wikipedia.org/wiki/Raufusskauz#/media/Datei:AegoliusFunereusIUCN.svg> (Zugriff: 21.2.2024).
- [5] Reader's Digest, «Buch der Vogelwelt Mitteleuropas», Das Beste Verlag (1973).
- [6] Bild Habichtskauz: https://www.austrianbiologist.at/aba/magazin/wp-content/uploads/sites/9/2020/04/kauz_potensky.jpg (Zugriff: 21.2.2024).
- [7] Lebensraum Habichtskauz: https://tiergarten.nuernberg.de/fileadmin/bilder/Tierinformationen/Karten/Karte_Ural-oder_Habichtskauz.png (Zugriff: 2.3.2024).

Analyse der Chloroplasten-DNA verschiedener finnischer Pflanzenarten

Ramona Ackermann, Raphael Appenzeller, Jasmin Jauch, Sara Looser

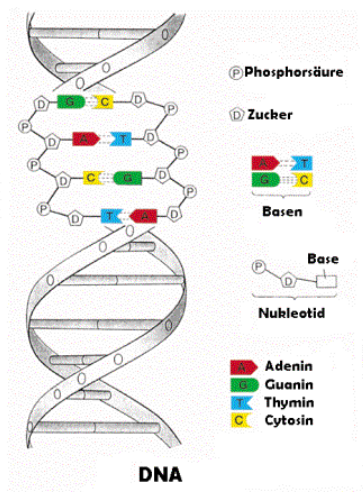
1. Einführung

Jedes Lebewesen trägt DNA in sich, welche den charakteristischen Bauplan eines Organismus festlegt. So haben auch Pflanzen DNA in ihrem Zellkern. Zudem besitzen sie auch spezielle Zellorganellen namens Chloroplasten, die ebenfalls DNA in ihrem Innern haben. Dadurch lassen sich verschiedene Pflanzen unterscheiden.

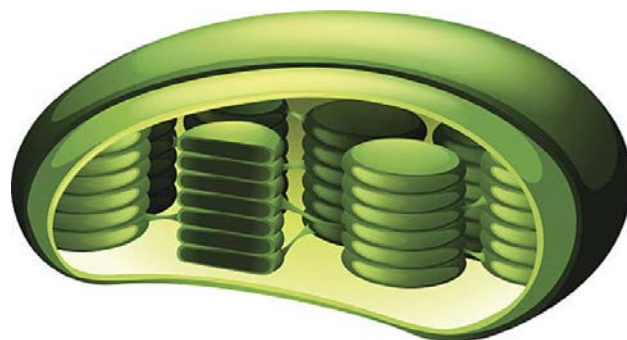
In diesem Projekt verwenden wir Methoden der Molekularbiologie, um die DNA sichtbar zu machen. Da die Expeditionsreise 2023 nach Finnland führte, wurden dort Blätter von einer Vielzahl verschiedener Pflanzen gesammelt, bearbeitet und untersucht. Das Ziel war es, herauszufinden, ob man Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei verschiedenen Baumarten erkennen kann. So wurden zum Beispiel Unterschiede zwischen Laub- und Nadelbäumen untersucht.

2. Theorie

Jedes Lebewesen besteht aus Zellen. In jeder Zelle befindet sich Desoxyribonukleinsäure, DNA (engl. für desoxyribonucleic acid). Die DNA enthält unsere Erbinformation und entspricht somit einem Bauplan, welcher die Informationen über sämtliche Merkmale eines Individuums enthält. Die Information ist in der Reihenfolge der vier Basen Adenin A, Thymin T, Guanin G und Cytosin C gespeichert. Zusammen mit Phosphorsäure und einem Zucker bilden die Basen ein Nukleotid, und die DNA besteht aus einem langen Doppelstrang von aneinandergereihten Nukleotiden, wobei jeweils Adenin mit Thymin und Guanin mit Cytosin Wasserstoffbrücken bilden. Dieser Aufbau wird als Doppelhelix bezeichnet und ist in Abb. 1a dargestellt [1].



(a) Aufbau der DNA [2].



(b) Chloroplast [3].

Abb. 1: Die DNA (a) ist das Molekül, das die Erbinformation enthält. Gewisse Zellorganellen wie die Chloroplasten (b) enthalten ihre eigene DNA.

DNA gibt es prinzipiell in jeder Zelle. In Eukaryoten befindet sich die DNA im Zellkern. Jedoch können wenige andere Zellorganellen, wie zum Beispiel die Mitochondrien und Chloroplasten, ebenfalls ihre eigene DNA besitzen. Mit der Endosymbiontentheorie kann erklärt werden, warum einige Zellorganellen ihre eigene DNA haben. Diese Theorie geht davon aus, dass Chloroplasten einst eigenständige Zellen resp.

Bakterien waren, die dann von einem grösseren Bakterium aufgenommen wurden und beide seither zusammenleben. In dieser Gemeinschaft haben sowohl der Chloroplast als auch die eigentliche Pflanzenzelle ihre Erbinformation behalten.

Die Chloroplasten, dargestellt in Abb. 1b, sind Zellorganellen, die nur in Pflanzenzellen vorhanden sind. Chloroplasten besitzen ebenfalls ihre eigene DNA, welche Chloroplasten-DNA (cpDNA) genannt wird. Pflanzen betreiben bekanntlich Fotosynthese, um Wasser und Kohlenstoffdioxid mittels der Energie des Lichts in Sauerstoff und Traubenzucker (Glucose) umzuwandeln (Abb. 2). Dieser Prozess findet in den Chloroplasten statt.

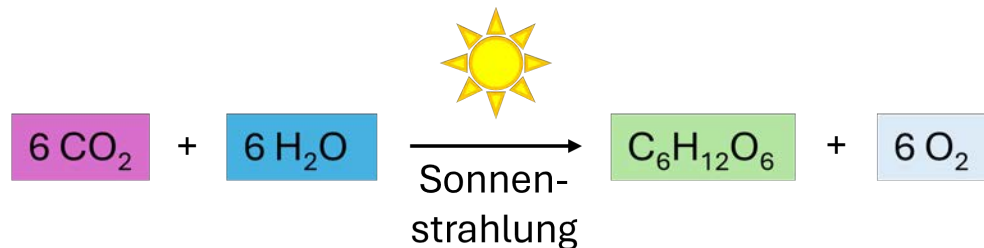


Abb. 2: Reaktionsgleichung (Summenformel) der Fotosynthese [4].

2.1. Blätter im Herbst - Seneszenz

Im Herbst beginnen sich Tiere und Pflanzen auf den Winter vorzubereiten. Laubbäume transportieren wertvolle Nährstoffe aus den Blättern und speichern sie in den Wurzeln und im Stamm. Von aussen sichtbar ist die Verfärbung und das anschliessende Abwerfen der Blätter. Dieser Vorgang ist Bestandteil der biologischen Alterung (Seneszenz). Auf zellbiologischer Ebene beginnt ein hoch regulierter Prozess, der die Zellkomponenten abbaut. Ein gesundes Blatt im Sommer besteht zu einem grossen Teil aus Chloroplasten, die Fotosynthese betreiben und dem Blatt die grüne Farbe geben. Im Herbst werden diese zuerst abgebaut. Mitochondrien hingegen bleiben fast bis zum Schluss intakt, da sie die Energie bereitstellen, die für die Seneszenz benötigt wird. Wenn die Blätter sichtbar gelb werden, können bereits mehr als 50% des Chlorophylls abgebaut worden sein. Am Ende der Seneszenz wird zum Beispiel über 80% des Stickstoffs und Phosphors aus den Blättern zurückgewonnen und im Spross gespeichert [5].

Die gelbe Farbe kommt üblicherweise von anderen Zellkomponenten, die bereits da waren, aber vom Grün der Chloroplasten überdeckt wurden. Blätter können sich aber auch orange, rot oder sogar violett verfärben, was daran liegt, dass andere Moleküle, sogenannte Anthocyanidine, hergestellt werden. Die Funktion dieser neuen Farbstoffe ist nicht vollständig geklärt, aber es könnte sich dabei um eine Mischung aus chemischen oder ökologischen Funktionen handeln [6].

3. Methode

Die Pflanzen-Proben wurden nach dem Sammeln in vier Schritten verarbeitet. Zuerst wurde die DNA aus den Pflanzenzellen extrahiert, dann wurde mithilfe der Polymerase Kettenreaktion (PCR) ein Abschnitt der cpDNA vervielfacht. Anschliessend wurden diese Abschnitte an spezifischen Basenabfolgen in kleinere Stücke zerschnitten, um Unterschiede zwischen den Arten festzustellen. Mit Hilfe der Agarose-Gel-Elektrophorese wurde die DNA jeweils nach den einzelnen Schritten sichtbar gemacht.

3.1. Extraktion

In diesem Schritt wird die DNA für weitere Analysen aus der Zelle extrahiert. Bis die DNA in reiner Form vorliegt sind mehrere Schritte notwendig, welche in der Anleitung des DNeasy Plant mini kits beschrieben sind [7]. Zuerst werden die gesammelten Blätter gemörsert, wobei die Zellwände mechanisch zerkleinert werden. Zum erhaltenen Pulver werden über mehrere Schritte verschiedene Puffer zugegeben, um die DNA aus den Zellorganellen herauszulösen. Anschliessend werden die verschiedenen Zellteile im Lysat verkleinert, sodass eine homogene Mischung entsteht. Nun ist die DNA in der Flüssigkeit gelöst. Durch Zentrifugieren werden nun die vergleichsweise grossen Zellbestandteile von den kleineren getrennt, welche immer

noch im Lysat gelöst sind. Die Lösung wird anschliessend filtriert, sodass die DNA extrahiert werden kann. Diese wird dabei vom Filter aufgefangen und anschliessend mit einer weiteren Pufferlösung aus dem Filter herausgewaschen. Somit befindet sich die DNA nun isoliert in der Pufferlösung.

3.2. Polymerase-Kettenreaktion PCR

Nachdem in der Extraktion DNA erhalten wurde, geht es im Folgenden darum, sie genauer zu analysieren. Wenn bestimmte Abschnitte im Genom untersucht werden sollen, kann die Polymerase-Kettenreaktion (engl. Polymerase Chain Reaction, PCR) verwendet werden. Dies erlaubt zum Beispiel die Überprüfung, ob ein gewisser Gen-Abschnitt überhaupt vorhanden ist und mit weiterer Untersuchung potentiell auch um welche Variation eines DNA-Abschnittes es sich handelt.

In diesem Projekt wurde ein nichtkodierender DNA-Abschnitt der Chloroplasten untersucht. Aus der Literatur [8, 9] sind die Anfangs- und Endsequenzen des Abschnitts bekannt. Diese Bereiche werden Primer genannt. In unserem Fall verwendeten wir die beiden Primer, die aus den in Tab. 1 dargestellten Basenabfolgen bestehen.

TF _C For	CGAAATCGGTAGACGCTACG
TG _F Rev	GGGGATAGAGGGACTTGAAC

Tab. 1: Basenabfolge der zwei Chloroplasten-Primer, die verwendet wurden [8].

Für die PCR wird eine Lösung hergestellt, die neben der zu untersuchenden DNA und den Primern auch freie Nukleotide (mit den Basen A, T, G und C), sowie das namensgebende Enzym Taq-Polymerase enthält. Die PCR findet in Zyklen statt, die ungefähr 30-Mal wiederholt werden. Zu Beginn jedes Zyklus wird die Lösung so weit erwärmt, dass sich die Wasserstoffbrücken zwischen den Doppelsträngen der DNA lösen und die DNA dann in Form von Einzelsträngen vorhanden ist. Dann wird leicht abgekühlt, wodurch die Primer auf der DNA die passende Sequenz finden und dort lokal einen Doppelstrang bilden. Nach einer weiteren Temperaturänderung wird die Taq-Polymerase aktiv, welche von den Primern aus den Doppelstrang vervollständigt. Sie setzt an den Einzelsträngen der noch unvollständigen Doppelstrangform an und beginnt die fehlenden Basen einzubauen. Da die DNA in jedem Zyklus verdoppelt wird, steigt die Menge an DNA zwischen den Primern exponentiell an, wodurch sie dann in späteren Schritten sichtbar gemacht werden kann, zum Beispiel mittels Gel-Elektrophorese.

3.3. Digestion, Verdauung

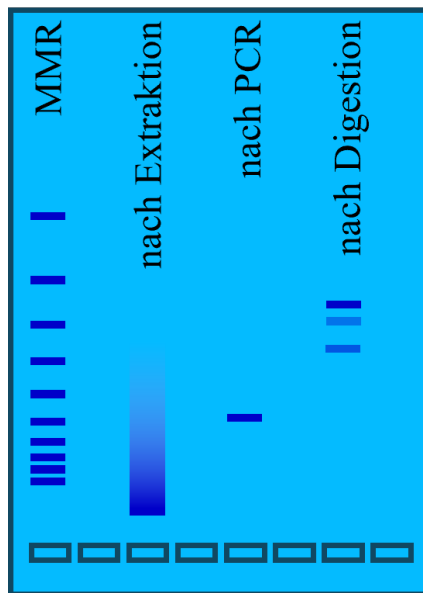
Die bei der PCR vervielfachte DNA wird nun in einem nächsten Schritt zerkleinert. Das kann man mit Hilfe eines Enzyms namens HinfI machen. Dieses Enzym sucht den DNA-Strang nach der Abfolge GATC (komplementär CTNAG) ab und schneidet ihn jeweils zwischen den Basen Adenosin (A) und Guanin (G) durch. Um das Enzym zu aktivieren benötigt es Wärme, weshalb die Proben mit dem Enzym für fünf Minuten in einem Thermocycler auf 37 °C erhitzt werden. So erhält man eine spezifische Anzahl DNA-Stücke, die unterschiedliche Längen aufweisen können. Enthält der DNA-Abschnitt beispielsweise drei Mal die Basenabfolge GATC, so entstehen vier DNA-Fragmente, die anschliessend im Gel sichtbar werden. Die ersichtlichen Resultate im Gel können charakteristisch für eine Art sein [10].

G		A	N	T	C
C	T	N	A		G

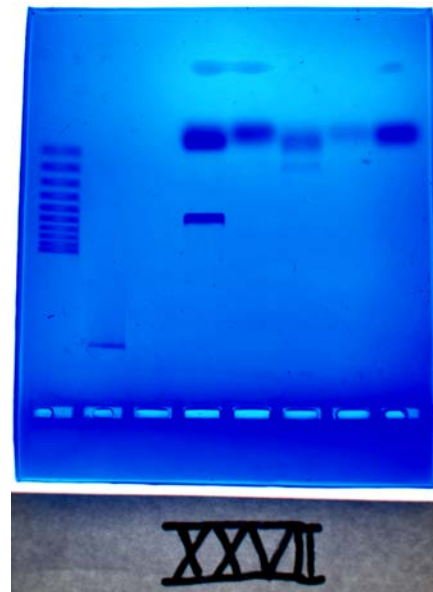
Tab. 2: Das Enzym HinfI sucht nach der Basenabfolge GATC und schneidet wie dargestellt.

3.4. Gel-Elektrophorese

Um die Resultate für das menschliche Auge sichtbar zu machen, wird eine Gel-Elektrophorese durchgeführt. Diese hat zum Ziel, die DNA-Fragmente nach ihrer Grösse aufzutrennen. Hierzu wird zuerst Agarosepulver mit Puffer erhitzt und dann in Gelträger gegossen. In die Gelträger werden Gelkämme eingehängt, welche nach dem Festwerden der Gele herausgenommen werden. Die Gele werden in die Elektrophoresekammern gelegt, welche mit Puffer befüllt sind. In die Taschen, welche durch die Gelkämme entstanden sind, werden nun die mit Loading Dye angefärbten Proben senkrecht hineinpipettiert. In einer Tasche wird ein MMR (Molecular Mass Ruler) eingefüllt, welcher dazu dient, die Länge der DNA-Stücke bestimmen zu können (vgl. Abb. 3a).



(a) Gel-Elektrophorese (Schema).



(b) Resultate des Gels XXVII.

Abb. 3: In der schematischen Darstellung (a) befindet sich der MMR in der ersten Spalte, eine Probe nach Extraktion in Spalte 3, nach PCR in Spalte 5 und nach Digestion in Spalte 7. In (b) ist einer der Gele dargestellt, die im Projekt entstanden sind. Spalte 1, MMR. Spalte 2, Rottanne nach Extraktion. Spalte 4, Rottanne nach PCR. Spalte 6, Rottanne nach Digestion. Die Fliessrichtung zeigt nach oben.

Der MMR wird bei der Auswertung der Daten verwendet, er hat in dieser Studie die Einheit von 100 Basenpaaren. Der oberste Strich ganz links entspricht einer DNA-Sequenz mit einer Länge von 100 Basenpaaren, und bei den Strichen darunter erhöht sich die Länge um je 100 Basenpaare. Diese Längen können dann mit den Proben verglichen werden. Wenn alle Proben befüllt sind, wird die Kammer geschlossen und es wird mittels angelegter Spannung ein Strom erzeugt. Weil DNA eine leicht negative Ladung besitzt, fließt sie durch das Gel zum positiv geladenen Pol. Da das Gel porös ist, wirkt es wie ein Sieb. Die kürzeren Fragmente fließen weiter in Richtung positiven Pol, und die längeren werden zurückgehalten. Nach dieser Auftrennung kann die Länge der Fragmente und die Anzahl der Banden mithilfe des MMRs abgelesen werden.

Damit die DNA-Banden in den Gelen einfacher zu sehen sind, können die Gele mit Fast Blast DNA Stain blau eingefärbt werden. Hierfür werden die Gele für 2 Minuten und 50 Sekunden in den Fast Blast DNA Stain gelegt und anschliessend ausgewaschen, um Farbüberreste zu entfernen.

Im Gel in Abb. 3b sind die Taschen, in die die Proben gefüllt werden, unten. Beim Ablesen ist also darauf zu achten, dass die Länge der Fragmente von unten nach oben abnimmt, da die längeren Abschnitte unten zurück bleiben. Die zweite Reihe weist beispielsweise einen langen Balken auf, was zeigt, dass dort DNA-Fragmente in ganz vielen unterschiedlichen Längen vorliegen. Bei der Auswertung wurde darauf geachtet, die gelben und die teils sehr schwachen Balken am Ende des Gels zu ignorieren, da sie eine unbekannte Verunreinigung darstellen.

4. Resultate und Diskussion

In diesem Projekt wurden insgesamt 97 Pflanzenproben von 25 verschiedenen Arten genommen. Ein Schwerpunkt wurde auf Rottannen (*Picea abies*), Föhren (*Pinus sylvestris*) und Grau-Erlen (*Alnus incana*) gelegt. Neben diversen anderen Bäumen und Sträuchern wurden auch ein Farn (*Dryopteris carthusiana*), Teichrosen (*Nuphar sp.*) und Bartflechten (*Usnea sp.*) untersucht.

Extraktionsprozess, PCR und Digestion wurden 120-Mal durchgeführt, und es wurden 28 Gele mit jeweils sieben Proben und dem Referenz-Massstab MMR analysiert. In den Gelen wurden neben den vollständig verarbeiteten Proben auch Proben direkt nach der Extraktion und nach der PCR untersucht. Dies erlaubt eine Fehleranalyse, sowie die Unterschiede zwischen cpDNA und allgemeiner DNA zu studieren. Die Resultate sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Pflanzenart	#	nach Extraktion	nach PCR	nach Digestion
Föhre - <i>Pinus sylvestris</i>	23			24 / 24
Rottanne - <i>Picea abies</i>	25	2 / 5	5 / 5	20 / 24
Grau-Erle - <i>Alnus incana</i>	10	2 / 2	1 / 2	3 / 12
Preiselbeere - <i>Vaccinium vitis-idaea</i>	5	0 / 1	1 / 1	5 / 5
Heidelbeere - <i>Vaccinium myrtillus</i>	3	2 / 2	1 / 2	1 / 3
Moorbeere - <i>Vaccinium uliginosum</i>	1	0 / 1	0 / 1	0 / 3
Moosbeere - <i>Vaccinium oxycoccos</i>	1		0 / 1	0 / 3
Schwarze Krähenbeere - <i>Empetrum nigrum</i>	1			3 / 3
Himbeere - <i>Rubus idaeus</i>	1	0 / 1	0 / 1	0 / 3
Moor-Birke - <i>Betula pubescens</i>	1	1 / 1	0 / 1	0 / 3
Zwerg-Birke - <i>Betula nana</i>	1	1 / 1	0 / 1	0 / 2
Vogelbeere - <i>Sorbus aucuparia</i>	2			0 / 4
Espe - <i>Populus tremula</i>	1	1 / 1	0 / 1	0 / 3
Sal-Weide - <i>Salix caprea</i>	1			0 / 1
Lorbeer-Weide - <i>Salix pentandra</i>	3			0 / 1
Ohr-Weide - <i>Salix aurita</i>	1			0 / 1
Besenheide - <i>Calluna vulgaris</i>	1			1 / 3
Rosmarinheide - <i>Andromeda polifolia</i>	1			3 / 3
Sumpfpfporst - <i>Rhododendron tomentosum</i>	2			2 / 2
Gemeiner Wacholder - <i>Juniperus communis</i>	1			3 / 3
Gewöhnliche Thuja - <i>Thuja occidentalis</i>	1			1 / 1
Gewöhnlicher Dornfarn - <i>Dryopteris carthusiana</i>	1			0 / 3
Teichrosen - <i>Nuphar sp.</i>	1			0 / 3
Bartflechten - <i>Usnea sp.</i>	1	1 / 1	0 / 0	0 / 3

Tab. 3: Es wurden 25 Pflanzenarten untersucht. Die Spalte # zeigt die Anzahl der gesammelten Proben an. Rechts sind die Resultate der Gelelektrophorese jeweils nach den Schritten Extraktion, PCR und Digestion dargestellt. Ein Wert von 20/24 bedeutet dabei, dass von 24 durchgeführten Gels 20 ein positives Resultat zeigen, also im Gel mindestens ein Balken sichtbar war.

4.1. Laubbäume im Herbst

Ein wichtiger Bestandteil von Wäldern sind Laubbäume. Darum wurde eine grosse Grau-Erlen-Reihe erhoben und mit einzelnen Proben der folgenden Laub- und Nadelbäume ergänzt: Moor Birke (*Betula pubescens*), Zwergbirke (*Betula nana*), Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*), Espe (*Populus tremula*), Sal-Weide (*Salix caprea*), Lorbeer-Weide (*Salix pentandra*), Ohr-Weide (*Salix aurita*), Besenheide (*Calluna vulgaris*), Rosmarinheide (*Andromeda polifolia*), Sumpfpfporst (*Rhododendron tomentosum*), Gemeiner Wacholder (*Juniperus communis*) und Gewöhnliche Thuja (*Thuja occidentalis*). Bei der Grau-Erlen-Reihe wurden

10 Proben von verschiedenen Bäumen dieser Art gesammelt und untersucht. Bei zwei Proben wurde die Gel-Elektrophorese auch nach der Extraktion und nach der PCR durchgeführt. Dabei ist auffällig, dass die Proben vor dem PCR-Schritt beide einen Balken haben, dass aber nach diesem Schritt nur noch bei einer von zwei Proben DNA nachgewiesen werden konnte. Nach der Digestion sind es sogar nur noch 3/12 der Proben, die einen aussagekräftigen Balken haben. Das könnte daran liegen, dass es vor der PCR noch genügend lange und viele Stücke DNA in der Probe hatte, weil neben der DNA der Chloroplasten vielleicht auch noch DNA der Zelle selbst vorhanden war. Diese DNA kann auch sichtbar werden im Gel. Das bedeutet, dass der Balken nach der Extraktion vielleicht eine Mischung aus Chloroplasten- und Zellkern-DNA ist. Das würde auch erklären, wieso man noch Resultate bekommt, obwohl die Blätter nicht mehr viele Chloroplasten enthalten. Da bei der PCR aber nur Chloroplasten-DNA vermehrt wird, könnte es sein, dass sich die DNA der Chloroplasten und die des Zellkerns so im Gel verteilen, dass beide zu schwach sind, um sie sehen zu können. Auch bei den Proben der Moorbirke, Zwergbirke und der Espe ist es auffällig, dass es wie bei der Grau-Erle vor der PCR gut sichtbare Resultate gibt, und nach der PCR keine aussagekräftigen Balken mehr vorhanden sind.

Ausnahmen sind die Rosmarinheide, der Sumpfporst, der Gemeine Wachholder und die Gewöhnliche Thuja, bei denen bei jeder Probe auch nach der Digestion DNA nachgewiesen werden konnte. Da alle vier im Gegensatz zu den oben erwähnten Arten immergrüne Pflanzen sind, bauen sie ihre Chloroplasten im Herbst nicht ab. Deswegen hat es genügend cpDNA, um einen Balken sehen zu können. Diese Resultate bestätigen die Theorie der Seneszenz im Herbst in Kapitel 2.1.

4.2. Datenreihen: Föhre, Rottanne, Grau-Erle

Theoretisch sollte jede Art ein spezifisches Balkenmuster im Agarosegel aufweisen, was die Bestimmung einer Baumart anhand der DNA-Untersuchung ermöglichen würde. Aus diesem Grund wurden Datenreihen zu drei verschiedenen Baumarten durchgeführt, damit die Ähnlichkeit der sichtbaren Muster überprüft werden konnte. Bei der Auswahl der Baumarten spielten verschiedene Faktoren mit. Da die Föhren und Rottannen von Anfang an gute Resultate erzielten und sie in grosser Zahl in dieser Region vorkamen, wurden diese beiden Arten ausgesucht. Die Grau-Erle wurde aus zwei Gründen gewählt. Einerseits konnte so ein Laubbaum genauer untersucht werden, und andererseits war die Population dieser Art relativ gross. Bei der DNA-Analyse der verschiedenen Datenreihen konnte gezeigt werden, dass die Balkenmuster der Individuen innerhalb einer Art übereinstimmen, während ein Unterschied zwischen den verschiedenen Arten festgestellt werden kann (siehe Abb. 4). Um diese Unterschiede noch deutlicher hervorheben zu können, wären beispielsweise Versuche mit unterschiedlichen Agarosekonzentrationen des Gels oder die Verwendung eines Polyacrylamidgels möglich.

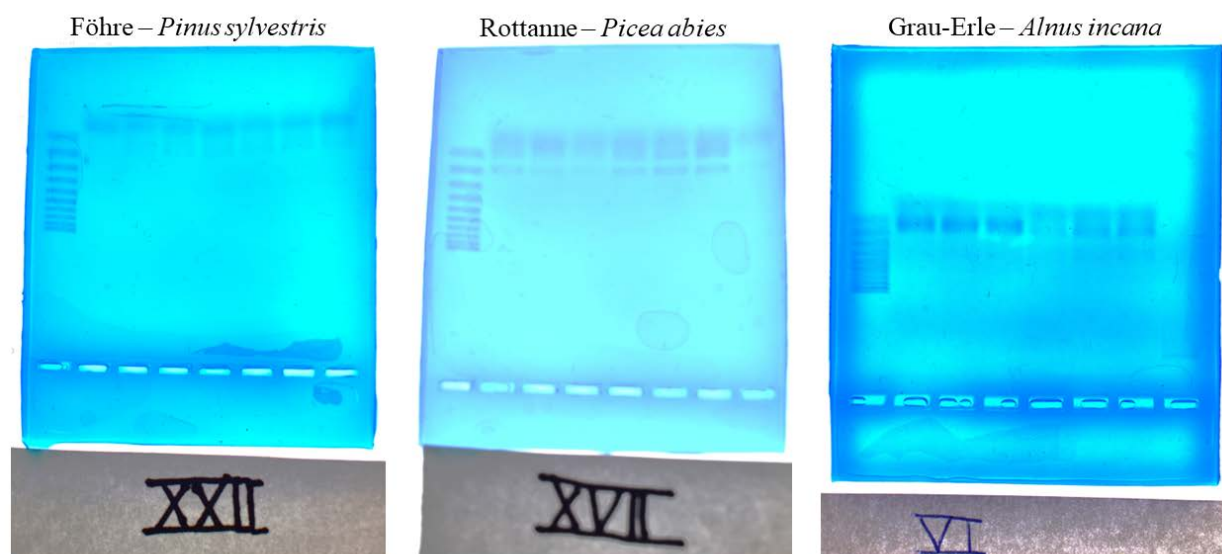


Abb. 4: Die drei Gele zeigen einen Teil der Datenreihen zur Föhren-, Rottannen- und Grau-Erlen-Population (von links nach rechts).

Bei der Sammlung der Föhren wiesen alle 24 untersuchten Individuen ein positives Resultat in der Gel-Elektrophorese nach der Digestion auf. Die Resultate der Rottannen waren bei 20 der 24 getesteten Exemplare positiv. Die vier Proben ohne sichtbare Balken waren alle im gleichen Gel, in welchem auch die weiteren drei Proben nur schwach ersichtliche Balken aufwiesen. Der Grund dafür könnte bei der Herstellung oder Ladung des Agarosegels zu finden sein. Am Beispiel der Rottanne sind in Abb. 3b zusätzlich Gel-Resultate nach der Extraktion und nach der PCR dargestellt.

In der Datenreihe der Grau-Erlen wurden 12 Individuen untersucht, wovon bei drei Exemplaren ein Resultat nach der Gel-Elektrophorese ersichtlich war. Bei zwei Proben ohne sichtbaren Balken im Gel wurden in einem nächsten Schritt die Resultate nach der Extraktion und der PCR mittels Gel-Elektrophorese ermittelt. Bei beiden Individuen waren deutliche Resultate nach der Extraktion erkennbar, während nach der PCR nur eine der Proben ein schwaches Resultat aufwies (vgl. Kap. 4.1).

Für die unterschiedlichen Resultate könnte der Zeitpunkt der Probenahme verantwortlich sein, denn die Proben der drei Individuen mit einem positiven Resultat wurden zwei Tage vor den anderen Exemplaren gesammelt. Dadurch könnte bei den später gesammelten Proben die Anzahl Chloroplasten durch die natürliche Zersetzung bereits zu stark gesunken sein, sodass zu wenig DNA für ein sichtbares Resultat vorhanden war. Ein weiterer Faktor wäre der Zeitraum der Aufbewahrung bis zur Verarbeitung. Dieser war bei der zweiten Grau-Erlen-Gruppe grösser, was erneut zu einem weiter fortgeschrittenen Abbau der Chloroplasten in den Blättern geführt haben könnte. Die Blätter wurden in Zip-Säcken mit Silicagel-Beuteln aufbewahrt, wobei eine vergleichsweise erhöhte Luftfeuchtigkeit in den Säcken nicht ausgeschlossen werden kann. Dies würde allenfalls zur schnelleren Zersetzung der Zellbestandteile führen.

4.3. Beerenreihe

Da in der finnischen Flora viele unterschiedliche Beeren zu finden sind, wurden die Blätter einiger Beeren gesammelt und so eine kleine Beerenreihe erhoben. Die Resultate zu den Preiselbeeren (*Vaccinium vitis-idaea*), den Heidelbeeren (*Vaccinium myrtillus*) und den Krähenbeeren (*Empetrum nigrum*) werden im Folgenden genauer diskutiert. Die Preiselbeeren und Krähenbeeren zählen zu den immergrünen Pflanzen, somit sollte in jeder Probe genügend cpDNA vorhanden sein, da diese Pflanzen ihre Chloroplasten im Winter nicht abbauen. Bei den Heidelbeeren hingegen ist dies nicht sicher, da sie zu den laubabwerfenden Pflanzen zählen. Wie bei Gel XII ersichtlich (Abb. 5), haben alle aus den Preiselbeeren extrahierten DNA-Abschnitte die gleiche Länge. Dies zeigt, dass es sich um dieselbe Art handelt. Aus Tab. 3 kann entnommen werden, dass nach der Extraktion noch keine DNA ersichtlich war. Nach der PCR und der Digestion konnte bei allen prozessierten Proben DNA nachgewiesen werden. Vermutlich ist das darauf zurückzuführen, dass nach der Extraktion zu wenig DNA vorhanden war, um ein Resultat anzuzeigen. Nach der PCR war durch die Vervielfachung höchstwahrscheinlich genug DNA vorhanden, um im Gel sichtbare Balken zu produzieren.

Bei den Heidelbeeren hingegen zeigten nach der Extraktion alle Proben nach der PCR ein Resultat, nach der Digestion allerdings nur noch eine einzige Probe. Hier ist also ein Fehler im Arbeitsablauf zu vermuten. Es könnte aber auch daran liegen, dass zwar DNA extrahiert wurde, allerdings keine cpDNA darunter war, da die Chloroplasten bereits abgebaut waren. Somit konnte keine cpDNA vervielfacht werden, und es sind nach der Digestion keine Resultate mehr im Gel ersichtlich.

Von der Krähenbeere wurde nur ein Individuum untersucht, allerdings wurden drei Proben desselben Strauches genommen und analysiert. Eine Gel-Elektrophorese wurde erst ganz am Schluss, also nach der Digestion durchgeführt. Diese zeigte zeigte erwartungsgemäss für alle Proben das gleiche Muster, wie im Gel XIV ersichtlich.

Wie aus der grossen Tabelle entnommen werden kann, wurde ebenfalls eine Moorbeere untersucht, welche auch zur Gattung *Vaccinium* gehört. Da diese aber keine Resultate zeigte, was auf unsorgfältiges Arbeiten zurückzuführen ist, wird sie nicht weiter erwähnt.

Vergleicht man die verschiedenen Arten in Abb. 5 so fällt auf, dass die Preisel- und die Heidelbeeren zwei Balken mit ähnlicher Länge aufweisen und die Krähenbeere drei Balken besitzt. Die Methode wird verwendet, um Verwandtschaftsgrade zu finden, die einzelnen Arten kann man also nicht eindeutig auseinander halten. Das ähnliche Bandenmuster von Preiselbeeren und Heidelbeeren passt aber zur Tatsache, dass sie enger verwandt sind miteinander als mit der Krähenbeere.

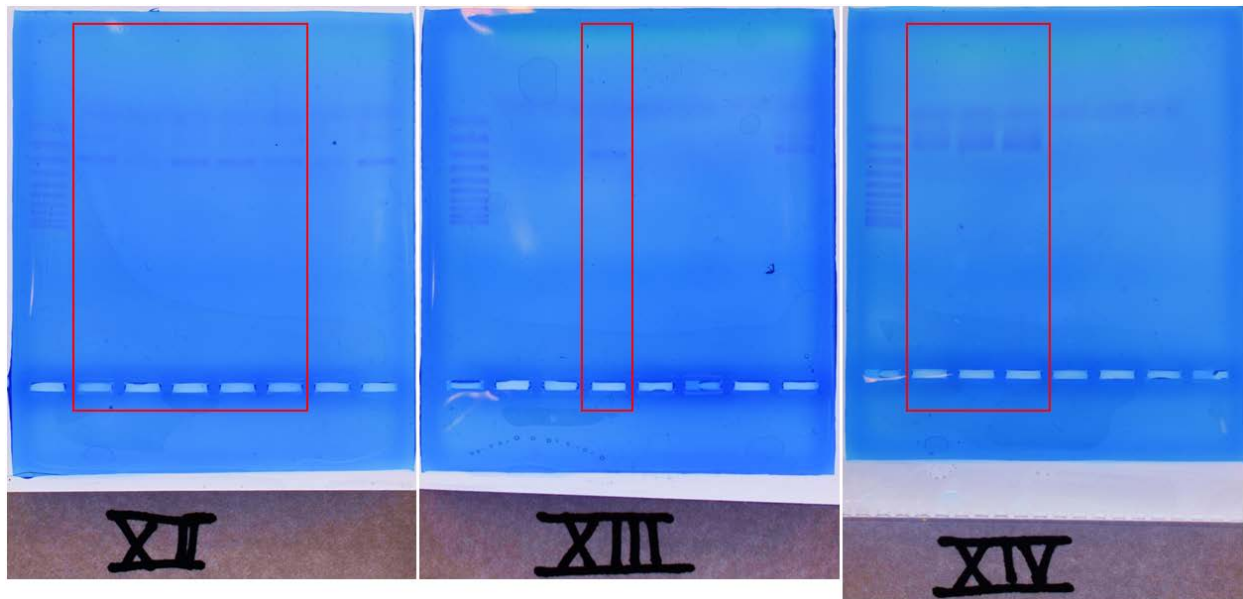


Abb. 5: Resultate zu Preiselbeeren (links), Heidelbeeren (mitte) und Krähenbeere (rechts). Die Position der Balken können mit dem MMR verglichen werden, um zu sehen, dass Preiselbeeren und Heidelbeeren einen gut sichtbaren Balken bei einer Länge von 300 Basenpaare aufzeigen, während der längste DNA-Abschnitt Balken bei den Krähenbeeren ungefähr 200 Basenpaare gross ist.

4.4. Flechte Resultat

Aus Interesse wurde auch eine Bartflechte untersucht. Flechten bestehen aus einer Symbiose von Pilzen und Algen oder Cyanobakterien. Sie gehören somit nicht zum Reich der Pflanzen, aber sie können dennoch Fotosynthese durchführen. Tatsächlich wird in der Endosymbiontentheorie angenommen, dass die Chloroplasten aus Cyanobakterien entstanden und somit vergleichbares Erbgut haben könnten. Die Untersuchung zeigt, dass die Extraktion von DNA auch in Flechten funktioniert. Jedoch konnte nach der PCR und nach der Digestion kein Balken in den Gels nachgewiesen werden, was heissen könnte, dass die Basenabfolge in Flechten nicht vom gewählten Primer erkannt werden kann.

4.5. Vergleich mit der Literatur

In einer Highschool-Studie wurde mit der hier verwendeten Methode eine Datenbank mit Anzahl und Grösse von DNA-Fragmenten von Bäumen in Grossbritannien erstellt [9]. Dies erlaubt im Prinzip den Vergleich der Resultate. Aufgrund der stark unterschiedlichen Standorte Grossbritannien und Finnland wurden jedoch sehr unterschiedliche Spezies gefunden. Die einzigen übereinstimmenden Arten sind die Sal-Weide (*Salix caprea*) und die Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*). Jedoch war die Digestion der Chloroplasten-DNA in unserem Fall wahrscheinlich wegen der Seneszenz nicht möglich, was keinen Vergleich ermöglicht. Die Herstellung einer Datenbank war in unserem Fall nicht möglich, da dafür eine exaktere Variante der Gel-Elektrophorese verwendet werden müsste, nämlich die Polyacrylamid-Gel-Elektrophorese PAGE.

5. Fazit

Dies war das dritte DNA-Projekt, welches von der **academia** durchgeführt wurde. Zum ersten Mal wurde pflanzliche DNA untersucht und die Methodik der Digestion angewendet. Von allen untersuchten Proben wurden am meisten Rottannen- und Föhren-Proben prozessiert. Die Anzahl und Längen der DNA-Abschnitte nach der Digestion sind innerhalb der Arten konsistent und zwischen den Arten unterschiedlich genug, um als Unterscheidungsmerkmal gelten zu können. Ebenfalls wurden Daten zu Laubbäumen und Sträuchern erhoben. Da die Proben aber im Herbst gesammelt wurden, sind bei laubabwerfenden Pflanzen vermehrt keine Resultate zu finden. Dies liegt vermutlich am Abbau der Chloroplasten von Laubbäumen im Herbst. Für ein nächstes Projekt wäre es deshalb spannend, die sogenannte Seneszenz genauer zu untersuchen.

chen, indem Proben der gleichen Art über einen längeren Zeitraum im Herbst auf deren cpDNA untersucht werden.

Teilweise gab es Schwierigkeiten beim Entscheiden, ob ein leichter Balken auch wirklich ein Resultat ist. Die Verwendung der PAGE oder das Markieren mit Fluoreszenz würde dies verbessern. Alles in allem hat sich die ausprobierte Methodik aber bewährt.

6. Dank

Damit dieses Projekt durchgeführt werden konnte, bekamen wir Hilfe von verschiedenen Seiten. Zunächst möchten wir uns bei der Firma Microsynth, insbesondere bei Christian Winiger bedanken, welcher uns die Primer zur Verfügung stellte. Ein weiterer Dank geht an Benoit Kunz von der Fachschaft Biologie der Kantonsschule Wil, deren Material wir für unser Lager ausleihen konnten. Alles weitere Material wurde uns von der Fachschaft Biologie der Kantonsschule Wattwil zur Verfügung gestellt, wobei Gaby Zimmermann und Rosaria Caruso die Organisation übernommen haben. Wir möchten auch Rahel Winiger danken für eine spontane fachliche Unterstützung beim Probedurchlauf. Die ganze **academia** wäre ohne das Leiterteam, bestehend aus Rolf Heeb, Gabriela Eugster, Felix Berger, Patricia Meile, Urs Grob und Helena Aebersold, nicht möglich.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Ahlswede H. et al., «Biologie Oberstufe», Cornelsen Verlag, 3. Auflage (2015).
- [2] «Aufbau des Chromosoms und der DNA», <https://www.tgg-leer.de/projekte/genetik/dna2/dna2.html> (Zugriff: 27.11.2023).
- [3] «Chloroplasten – Vektor Illustration», <https://www.istockphoto.com/de/vektor/chloroplasten-gm479383361-36253660> (Zugriff: 27.11.2023).
- [4] «Pharmawiki Photosynthese», <https://www.pharmawiki.ch/wiki/index.php?wiki=Photosynthese> (Zugriff: 27.11.2023).
- [5] McCabe P., «Senescence in plants», John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, New Jersey (2017).
- [6] Lev-Yadun S., «The phenomenon of red and yellow autumn leaves: Hypotheses, agreements and disagreements», *Journal of evolutionary biology* **35**, 10 (2022).
- [7] «DNeasy Plant Mini Kit», <https://www.qiagen.com/de-us/products/discovery-and-translational-research/dna-rna-purification/dna-purification/genomic-dna/dneasy-plant-pro-and-plant-kits?catno=69104> (Zugriff: 10.01.2023).
- [8] Taberlet P. et al., «Universal primers for amplification of three non-coding regions of chloroplast DNA», *Plant Molecular Biology* **17**, 5 (1991).
- [9] Finlayson A. und Cavers S., «DNA Fingerprinting for identification of British tree species», NERC/-Centre for Ecology and Hydrology, 25pp. (Nuffield Science Bursary Project Report) (Unpublished) (2006).
- [10] «HinfI, ThermoFisher», <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/ER0801> (Zugriff: 15.01.2024).

Stimulusverarbeitung und Erinnerung während des Wach-Schlaf-Übergangs

Corinne Eicher, Salome Haller, Lukas Keller, Louis Klosterkamp,
Nils Lüthi, Pascal Schmuki

1. Einführung

Während des Einschlafens wechseln wir von einem aktiven Bewusstseinszustand mit erhöhter sensorischer Wahrnehmung, kognitivem Bewusstsein und Reaktionsfähigkeit auf externe Stimuli in den Schlaf [1, 2, 3, 4, 5]. Dieser ist gekennzeichnet durch einen reversiblen Zustand verminderten Bewusstseins mit charakteristischer Reduktion der motorischen Aktivität und tiefer Reaktionsbereitschaft auf externe Stimuli [6, 7, 8]. Auch wenn uns der Einschlafprozess nahtlos erscheint, unterliegen diesem Vorgang komplexe neurobiologische Mechanismen, die den Übergang zwischen der aktiven Wach- in die erholsame Schlafphase koordinieren [1, 3, 9, 10]. Der Schlaf-Wach-Rhythmus ist ein fundamentaler Aspekt des circadianen Rhythmus und wird sowohl von inneren biologischen Uhren beeinflusst als auch externen Zeitgebern, allen voran vom Licht. Im Zentrum dessen Regulation stehen ein Netzwerk von gekoppelten Hirnregionen, Neurotransmittersystemen und neuromodulatorischen Bahnen, die in ausgeklügelter Zusammenarbeit einen reibungslosen und zügigen Übergang zwischen Wachsein und Schlaf ermöglichen [1]. Erkenntnisse über diese Mechanismen werfen nicht nur Licht auf die komplexe Schlafregulation, sondern haben weitreichendere Bedeutung für unser Verständnis der kognitiven Informationsverarbeitung, Gedächtniskonsolidierung und Emotionsregulation [3]. Mit zunehmendem Wissen über den Schlaf-Wach-Übergang steigt auch das Potenzial, gezielte Therapien für Schlafstörungen und assoziierte Erkrankungen zu entwickeln [9].

Eine Möglichkeit zur Erforschung des Schlaf-Wach-Übergangs ist die gleichzeitige Erfassung unterschiedlicher Aspekte der Informationsverarbeitung. Bei zeitversetztem Aussetzen der untersuchten Funktionen können diese entkoppelt werden, wie Klinkowski et al. demonstrierten [11]. Studienteilnehmende hörten während des Einschlafens ein Hörbuch, dabei ertönte während unregelmässigen Abständen ein Ton, den sie durch Tasterdruck bestätigen sollten. Sobald mehrere aufeinanderfolgende Töne nicht bestätigt wurden, weckte der Versuchsleiter den Teilnehmenden und legte die Hörbuchsequenz schriftlich vor mit der Aufgabe, Textstellen mit klarer, vager und fehlender Erinnerung zu markieren. Dieses Vorgehen wurde für mehrere Stunden im Rahmen eines seriellen Weckversuchs wiederholt, bevor Teilnehmende den Rest der Nacht ungestört schlafen durften. Interessanterweise zeigte sich ein deutlich früherer Rückgang der Erinnerungsfähigkeit als der Fähigkeit, mittels Tasterdruck auf den Ton zu reagieren.

Die Erinnerungsfähigkeit während des Einschlafens ist wenig untersucht, und die zugrundeliegenden neuronalen Mechanismen sind nicht vollständig verstanden [12, 13]. Studien konnten aber aktive Prozesse der Gedächtniskonsolidierung während des Einschlafens innerhalb der initialen Schlafstadien zeigen, und die Ergebnisse weisen sogar darauf hin, dass Informationen, die während dieser Phase präsentiert werden, am darauffolgenden Morgen häufiger erinnert werden [14].

Die Reaktionsfähigkeit auf auditorische Stimuli bleibt bekanntermassen auch während des Leichtschlafs erhalten [15]. Die sequenzielle Prozessierung in den verschiedenen involvierten neuronalen Strukturen kann als akustisch evozierte Potenziale (AEPs) in den Hirnströmen (Oberflächen-Elektroenzephalogramm, EEG) detektiert werden und ermöglicht wertvolle Einblicke in die Informationsverarbeitung [16, 17, 18]. Dazu wird derselbe Stimulus wiederholt präsentiert und das EEG-Signal über die Versuche gemittelt, sodass zufälliges Rauschen reduziert und das AEP erst sichtbar wird. Die resultierende AEP-Kurve besteht aus mehreren, abgegrenzten Komponenten, die mit spezifischen Stadien der auditorischen Informationsverarbeitung assoziiert sind [19]. Die früheste Komponente, der positive Ausschlag P50, tritt 50-100 ms nach dem Stimulus auf und repräsentiert die initiale kortikale Antwort [20]. Der negative Ausschlag N100 ist 100-150 ms nach dem Stimulus zu erwarten und reflektiert die Erkennung und Unterscheidung von akustischen Eigenschaften [21]. Die darauffolgende positive Komponente P200, die 150-200 ms nach dem Stimulus auftritt, wird mit höheren Aspekten der Verarbeitung und Kognition in Verbindung gebracht, beispielsweise einem Vergleich mit bekannten Tonmustern. Dasselbe gilt für die negative Komponente N200 mit einer Latenz

von 200-250 ms [22]. Faktoren wie Aufmerksamkeit, Erregungszustand und interindividuelle Unterschiede beeinflussen AEPs, die somit als Fenster in die Prozesse der Integration auditorischer Information in andere sensorische Modalitäten genutzt werden können [23]. Der Wach-Schlaf-Übergang geht mit Veränderungen in der sensorischen Wahrnehmung einher, wobei das Hirn zur Erhaltung der Schlafkontinuität sukzessive weniger responsiv gegenüber gewissen Stimuli wird [15]. Während des Leichtschlafs kann eine Reduktion der Amplitude des AEPs auftreten, die auf eine Veränderung in der sensorischen Informationsverarbeitung hinweist [16, 24].

Beim vorliegenden Projekt handelt es sich um einen Replikationsversuch der Studie von Klinowski et al. [11], wobei anstelle eines seriellen Weckversuchs eine kurze Tagesschlaf-Episode ohne Aufwecken untersucht wurde. Neben der Entkoppelung von Stimulusverarbeitung und Erinnerungsfähigkeit wurde in der vorliegenden Studie ein besonderes Augenmerk auf das EEG direkt vor, während und nach der Stimuluspräsentation gelegt.

2. Methodik

2.1. Studiendesign

In der vorliegenden Studie wurde das Verhalten von zwei verschiedenen Komponenten der Informationsverarbeitung während des Wach-Schlaf-Übergangs untersucht, nämlich die Erinnerung an Informationen und die Reaktion auf akustische Stimuli. Die Erinnerungsfähigkeit an mässig komplexe Dialoge wurde mittels Abspielen eines Hörbuchs getestet, in welchem in zufälligen Abständen Töne integriert waren. Die Probanden sollten mittels eines an der Hand befestigten Tasters die Wahrnehmung der Signaltöne bestätigen. Während der gesamten Zeit wurde das EEG sowie EOG (Elektrookulogramm) zur Aufzeichnung der Augenbewegungen registriert, um später die Schlafstadien bestimmen zu können und quantitative EEG-Analysen durchzuführen.

Interessierte Mitglieder der Jugendforschungsgruppe **academia** wurden zunächst über Zweck und Ablauf der Studie informiert und meldeten sich darauf freiwillig für die Teilnahme. Sämtliche Messungen fanden nachmittags (12:00 - 18:00 Uhr) in einem ruhigen, abgedunkelten Zimmer in Finnland zwischen dem 26.09.2023 und 02.10.2023 statt. Die Schlafenster betrugen minimal 71 min und maximal 95 min. Es standen drei verschiedene Hörbücher zur Verfügung, pro Proband wurde aber jeweils nur eine Messung durchgeführt. Die Hörbücher wurden mittels einer Blockrandomisierung mit Blockgrösse 6 zufällig auf die Teilnehmenden verteilt.

2.2. Messaufbau

2.2.1. Elektrophysiologische Messungen

Zur Aufzeichnung des Schlafs wurde eine Polysomnografie durchgeführt. Es standen zwei Apparaturen mit je sechs Kanälen zur Messung elektrophysiologischer Signale zur Verfügung, so konnten immer zwei Probanden gleichzeitig registriert werden. Die Messungen beruhen auf dem Prinzip, dass die Spannung zwischen zwei Elektroden gemessen wird und eine dritte als Referenz dient. Die Signale wurden mit einem selbst konstruierten Verstärker und einem Datenlogger (DI-4718B, DATAQ Instruments) in einer Messfrequenz von 500 Hz aufgezeichnet.

Von den sechs Kanälen wurde einer für die Messung der Herzströme (Elektrokardiografie, EKG), zwei für die Aufzeichnung des EOG und drei für die des EEG eingesetzt. Dies ermöglichte die Bestimmung der jeweiligen Schlafstadien. Für die EEG-Aufzeichnungen wurden ein Bandpass-Filter von 1 Hz bis 100 Hz (−3 dB) benutzt. Pro Proband wurden 13 Goldelektroden (Genuine FEGH Gold Disc Electrodes, Grass Technologies) benötigt, zwei pro Kanal und eine gemeinsame Referenzelektrode. Die Elektroden wurden mit Elektrodenpaste (Genuine EC2 Electrode Cream, Grass Technologies) und hautverträglichem Tape (MicroporeTape, 3M und Leukotape, BSN Medical) am Probanden befestigt. Da die EEG-Elektroden auf der behaarten Kopfhaut ohne Tape angebracht wurden, diente ein Haubennetz als zusätzliche Fixierung. Um eine Verfälschung der Messung durch einen hohen Hautwiderstand zu vermeiden, wurden sämtliche Hautstellen, die mit den Elektroden in Berührung kamen, vorab mit Desinfektionsmittel und einer abrasiven Paste (Nuprep Hautvorbereitungsgel, Weaver and Company) bzw. Schleifpapier gereinigt.

Zur Registrierung des EKGs wurden die beiden Elektroden an den Extremitäten platziert, eine an der rechten Hand und die andere am linken Fuss (2. Ableitung nach Einthoven). Aufgezeichnet wird das elektrische Potenzial des dazwischenliegenden Herzens, welches durch die Kontraktion der Herzmuskelzellen zustande kommt. Beim EEG wird das Summenpotenzial gemessen, das bei der Depolarisation von Nervenzellen entsteht. Gemäss internationalem 10-20-System wurde eine zentrale (C4-M1), eine frontale (F4-M1) und eine okzipitale (O2-M1) EEG-Ableitung aufgezeichnet. Bei der Positionierung der EOG-Elektroden wurden die beiden Ableitungen E1-M2 und E2-M2 gemäss der American Academy of Sleep Medicine (AASM, [25]) gewählt. Dazu wurde je eine Elektrode 1 cm lateral und 1 cm unterhalb des linken Augenwinkels und 1 cm lateral und 1 cm oberhalb des rechten Augenwinkels positioniert. Die beiden dazugehörigen Referenzelektroden wurden am rechten Mastoid platziert.

Die verschiedenen Schlafstadien wurden aufgrund der EEG- und EOG-Kurven anhand der AASM-Kriterien visuell bestimmt [25]. Zudem konnte das EEG-Signal durch Berechnung von Informationsentropie, AEPs und Spektralanalysen quantitativ ausgewertet werden.

2.2.2. Hörbücher

Bei den drei Hörbüchern handelt es sich um die Titel «Das kalte Auge», «Der dreiäugige Totenkopf» und «Fluch des Piraten» aus der Reihe «Die drei Fragezeichen» mit einer Dauer zwischen 71 min und 95 min. Darin integriert waren in zufälligen Abständen zwischen 10 s und 30 s Signaltöne von 2 s Dauer mit einer Frequenz von 400 Hz. Die Lautstärke der Töne war dem abgespielten Hörbuch angepasst, und die Teilnehmenden durften diese individuell so einstellen, dass sie genügend laut war, um dem Inhalt zu folgen, aber ausreichend leise, um dabei einschlafen zu können. Die gewählte Lautstärke wurde mittels eines Schallpegelmeters an der Kopfposition gemessen und variierte zwischen 35 dB und 40 dB. Start und Ende der Signaltöne wurden mittels eines eigens dafür entwickelten Tondetektors auf einem weiteren Kanal desselben Datenloggers aufgezeichnet, der für die elektrophysiologischen Signale verwendet wurde. Die Studienteilnehmenden wurden instruiert, einen an der Hand befestigten Taster zu betätigen, sobald sie einen Ton hörten. Auch der Tasterdruck wurde synchron auf demselben Datenlogger aufgezeichnet, sodass Latenzzeiten präzise berechnet werden konnten.

2.2.3. Erfassung von Schlafgewohnheiten und Erinnerungsfähigkeit

Vor der Messung wurden Probanden mittels standardisierter, validierter Fragebögen zu ihrem Schlafverhalten befragt. Der Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI, [26]) umfasst die subjektive Schlafqualität der letzten vier Wochen. Daraus wurde der PSQI-Globalscore berechnet, der einen Wert von 0 - 21 Punkten annehmen kann, wobei tiefere Scores auf eine bessere Schlafqualität hindeuten. Üblicherweise erfolgt eine Einteilung in gute Schläfer (0 - 5 Punkte), schlechte Schläfer (6 - 10 Punkte) und Hinweis auf eine relevante Schlafstörung (>10 Punkte) [27]. Der Chronotyp, also ob jemand eher ein Frühaufsteher (Lerche) oder Langschläfer (Eule) ist, wurde mittels des Munich Chronotype Questionnaire (MCTQ, [28]) erfasst, wobei das Schlafverhalten getrennt für Arbeits- und Freitage erhoben wurde. Daraus wurde die Mitte der Schlafenszeit (*mid sleep time*) korrigiert für das unter der Woche akkumulierte Schlafdefizit (MSFsc) berechnet. Die Epworth Sleepiness Scale (ESS, [29]) erfasst die Tagesschläfrigkeit und wird als Summenscore aus den 8 Einzelfragen (jeweils 0 - 3 Punkte) berechnet, wiederum entspricht ein tiefer Score geringer Tagesschläfrigkeit. Gewöhnlich wird ein ESS-Score ab 10 Punkten als auffällig angesehen.

Nach der Messung wurden die Probanden dazu befragt, wie gut sie sich an den Inhalt des Hörbuchs erinnern konnten. Dazu wurden ihnen die jeweils unmittelbar vor dem Signalton liegenden Textstellen zur Beurteilung vorgelegt, ob die Erinnerung sicher, vage oder gar nicht vorhanden war. Schliesslich machten sie Angaben zu Genussmittelkonsum, Gesundheit und Schlafenszeiten während der letzten drei Tage und Nächte vor der Messung.

2.3. Einschlusskriterien und Verhaltensrichtlinien

2.3.1. Einschlusskriterien

Die Auswahl der Probanden erfolgte nach den folgenden Einschlusskriterien:

- junge Probanden zwischen 15 und 30 Jahre;

- keine Reisen mit einer Zeitverschiebung von mehr als 2 Zeitzonen in den letzten 30 Tagen vor der Studie;
- mässiger Koffeinkonsum am Tag der Messung;
- keine Schlafstörungen, kein extremer Chronotyp, keine Schlafmedikamente in den letzten beiden Jahren vor der Studie.

2.3.2. Verhaltensrichtlinien

Die Probanden wurden angehalten, sich an die folgenden Richtlinien zu halten:

- Verkürzen der Bettzeit auf maximal 5 h im Bett in der Nacht vor der Messung;
- Verzicht auf koffeinhaltige Getränke, massvoller Konsum zuckerhaltiger Produkte am Tag der Messung;
- keine Weitergabe von Inhalten der Hörbücher.

Die Einhaltung wurde mittels Fragebogen überprüft.

2.4. Auswertung und Statistik

Die Auswertung der umfangreichen Datensätze erfolgte mit R sowie mit grösstenteils selbstgeschriebenen Python- und Matlab-Programmen. Einzig für das Schlafstadien-Scoring wurde das Open-Source Python-Paket «Visbrain» [30] verwendet, und die Artefaktkorrektur wurde mittels semi-automatischer Routine in Matlab durchgeführt [31].

In einem ersten Schritt wurden für jeden Probanden die Startzeiten der Signaltöne mittels Mikrofonaufzeichnungen ermittelt. Falls der Taster innerhalb von 2.5 s nach Signaltonaufzeichnung betätigt wurde, wurde dies als korrekte Tasterbetätigung klassifiziert. Die nach der Messung abgefragte Erinnerungsfähigkeit an die jeweiligen Textstellen im Hörbuch unmittelbar vor dem Signalton wurde als sicher, vage und nicht vorhanden codiert angefügt. Für den Zeitpunkt jedes Signaltons waren so die Informationen vorhanden, ob der Taster korrekt betätigt wurde und wie sicher die Erinnerung an die entsprechende Textstelle im Hörbuch war.

Die Bestimmung der Schlafstadien erfolgte visuell anhand der Kriterien der AASM, zunächst in 30 s-Epochen und im Anschluss in 10 s-Epochen [25]. Dazu wurden die AASM-Kriterien entsprechend angepasst. Scorer waren in Bezug auf Teilnehmende verblindet, um unvoreingenommen zu bleiben. Jede Epoche zwischen Lichterlöschen und Versuchsende wurde einem der Schlafstadien Wach (W), NREM-1 (Non-Rapid-Eye-Movements-1, N1, Leichtschlaf), NREM-2 (N2, mitteltiefer Schlaf), NREM-3 (N3, Tiefschlaf) und REM (R) zugeordnet. Alle Schlafstadien-Scorings wurden von derselben, erfahrenen Person überprüft und angepasst. Zur Berechnung der Schlafstadien-Verteilung wurden die in der Schlafforschung üblichen 30 s-Epochen verwendet, die 10 s-Epochen dienten der Bestimmung, welches Schlafstadium zum Zeitpunkt der Signaltöne vorlag.

Die Artefaktkorrektur mittels Open-Source Paket in Matlab basierte auf den 10 s-Epochen und wurde nach digitalem Downsampling auf 125 Hz und Bandpass-Filterung von 0.3 - 35 Hz durchgeführt. Jede Messung wurde von derselben, erfahrenen Person wiederum verblindet analysiert. Für jeden der drei EEG-Kanäle wurde bestimmt, in welchen 10 s-Epochen Artefakte vorlagen, beispielsweise aufgrund von Bewegungen, um diese von den späteren quantitativen EEG-Analysen auszuschliessen.

Zunächst wurde die Schlafstadienverteilung für jeden einzelnen Teilnehmenden ermittelt und im Anschluss über alle gemittelt. Da das Stadium R nur bei zwei Probanden und in sehr wenigen Epochen vorkam, beschränkten sich sämtliche Analysen auf den Wachzustand und den NREM-Schlaf.

Für jedes Schlafstadium S wurde die Informationsentropie

$$H(S) = - \sum_{i=1}^N \mathbb{P}(x_i) \ln \mathbb{P}(x_i) \quad (1)$$

in artefaktfreien Epochen berechnet, wobei $\ln$ der natürliche Logarithmus und $\mathbb{P}(x_i)$ die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses x_i sind. Je höher der Entropiewert einer Kohorte ist, desto schwieriger ist es, eine Voraussage über die Auftrittswahrscheinlichkeit der Elementarereignisse zu treffen.

Zur Untersuchung der Hypothese, dass die Erinnerungsfähigkeit vor der Reaktion auf akustische Stimuli abnimmt, wurde der erstmalige Zeitpunkt erfasst, an dem sich die Probanden zweimal hintereinander nicht

an eine Textstelle erinnern konnten beziehungsweise den Taster zweimal nicht korrekt betätigten. Aufgrund der geringen Stichprobengrösse wurden als Hypothesentests sowohl der parametrische, gepaarte *t*-Test als auch der nicht-parametrische Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest verwendet, um die Robustheit der statistischen Auswertung zu überprüfen.

Die AEPs wurden zunächst für die verschiedenen Schlafstadien separat berechnet, indem von sämtlichen Probanden alle artefaktfreien Epochen eines Schlafstadiums in Bezug auf Tonbeginn gemittelt wurden. Im Anschluss wurde dasselbe Vorgehen getrennt für korrekte und fehlende Tasterbetätigung sowie die drei Kategorien der Erinnerungsfähigkeit wiederholt, zunächst über alle Schlafstadien. Schliesslich wurde dieselbe Analyse ausschliesslich im Stadium N1 angewendet, da dieses die grösste Anzahl Wiederholungen der verschiedenen Fälle aufwies. Für jeden Zeitpunkt wurden die Kurvenverläufe mittels ungepaarten *t*-Tests verglichen. Dies wurde für alle drei EEG-Kanäle durchgeführt. Präsentiert werden aufgrund der topographischen Nähe zum auditorischen Kortex nachfolgend ausschliesslich die Daten der zentralen Ableitung (C4-M1), da alle Kanäle vergleichbare Resultate zeigten.

Über die Dauer von 10 s vor Tonbeginn wurde eine Spektralanalyse (Welch-Methode) mit 50% überlappenden 4 s-Hanning-Fenstern zur Reduktion von Randartefakten berechnet. Daraus resultiert eine Frequenzauflösung von 0.25 Hz. Wiederum wurde dies zunächst für Schlafstadien getrennt, dann für Tasterdruck und Erinnerungsfähigkeit über alle Schlafstadien und nur im Stadium N1 angewendet. Analog zu den Zeitpunkten im AEP wurde die spektrale Zusammensetzung hier für jedes Frequenzbin mittels ungepaarten *t*-Tests verglichen.

Um die spektrale Zusammensetzung in hoher zeitlicher Auflösung zu betrachten, wurden für den Zeitraum von 2 s vor und nach Tonbeginn je eine Spektralanalyse (Welch-Methode) mit gleitenden 2 s Fenstern mit 40 ms Schrittgrösse durchgeführt und als farbcodiertes Spektrum für den Zeitraum von 1 s vor und nach Tonbeginn dargestellt, und zwar immer als Differenz zwischen zwei Bedingungen (Tasterbetätigung ja/nein oder Erinnerung sicher/vage, sicher/keine, vage/keine). Diese Analyse wurde wiederum zunächst für alle Schlafstadien gemeinsam und im Anschluss nur für Stadium N1 durchgeführt.

Sofern nicht anders angegeben, sind Resultate als Mittelwert $\pm$ Standardabweichung angegeben und Schattierungen entsprechen dem Standardfehler. Als signifikant unterschiedlich wurden Differenzen mit *p*-Werten <0.05 angesehen. Auf eine Korrektur für multiples Testen wurde verzichtet, da aufgrund der Abhängigkeit der Einzeltests komplexe Cluster-Korrekturen nötig wären. Stattdessen wurde dies in der Interpretation der Ergebnisse entsprechend berücksichtigt.

3. Resultate

3.1. Probandencharakteristika und exemplarische Messung

An dieser Studie nahmen 18 Probanden im Alter von 15 bis 28 Jahren teil, 11 Frauen und 7 Männer. Die Probandencharakteristika sind in Tab. 1 zusammengefasst, einerseits aufgeteilt auf die drei Hörbücher und andererseits gemittelt über alle Teilnehmenden. Die durchschnittliche Schlafdauer betrug 7 h 41 min und mit Ausnahme einer Person arbeiteten alle an 5 Tagen pro Woche. Es bestehen keine relevanten Gruppenunterschiede in Bezug auf die verschiedenen Hörbücher.

	Das kalte Auge	Der dreiäugige Totenkopf	Fluch des Piraten	Gesamt
Probanden	01, 04, 07, 09, 14, 16	02, 06, 08, 10, 13, 18	03, 05, 11, 12, 15, 17	01 - 18
Alter [y]	18.3 $\pm$ 3.3	17.7 $\pm$ 5.1	16.3 $\pm$ 1.2	17.4$\pm$3.5
Geschlecht [m/w]	2/4	3/3	2/4	7/11
PSQI	6.5 $\pm$ 2.4	4.5 $\pm$ 1.2	5.7 $\pm$ 2.3	5.6$\pm$2.1
ESS	5.0 $\pm$ 3.1	7.7 $\pm$ 3.2	8.3 $\pm$ 2.4	7.0$\pm$3.1
MSFsc [Uhr]	02:49 $\pm$ 2.2h	03:55 $\pm$ 1.5h	03:27 $\pm$ 0.7h	03:24$\pm$1.6h

Tab. 1: Probandencharakteristika in Gruppen aufgeteilt nach dem Hörbuch sowie über die gesamte Studienpopulation. Resultate sind als Mittelwert $\pm$ Standardabweichung respektive als Probandennummer und beim Geschlecht als Anzahl Männer und Frauen angegeben.

In Abb. 1 sind die Daten eines Probanden beispielhaft dargestellt. Im Überblick über die gesamte Messdauer (Abb. 1a) ist die kurze Einschlaf latenz von unter 10 min und die gut korrespondierende Abnahme der

Erinnerungsfähigkeit sowie der korrekten Tasterbetätigung sichtbar. Nach etwas mehr als einer Stunde ist der Proband spontan zunächst in Leichtschlaf gewechselt und auch mehrfach aufgewacht, worauf die Reaktion auf den akustischen Stimulus prompt zurückgekehrt ist, die Erinnerung an die Textstellen aber nur teilweise. Dies ist besonders gut in den vergrössert dargestellten Ausschnitten in Abb. 1b und c erkennbar. Während der Taster insbesondere im Stadium N1 und zu Beginn von N2 noch korrekt betätigt wurde, nahm die Erinnerungsfähigkeit früher ab (1b) und kehrte später oder gar nicht mehr vollständig zurück (1c). Dieses Muster, dass bei Abwechseln von Stadien W und N1 die Erinnerung vorwiegend ausbleibt, der Taster jedoch korrekt betätigt wird, konnte bei vielen Probanden beobachtet werden.

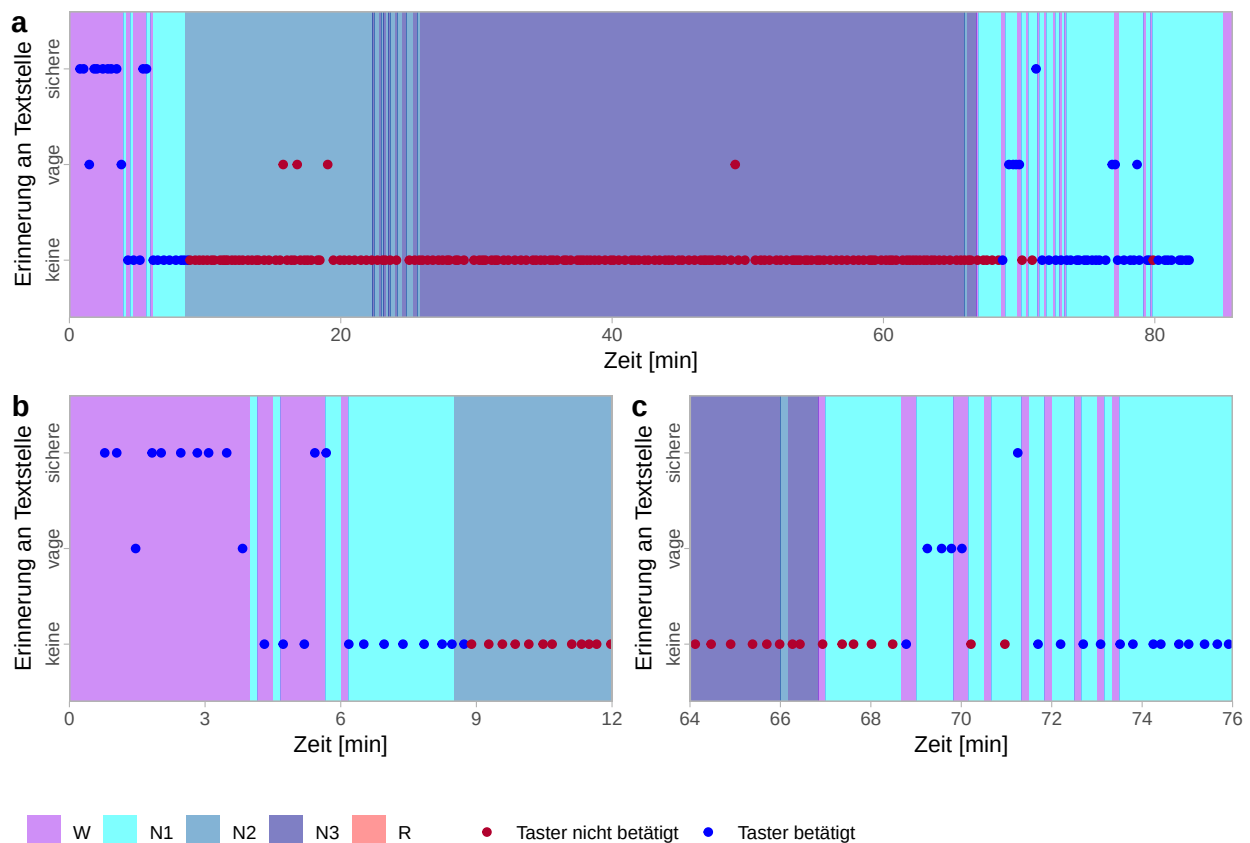


Abb. 1: Exemplarische Darstellung einer typischen Messung. In (a) ist ein vollständiges Hypnogramm mit Scoring basierend auf 30 s-Epochen dargestellt (Farbcodierung gemäss Legende), die Erinnerungsfähigkeit ist auf der y-Achse aufgeschlüsselt und die Reaktion auf den akustischen Stimulus mittels Punktfarbe (rot und blau) codiert. Der Einschlafprozess mit Scoring basierend auf 10 s-Epochen ist in (b) gezeigt und der spontane Aufwachprozess in (c).

3.2. Schlafstadienverteilung

Erwartungsgemäss variieren die in Abb. 2 dargestellten Anteile der Schlafstadien von Person zu Person deutlich. Gewisse Probanden sind sehr schnell eingeschlafen und nicht wieder aufgewacht, haben also einen geringen Wachanteil, andere waren zu Beginn länger wach oder sind mehrfach aufgewacht, was in einem höheren Wachanteil resultiert. Sämtliche Teilnehmenden erreichten Stadien N1 und N2, bis auf zwei auch alle N3, sodass niemand von der Analyse ausgeschlossen werden musste. Aufgrund eines technischen Problems brach die Messung bei Proband 01 nach etwa 20 min ab, was den geringen Schlafanteil erklärt. Aufgrund der schnellen Einschlaf latenz konnte aber auch dieser Teilnehmer in die Analysen einbezogen werden. Zwei Probanden erreichten trotz des kurzen Schlafens bereits das Stadium R, jedoch nur für wenige Epochen. Daher wurden alle folgenden Analysen ausschliesslich im Wachzustand und NREM-Schlaf (N1-N3) durchgeführt.

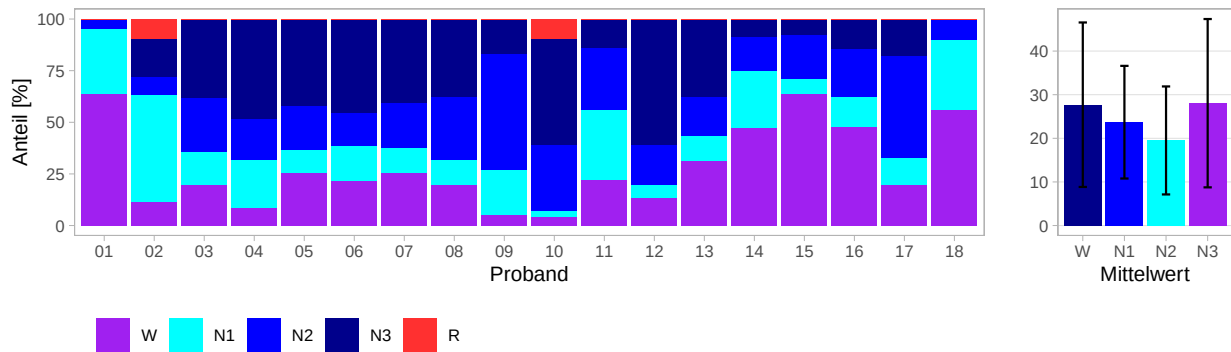


Abb. 2: Schlafstadienverteilung der einzelnen Probanden und gemittelt über alle Teilnehmenden. Es sind die prozentualen Anteile der Stadien W, N1, N2, N3 und R von Lichterlöschen bis Versuchsende dargestellt. Da nur zwei Probanden das Stadium R erreichten, wurde dieses weder bei der Mittelwertbildung noch in den folgenden Analysen berücksichtigt.

3.3. Erinnerungsfähigkeit und Tasterbetätigung

Insgesamt konnten $n=3995$ Signaltöne mit Angaben zur Erinnerung an die entsprechende Textstelle analysiert werden. Bei 1731 Tönen wurde der Taster korrekt betätigt, bei 2264 gab es keine Reaktion. Über alle Probanden gab es 677 Textstellen mit sicherer, 451 mit vager und 2867 ohne Erinnerung. Die Stellen verteilten sich auf die Schlafstadien W (992), N1 (800), N2 (1113), N3 (1039) und R (51, nicht weiter analysiert). Dies ist in Abb. 3a graphisch verdeutlicht und Tasterbetätigung und Erinnerungsfähigkeit sind zusätzlich nach Schlafstadien aufgeschlüsselt.

Im Mittel konnten die Probanden sich nach 333.6 ± 365.7 s erstmalig nicht mehr an zwei aufeinanderfolgende Textstellen erinnern, während sie im Mittel erst nach 901.8 ± 460.0 s das erste Mal den Taster zweifach nicht mehr betätigten. Mit Ausnahme eines Probanden weisen alle Daten in dieselbe Richtung. Sowohl der t -Test ($t = -5.49, p < 0.001$) als auch der Wilcoxon-Rangsummen-Test ($p < 0.001$) weisen auf eine statistisch signifikant unterschiedliche Latenz hin.

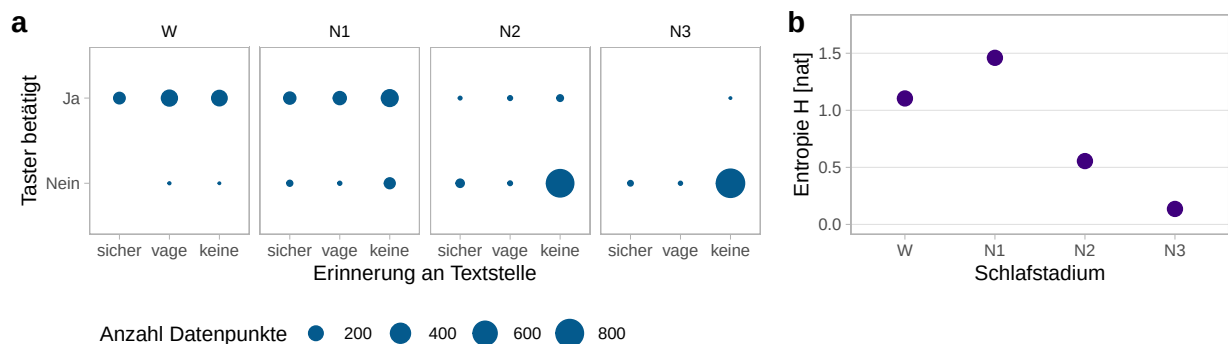


Abb. 3: Überblick über den gesamten Datensatz nach Schlafstadien aufgeschlüsselt (a) und Entropiewerte der Daten während der verschiedenen Schlafstadien (b). Eine Übereinstimmung von (a) und (b) ist gut sichtbar mit der höchsten Variabilität und Entropie in Stadium N1.

Die in Abb. 3b dargestellte Informationsentropie über die verschiedenen Schlafstadien widerspiegelt Abb. 3a gut, indem die Variabilität der Daten und die Informationsentropie im Stadium N1 am höchsten sind, es also bei allen möglichen Kombinationen von Tasterbetätigung und Erinnerungsfähigkeit Datenpunkte gibt. Im Stadium W wurde der Taster fast ausschliesslich korrekt betätigt, im Stadium N2 nur sehr selten und im Stadium N3 schliesslich praktisch nicht mehr. Bei der Erinnerungsfähigkeit zeigt sich mehr Variabilität in den Stadien W und N1, bei den Stadien N2 und N3 konnten sich Teilnehmende kaum mehr erinnern.

In Abb. 4 sind die prozentualen Anteile der korrekten Tasterbetätigung sowie der vagen oder sicheren Erinnerungen an Textstellen dargestellt. Über alle Schlafstadien gemittelt besteht Evidenz für einen höheren Anteil korrekter Tasterbetätigung ($45.0 \pm 25.9\%$) im Vergleich zur Erinnerungsfähigkeit ($29.3 \pm 26.6\%$,

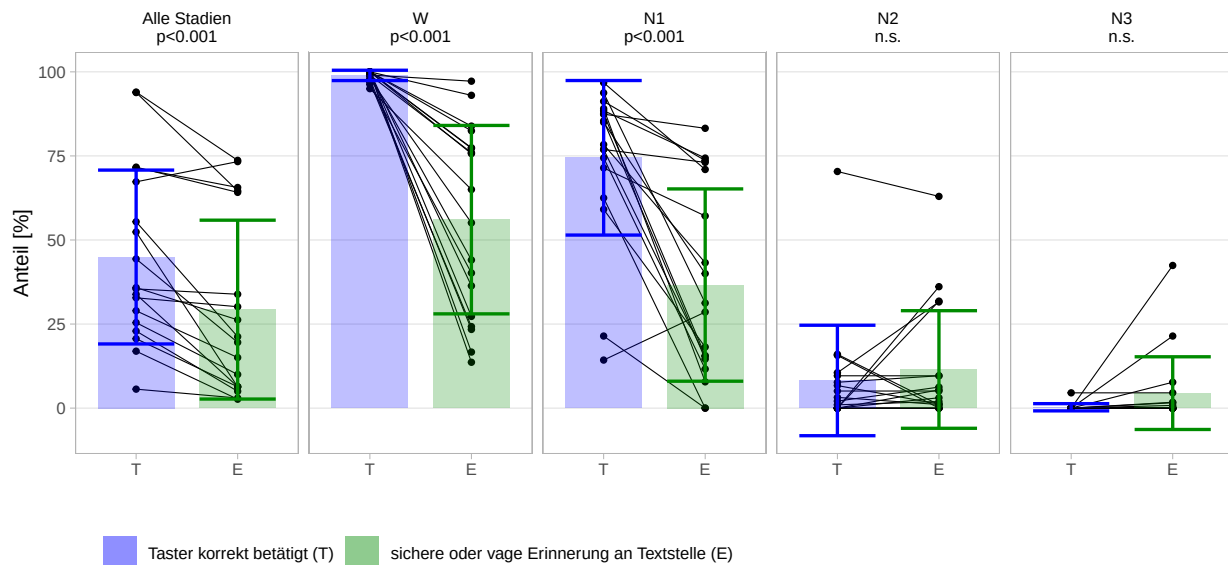


Abb. 4: Prozentuale Anteile der korrekten Tasterbetätigung (T, blau) und einer sicheren oder vagen Erinnerung (E, grün) an die Textstellen während der verschiedenen Schlafstadien. Individuelle Daten sind als schwarze Punkte mit Verbindungslinie dargestellt, die farbigen Säulen zeigen den Mittelwert, Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

$t = 5.07$, $p < 0.001$, $p_{\text{Wilcoxon}} < 0.001$). In der Wachphase wurde der Taster mit $98.9 \pm 1.5\%$ von allen Probanden fast ausschliesslich korrekt betätigt, während sich bei der Erinnerungsfähigkeit eine grosse interindividuelle Variabilität zeigt und auch der mittlere prozentuale Anteil mit $56.0 \pm 28.0\%$ im Vergleich zur Tasterbetätigung signifikant verringert ist ($t = 6.56$, $p < 0.001$, $p_{\text{Wilcoxon}} < 0.001$). Im Schlafstadium N1 zeigt sich bei der Tasterbetätigung eine höhere Variabilität als in der Wachphase, jedoch weiterhin geringer als bei der Erinnerungsfähigkeit. Ebenfalls ist der Mittelwert der prozentualen Tasterbetätigung in der Phase N1 höher als der Mittelwert der Erinnerungsfähigkeit in der Wachphase ($74.4 \pm 23.0\%$ vs. $36.6 \pm 28.6\%$, $t = 5.7$, $p < 0.001$, $p_{\text{Wilcoxon}} < 0.001$). Im Schlafstadium N2 zeigt sich eine deutliche Abnahme sowohl der interindividuellen Variabilität als auch des Mittelwerts der prozentualen Tasterbetätigung. Es besteht keine Evidenz für einen Unterschied in den Mittelwerten des Anteils an korrekter Tasterbetätigung und Erinnerungsfähigkeit ($8.2 \pm 16.4\%$). Im Schlafstadium N3 wurde der Taster kaum mehr betätigt ($0.3 \pm 1.1\%$), jedoch wurde vereinzelt noch angegeben, sich an eine Textstelle erinnern zu können ($4.46 \pm 10.80\%$), wiederum ohne signifikanten Unterschied zwischen Anteil an korrekter Tasterbetätigung und Erinnerungsfähigkeit ($t = -1.6$, $p > 0.05$, $p_{\text{Wilcoxon}} > 0.05$).

3.4. Quantitative EEG-Analyse

Von den $n=3995$ Signaltönen mit Angaben zur Erinnerungsfähigkeit war das EEG-Signal in 86.1 % der Fälle (3441) artefaktfrei und konnte für die quantitative EEG-Analyse verwendet werden. Die Stellen verteilten sich auf die Schlafstadien W (675), N1 (727), N2 (1001) und N3 (958). Bei 1346 Tönen wurde der Taster korrekt betätigt, bei 2065 gab es keine Reaktion, innerhalb des Stadiums N1 waren es 590 korrekte und 137 fehlende Tasterbetätigungen. Über alle Probanden gab es 470 Textstellen mit sicherer, 376 mit vager und 2565 ohne Erinnerung, im Stadium N1 konnten sich Teilnehmende an 166 Stellen sicher, an 157 vage und an 404 Stellen nicht erinnern.

Das AEP und die spektrale Zusammensetzung des EEGs während der 10 s vor Tonbeginn sind in Abb. 5 nach Schlafstadien getrennt dargestellt. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Stadien, sodass bei der nachfolgenden Auswertung der Tasterbetätigung und Erinnerungsfähigkeit immer jeweils über alle Schlafstadien gemittelt und spezifisch im Stadium N1 analysiert wurde, da dort für alle Bedingungen Datenpunkte vorlagen (vgl. Abb. 3a). Bei der Darstellung des AEPs gilt es, die in der EEG-Analyse übliche Invertierung der y-Achse zu beachten, positive Komponenten zeigen somit nach unten und negative nach oben (vgl. Abb. 5a). Die früheste Komponente P50 des AEP (50 - 100 ms nach Tonbeginn) ist nicht

erkennbar. Im Wachzustand ist die nachfolgende Komponente N100 (100 - 150 ms nach Tonbeginn) erkennbar, jedoch im Vergleich zu den Stadien N1 - N3 verbreitert und mit weniger klarem Maximum. Hingegen sind P200 (150 - 200 ms nach Tonbeginn) und N200 (200 - 250 ms nach Tonbeginn) deutlich sichtbar. Ähnlich ist der Kurvenverlauf im Stadium N1, wobei dort die Komponente N100 deutlich schmaler und besser abgegrenzt ist, dafür die Komponente N200 nicht mehr so deutlich und nach leicht längerer Latenz als im Wachzustand. In den Stadien N2 und N3 schliesslich sind nur die Komponenten N100 und P200 erkennbar. Die von Auge auffallenden Unterschiede decken sich mit den statistischen Auswertungen im unteren Diagrammteil in Abb. 5a. Auch die Leistungsdichte der verschiedenen NREM-Schlafstadien in Abb. 5b unterscheidet sich über praktisch sämtliche Frequenzbins gegenüber dem Wachstadium, sowohl visuell als auch in der statistischen Auswertung. Besonders auffällig ist der Unterschied in den tiefen Frequenzen unter 4 Hz, im Bereich der sogenannten *slow-wave activity* (SWA, 0.5 - 4 Hz), die vor allem durch die Tiefschlafwellen (*slow waves*) dominiert wird. Aber auch die für den Wachzustand typischen α -Wellen zwischen 8 und 12 Hz sind gut erkennbar sowie die Schlafspindeln (12 - 15 Hz) in den Stadien N2 und N3. Bereits beim Schlafstadien-Scoring konnten bei einigen Teilnehmenden typische θ -Wellen im Leichtschlaf (N1) erkannt werden, dies ist auch in der Spektralanalyse als Peak zwischen 4 und 8 Hz sichtbar.

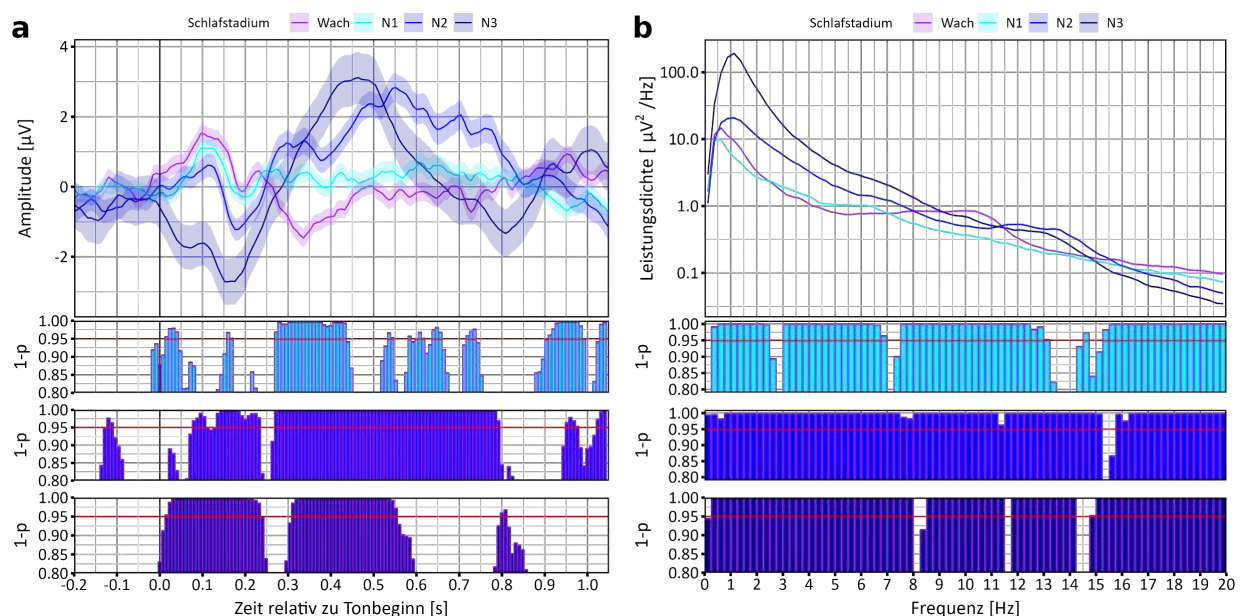


Abb. 5: Akustisch evoziertes Potenzial (AEP) und spektrale Zusammensetzung des EEGs 10 s vor Tonbeginn während des Wachzustandes und im NREM-Schlaf. Im oberen Diagrammteil in (a) ist das AEP und in (b) die spektrale Zusammensetzung als Leistungsdichte über die verschiedenen Frequenzen separat für den Wachzustand (lila) und die Schlafstadien N1 (hellblau), N2 (blau) und N3 (dunkelblau) dargestellt. Die Linie markiert dabei den Mittelwert und die Schattierung den Standardfehler. Der untere Teil zeigt die statistischen Auswertungen des jeweiligen Schlafstadiums (Füllfarbe) gegenüber dem Wachzustand (Rahmenfarbe). Dargestellt ist jeweils der von 1 subtrahierte p -Wert (ungepaarter t -Test), sodass ein Wert oberhalb der roten Horizontale bei 0.95 ein signifikanter Unterschied zwischen den Kurvenverläufen repräsentiert. Zu beachten ist die logarithmische Skalierung der Leistungsdichte in (b). Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Schlafstadien, sowohl im AEP als auch in der spektralen Zusammensetzung, weshalb in den folgenden Analysen nebst allen Schlafstadien gemeinsam auch jeweils das Stadium N1 separat ausgewertet wurde.

Wird das AEP getrennt nach Tasterbetätigung betrachtet, zeigen sich sowohl über alle Schlafstadien als auch über das Stadium N1 deutliche Unterschiede im Kurvenverlauf (vgl. Abb. 6a und c). Das AEP bei korrekter Tasterbetätigung zeigt bis auf die früheste Komponente P50 alle weiteren Komponenten N100, P200 und N200 nach erwarteter Latenz, und zwar sowohl über alle Schlafstadien gemittelt als auch nur im Stadium N1. Bei fehlender Tasterbetätigung ist in Abb. 6a und c auch die früheste Komponente P50 erkennbar, die folgenden Komponenten N100 und P200 erscheinen jedoch vor allem im Stadium N1 mit einer zeitlichen Verzögerung gegenüber den AEPs bei korrekter Tasterbetätigung, sodass sie nach Literatur nur noch knapp innerhalb oder bereits ausserhalb der zu erwartenden Zeitfenster liegen. Die Komponente N200 schliess-

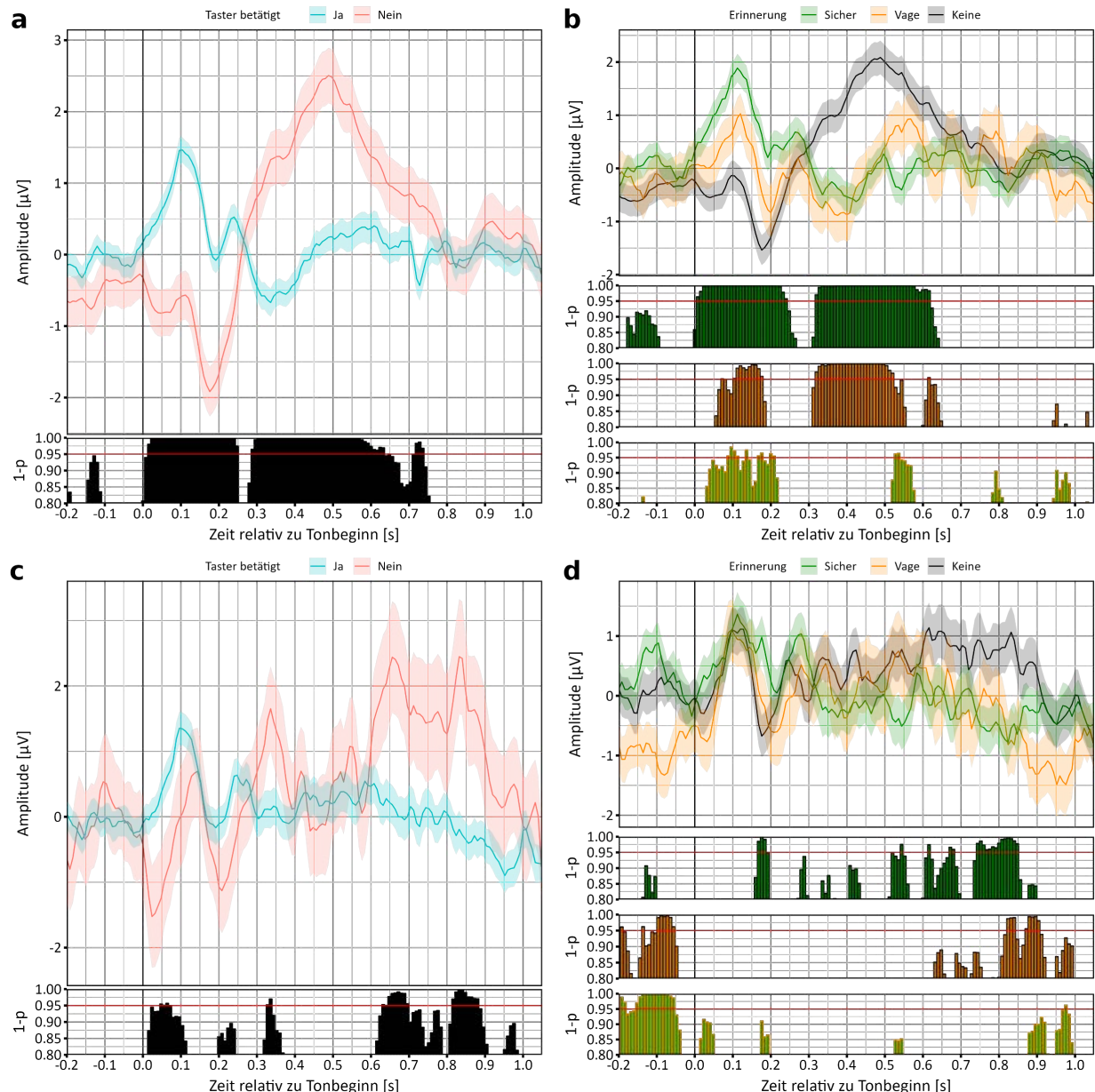


Abb. 6: Kurvenverlauf des AEPs getrennt nach Tasterbetätigung und Erinnerungsfähigkeit. Im oberen Diagrammteil von (a) ist das AEP nach korrekter (türkis) und fehlender (rot) Tasterbetätigung in allen Schlafstadien dargestellt, (c) zeigt dieselben Daten ausschliesslich im Stadium N1. Im unteren Diagrammteil ist die statistische Analyse gezeigt, wiederum als der von 1 subtrahierte p -Wert (ungepaarte t -Tests) und mit roter Horizontale bei 0.95 als Trennlinie für signifikante Unterschiede zwischen den Kurven. In (b) und (d) sind die AEPs nach sicherer (grün), vager (orange) und keiner (schwarz) Erinnerung an die Textstelle dargestellt, wiederum für alle Schlafstadien und nur im Stadium N1 und als Mittelwert mit schattiertem Standardfehler. Die statistischen Analysen im unteren Diagrammteil sind farbcodiert dargestellt, sodass bei grüner Balkenfüllung mit schwarzem Rahmen die sichere und fehlende Erinnerung verglichen werden, bei oranger Füllung mit schwarzem Rahmen die vage und fehlende und bei grüner Füllung mit orangem Rahmen die sichere und vage. Kurvenverläufe nach Tasterbetätigung getrennt weisen deutlichere Unterschiede auf als jene nach Erinnerungsfähigkeit. Wie schon bei den Schlafstadien sind die deutlichsten Unterschiede in der Komponente N2 zu finden.

lich ist in Abb. 6a gar nicht zu sehen und in b deutlich zeitversetzt. Dies zeigt sich auch in der statistischen Analyse im unteren Diagrammteil. Die Amplitude der AEPs hingegen ist bei fehlender Tasterbetätigung nicht verringert. Ein ähnliches, wenn auch nicht ganz so deutliches Bild zeigt sich bei der Erinnerungsfähigkeit dargestellt in Abb. 6b für alle Schlafstadien und Abb. 6d für das Stadium N1. Die Kurvenformen für sichere und vage Erinnerung sind dabei sehr ähnlich, bei fehlender Erinnerung ist wiederum keine Kompo-

nente N200 erkennbar. Die zeitliche Verzögerung ist in diesem Fall nicht erkennbar, eine Amplitudenverminderung bei fehlender Erinnerung ist ebenfalls nicht sichtbar.

Die spektrale Zusammensetzung des EEGs während der 10 s vor Tonbeginn aufgeteilt nach Tasterbetätigung und Erinnerungsfähigkeit zeigt Abb. 7 mit Aufbau analog zu Abb. 6. Gemittelt über alle Schlafstadien zeigen sich Unterschiede zwischen korrekter und fehlender Tasterbetätigung im praktisch gesamten Frequenzspektrum. Bei korrekter Tasterbetätigung ist die Leistungsdichte im tieferen Frequenzbereich bis etwa 8 Hz deutlich reduziert und es zeigt sich ein Peak im α -Frequenzbereich. Bei fehlender Tasterbetätigung fällt eine erhöhte Leistungsdichte im tieferen Frequenzbereich mit Peak im Spindel-Frequenzbereich auf (vgl. Abb. 7a).

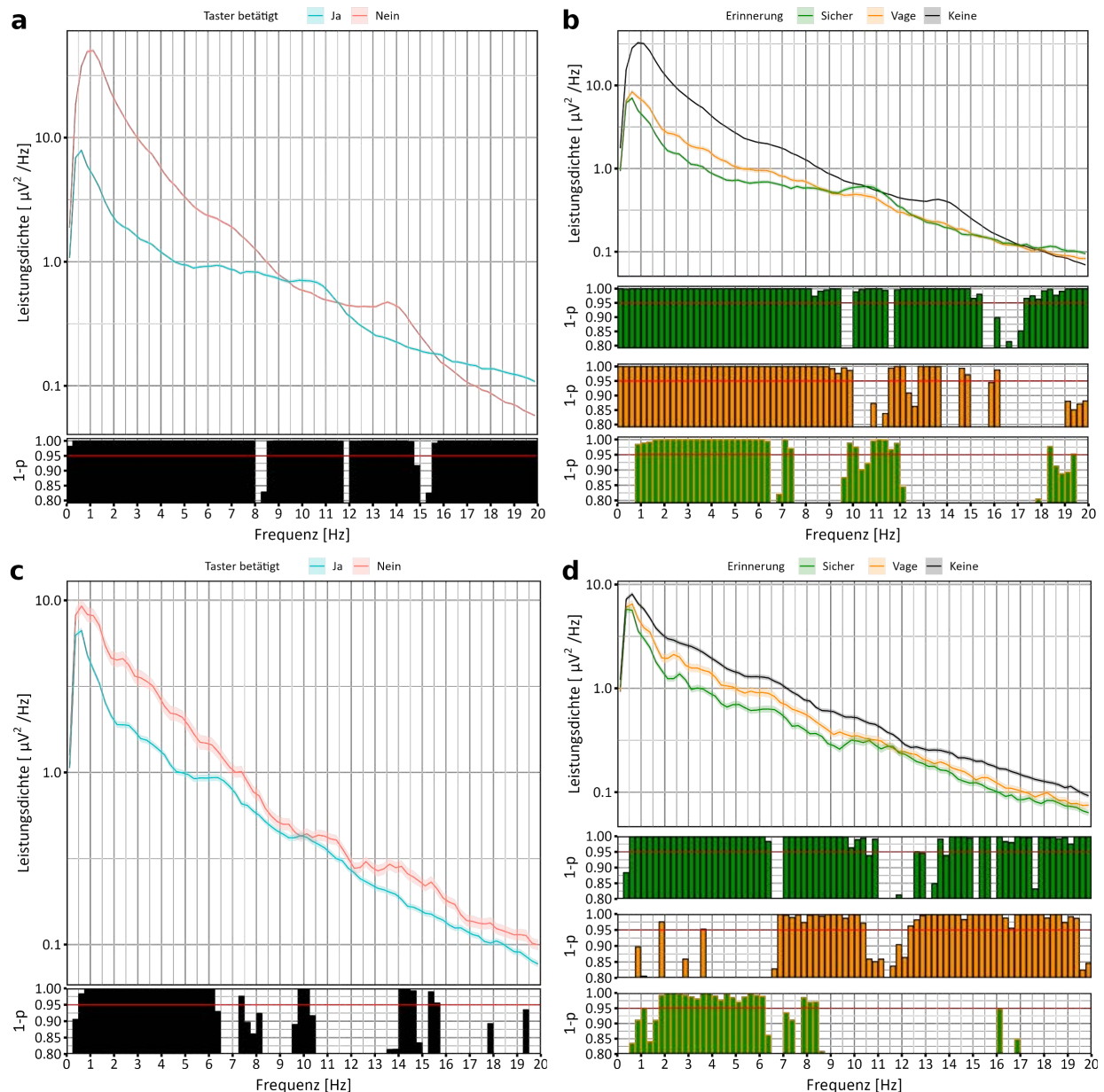


Abb. 7: Spektrale Zusammensetzung des EEGs 10 s vor Tonbeginn getrennt nach Tasterbetätigung und Erinnerungsfähigkeit. Die Leistungsdichte getrennt nach Tasterbetätigung ist in (a) über alle Schlafstadien und in (c) nur im Stadium N1 dargestellt, in (b) getrennt nach Erinnerungsfähigkeit über alle Schlafstadien und in (d) nur im Stadium N1. Für Aufbau, Farbgebung und Beschriftung der Diagramme vgl. Abb. 6. Zu beachten ist die logarithmische Skalierung der Leistungsdichte. Über weite Frequenzbereiche zeigen sich deutliche Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung, sowohl in Bezug auf Tasterbetätigung als auch Erinnerungsfähigkeit.

Wird nur das Stadium N1 in Abb. 7c betrachtet, ist eine reduzierte Leistungsdichte bis etwa 6 Hz bei korrekter Tasterbetätigung auffällig. Die Resultate der Erinnerungsfähigkeit (vgl. Abb. 7b und d) zeigen ebenfalls eine deutlich reduzierte Leistungsdichte im tiefen Frequenzbereich bei sicherer und vager im Vergleich zu fehlender Erinnerung. Auffallend hier ist zudem ein Peak im α -Frequenzbereich nur bei sicherer Erinnerung an die Textstelle unter Einbezug aller Schlafstadien (vgl. Abb. 7b). Im Stadium N1 ist der Unterschied zwischen vager und fehlender Erinnerung in den tiefen Frequenzen und im α -Frequenzbereich nicht mehr vorhanden, dafür in den höheren Frequenzen ausgeprägter (vgl. Abb. 7d).

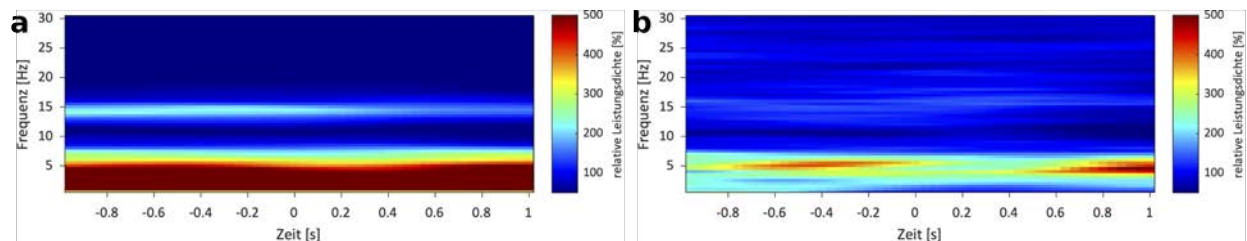


Abb. 8: Zeitlich hochaufgelöste Spektralanalyse während einer Sekunde vor und nach Tonbeginn getrennt nach Tasterbetätigung. In (a) ist für alle Schlafstadien die relative Leistungsdichte über die verschiedenen Frequenzbereiche bei der fehlenden im Vergleich zur korrekten Tasterbetätigung farbcodiert dargestellt, (b) zeigt dasselbe ausschliesslich im Stadium N1. Auffallend ist bei fehlender im Vergleich zu korrekter Tasterbetätigung die stark erhöhte Leistungsdichte im tiefen Frequenzbereich, die Reduktion im α -Frequenzbereich (8-12 Hz) und die Erhöhung um 12-15 Hz (Spindelaktivität) unter Einbezug aller Schlafstadien.

Eine zeitlich hochaufgelöste Spektralanalyse in der Sekunde vor und nach Tonbeginn ist in Abb. 8 als Verhältnis zwischen fehlender und korrekter Tasterbetätigung dargestellt, sowohl über alle Schlafstadien (Abb. 8a) als auch nur im Stadium N1 (Abb. 8b). In Abb. 8a fällt als erstes die erhöhte SWA und Leistungsdichte im Spindel-Frequenzbereich bei fehlender im Vergleich zu korrekter Tasterbetätigung auf, zudem eine reduzierte Leistungsdichte im α -Frequenzbereich sowie den höheren Frequenzen ab etwa 20 Hz. Im Stadium N1 in Abb. 8b ist die Reduktion im α -Frequenzbereich ebenfalls deutlich sichtbar, der Unterschied im sehr tiefen Frequenzbereich ist ebenfalls vorhanden, aber weniger stark ausgeprägt. Zudem zeigt sich ein Muster im θ -Frequenzbereich (4-8 Hz), wobei eine erhöhte Leistungsdichte etwa 0.5 s vor und 1 s nach Tonbeginn bei fehlender im Vergleich zu korrekter Tasterbetätigung sichtbar ist.

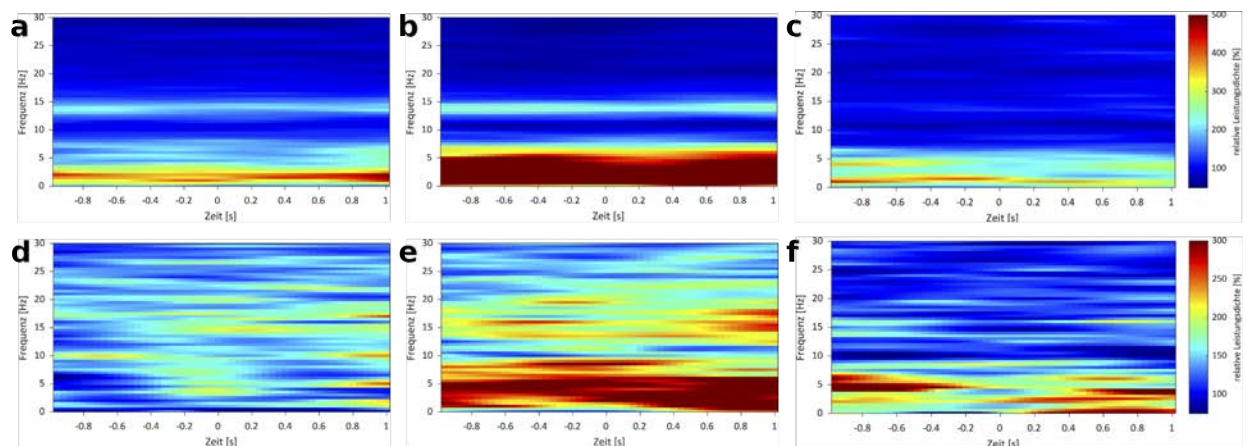


Abb. 9: Zeitlich hochaufgelöste Spektralanalyse während einer Sekunde vor und nach Tonbeginn getrennt nach Erinnerungsfähigkeit. In (a)-(c) sind die Resultate für alle Schlafstadien dargestellt, (d)-(f) zeigen ausschliesslich das Stadium N1. In (a) und (d) wird die relative Leistungsdichte von fehlender Erinnerung der vagen Erinnerung gegenübergestellt, in (b) und (e) fehlende vs. sichere Erinnerung gezeigt und in (c) und (f) vage vs. sichere Erinnerung. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Tasterbetätigung in Abb. 8.

In Abb. 9 sind dieselben Resultate für die Erinnerungsfähigkeit dargestellt, wobei jeweils das Verhältnis von keiner mit vager (a und d), keiner mit sicherer (b und e) sowie vager mit sicherer (c und f) Erinnerung

gegenübergestellt sind, und zwar wiederum für alle Schlafstadien (a-c) und nur für Stadium N1 (d-f). Im Vergleich zwischen keiner und sicherer Erinnerung (Abb. 9b und e) zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei der Tasterbetätigung, dieselben Elemente lassen sich in geringerem Ausmass auch zwischen keiner und vager Erinnerung (Abb. 9a und d) erkennen. Auch beim Verleich zwischen vager und sicherer Erinnerung ist eine Reduktion der Leistungsdichte im α -Frequenzbereich und eine Erhöhung der tieferen SWA sowie θ -Aktivität insbesondere vor Tonbeginn sichtbar. Bei vager im Vergleich zu sicherer Erinnerung im Stadium N1 (Abb. 9f) scheint insbesondere die θ -Aktivität in etwas grösserem Abstand zu Tonbeginn anzusteigen, und die sehr tiefe SWA (*low SWA*) nach Tonbeginn erhöht und die α -Aktivität wiederum verringert zu sein.

4. Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde die Reaktion auf akustische Stimuli von der Erinnerungsfähigkeit während des Schlaf-Wach-Übergangs entkoppelt. Es zeigt sich ein deutlich späterer Rückgang der Fähigkeit, auf einen Signalton mittels Tasterbetätigung zu reagieren als sich an eine gehörte Textstelle zu erinnern. Dies widerspiegelt sich auch im höheren Anteil korrekter Tasterbetätigungen im Vergleich zu kombinierter sicherer und vager Erinnerung. Diese Resultate sind im Einklang mit den Ergebnissen von Klinkowski et al. [11]. In der weiterführenden quantitativen EEG-Analyse wurden sowohl in der AEP-Kurvenform als auch in der spektralen Zusammensetzung vor Tonbeginn deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Schlafstadien gefunden, sodass alle Analysen zusätzlich nur für das Stadium N1 wiederholt wurden. Typische Muster bei fehlender Tasterbetätigung und reduzierter oder fehlender Erinnerung sind das verzögerte Auftreten beziehungsweise Fehlen späterer Komponenten im AEP, eine erhöhte SWA sowie Leistungsdichte im θ - und Spindel-Frequenzbereich und eine Reduktion im α -Frequenzbereich.

Die generell höhere Variabilität in der Erinnerungsfähigkeit im Vergleich zur Tasterbetätigung kann einerseits an der aufgrund der zusätzlichen Kategorie tieferen Anzahl Datenpunkte pro Kategorie liegen. Zudem wurde die Erinnerung erst am Ende abgefragt, Teilnehmende mussten somit über bereits länger zurückliegende Passagen entscheiden. Auch handelt es sich um eine subjektive Angabe, insbesondere auch die Abgrenzung zwischen vager und sicherer Erinnerung kann individuell verschieden ausfallen.

Das verzögerte Auftreten oder Fehlen im Speziellen der späten N200-Komponente im AEP wurde bereits mit Defiziten in Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis und Exekutivfunktionen in Verbindung gebracht [22]. Während des Einschlafens kommt es natürlicherweise zu einer Reduktion der Aufmerksamkeit und kognitiver Verarbeitung, was sich somit auch in den vorliegenden AEP-Daten objektivieren lässt.

Die deutlichen Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung sind wohl zu einem grossen Teil auf die Unterschiede in der Schlafstadienverteilung zurückzuführen. Durch Analyse der Daten ausschliesslich im Stadium N1 konnte dieses Problem umgangen werden, jedoch sind damit deutlich weniger Datenpunkte vorhanden und Unterschiede somit schwieriger festzustellen. Dass dennoch die wichtigsten Aspekte mit Reduktion der tiefen Frequenzen sowie im Spindel-Frequenzbereich und Erhöhung der α -Aktivität bei korrekter Tasterbetätigung respektive sicherer und vager Erinnerung erhalten bleiben, spricht für deren Relevanz. Eine erhöhte Aktivität im Frequenzbereich von 2 - 5 Hz konnte bereits während neurokognitiven Tests bei Schlafentzugsmessungen festgestellt werden [32]. Dabei sind Probanden in einem ähnlichen Übergangsstadium zwischen Wachsein und Schlaf, was wiederum gut zu den vorliegenden Daten passt. Gute Leistung in neurokognitiven Tests wurde in der Literatur hingegen mit einer erhöhten α - und reduzierten θ -Aktivität in Verbindung gebracht [33]. Auch diesbezüglich weisen die erhobenen Daten in dieselbe Richtung. Im Wach-Schlaf-Übergang zeigt sich insbesondere eine Reduktion der höheren α -Aktivität [33]. Dies kann auch in der vorliegenden Studie bestätigt werden, wobei der grösste Unterschied im α -Frequenzbereich ab 10 Hz sichtbar ist (vgl. Abb. 8 und 9).

5. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Replikation der Ergebnisse von Klinkowski et al. [11] erfolgreich war und ein äusserst spannender Datensatz erhoben werden konnte. Die gewonnenen Resultate fügen sich gut in die bereits vorhandene Literatur ein. Durch die erfolgreiche Entkoppelung von Stimulusverarbeitung und Erinnerungsfähigkeit während des Schlaf-Wach-Übergangs konnten spannende Einblicke in den Prozess des Einschlafens gewonnen werden.

Als wichtigste Limitation ist sicherlich die geringe Stichprobengrösse zu nennen. Im vorliegenden Projekt konnte in der statistischen Auswertung deshalb nicht berücksichtigt werden, wie viele Datenpunkte von den einzelnen Probanden einbezogen wurden, sondern jeder Datenpunkt wurde als unabhängig betrachtet. Eine Möglichkeit, mehr Daten bei gleicher Stichprobengrösse zu erhalten, wäre ein serieller Weckversuch. Damit liessen sich mehrere Probleme entschärfen. Einerseits würde die Anzahl Datenpunkte durch mehrfaches Einschlafen erhöht, andererseits kann die Erinnerungsfähigkeit immer direkt nach dem Wecken abgefragt werden und nicht erst am Ende über die gesamte Messdauer. Interessant würden dann auch komplexere statistische Analysen mit Berücksichtigung wiederholter Messungen und clusterbasierter Korrektur für multiples Testen.

Aufgrund der Komplexität und des hohen zeitlichen Aufwands der Datenanalyse wurde das Datenset noch nicht umfassend analysiert und kann somit weiteren Projekten dienen. Interessant wäre beispielsweise die Anwendung einer *wavelet*-Transformation, um eine bessere zeitliche Auflösung in der Spektralanalyse zu erhalten. Bei zusätzlichen Messungen und nach Poolen der Daten könnte auch die Latenzzeit bei der Tasterbetätigung berücksichtigt werden. Spannend wäre ebenfalls, die Messungen mit einem hochauflösenden EEG-System mit mehr Elektroden am gesamten Kopf zu wiederholen, um allfällige topographische Unterschiede festzustellen.

6. Dank

Für die langjährige, produktive Zusammenarbeit in der Entwicklung der Verstärker für elektrophysiologische Signale möchten wir Christian Bircher, dem Physikassistenten der Kantonsschule Wattwil, unseren herzlichen Dank aussprechen. Er hat den Taster sowie Tondetektor entwickelt und hergestellt, was unser Projekt erst möglich machte. Ausserdem bedanken wir uns bei allen Teilnehmenden, die sich trotz eigener Projektarbeiten motiviert als Probanden zur Verfügung stellten und unsere Studie unterstützten.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Saper C. B. et al., «Sleep state switching», *Neuron* **68**, 6 (2010).
- [2] Jones B. E., «From waking to sleeping: neuronal and chemical substrates», *Trends in pharmacological sciences* **26**, 11 (2005).
- [3] Brown R. E. et al., «Control of sleep and wakefulness», *Physiological reviews* **92**, 3 (2012).
- [4] Fuller P. M. et al., «Neurobiology of the sleep-wake cycle: sleep architecture, circadian regulation, and regulatory feedback», *Journal of biological rhythms* **21**, 6 (2006).
- [5] Steriade M. und McCarley R. W., «Brain Control of Wakefulness and Sleep», Springer New York, NY, 2 Auflage, <https://doi.org/10.1007/b102230> (2010).
- [6] Saper C. B. et al., «Hypothalamic regulation of sleep and circadian rhythms», *Nature* **437**, 7063 (2005).
- [7] Siegel J. M., «Clues to the functions of mammalian sleep», *Nature* **437**, 7063 (2005).
- [8] Stickgold R., «Sleep-dependent memory consolidation», *Nature* **437**, 7063 (2005).
- [9] Siegel J. M., «The neurobiology of sleep», *Seminars in neurology* **29**, 4 (2009).
- [10] Sakurai T., «The neural circuit of orexin (hypocretin): maintaining sleep and wakefulness», *Nature reviews, Neuroscience* **8**, 3 (2007).
- [11] Klinkowski S. et al., «Uncoupling of stimulus processing and memory encoding during the wake-sleep transition», *Journal of Sleep Research* **31** (2022).
- [12] Walker M. P., «The role of sleep in cognition and emotion», *Annals of the New York Academy of Sciences* **1156** (2009).

- [13] Rasch B. und Born J., «About sleep's role in memory», *Physiological reviews* **93**, 2 (2013).
- [14] Diekelmann S. et al., «The whats and whens of sleep-dependent memory consolidation», *Sleep medicine reviews* **13**, 5 (2009).
- [15] Steriade M. et al., «Thalamocortical oscillations in the sleeping and aroused brain», *Science (New York, N.Y.)* **262**, 5134 (1993).
- [16] Colrain I. M., «The K-complex: a 7-decade history», *Sleep* **28**, 2 (2005).
- [17] Bastien C. und Campbell K., «The Evoked K-Complex: All-or-None Phenomenon?», *Sleep* **15**, 3 (1992).
- [18] Picton T. W. et al., «Human auditory evoked potentials: I. Evaluation of components», *Electroencephalography and clinical neurophysiology* **36**, 2 (1974).
- [19] Woods D. L., «The component structure of the N1 wave of the human auditory evoked potential», *Electroencephalography and clinical neurophysiology, Supplement* **44** (1995).
- [20] Näätänen R. und Picton T., «The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure», *Psychophysiology* **24**, 4 (1987).
- [21] Picton T. W. et al., «Mismatch negativity: different water in the same river», *Audiology & neurotology* **5**, 3-4 (2000).
- [22] Tremblay K. L. und Kraus N., «Auditory training induces asymmetrical changes in cortical neural activity», *Journal of speech, language, and hearing research: JSLHR* **45**, 3 (2002).
- [23] Alain C. und Woods D. L., «Age-related changes in processing auditory stimuli during visual attention: evidence for deficits in inhibitory control and sensory memory», *Psychology and aging* **14**, 3 (1999).
- [24] Borbély A. A. et al., «Sleep deprivation: effect on sleep stages and EEG power density in man», *Electroencephalography and clinical neurophysiology* **51**, 5 (1981).
- [25] Berry R. B. et al., «The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications», *American Academy of Sleep Medicine*, Version 2.5 (2018).
- [26] Buysse D. J. et al., «The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research», *Psychiatry research* **28**, 2 (1989).
- [27] AlSaif H. I., «Prevalence of and risk factors for poor sleep quality among residents in training in KSA», *Journal of Taibah University Medical Sciences* **14**, 1 (2019).
- [28] Roenneberg T. et al., «Life between Clocks: Daily Temporal Patterns of Human Chronotypes», *Journal of Biological Rhythms* **18**, 1 (2003).
- [29] Johns M. W., «A New Method for Measuring Daytime Sleepiness: The Epworth Sleepiness Scale», *Sleep* **14**, 6 (1991).
- [30] Combrisson E. et al., «Visbrain: A Multi-Purpose GPU-Accelerated Open-Source Suite for Multimodal Brain Data Visualization», *Frontiers in Neuroinformatics* **13** (2019).
- [31] Leach S. et al., «'High-Density-SleepCleaner': An open-source, semi-automatic artifact removal routine tailored to high-density sleep EEG», *Journal of Neuroscience Methods* **391** (2023).
- [32] Makeig S. et al., «Awareness during drowsiness: dynamics and electrophysiological correlates», *Canadian journal of experimental psychology = Revue canadienne de psychologie expérimentale* **54**, 4 (2000).
- [33] Klimesch W., «EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis», *Brain research reviews* **29**, 2-3 (1999).

Streu- und Zerfallsmodellierung von Myonen

Nuria Gaudenz, Ramon Kuster, Jakob Mostert, Josia Peier,
Tamara Zahner

1. Vorwort

Finnland und Myonen haben auf den ersten Blick keine Gemeinsamkeit. Die kleinen Teilchen kommen jedoch überall auf der Welt vor, und Finnland eignet sich gut für Messungen. Denn um Myonen zu detektieren, muss dies im besten Fall fern von Störsignalen passieren. Zu solchen Störsignalen gehören insbesondere Frequenzen um 50 Hz, welche durch Netzstrom emittiert werden und ein Netzbrummen erzeugen. Da unser Lagerhaus weit weg von jeglicher Zivilisation stand, befanden sich keine Hochspannungsleitungen als potentielle Störquellen in der Nähe. Zusätzlich ist die finnische Seenplatte im Süd-Osten des Landes äusserst flach, was verhindert, dass flach (mit geringem Einfallswinkel zur Erdoberfläche) einfallende Myonen von Gebirgen absorbiert werden. Final konnte die grosse Distanz zwischen Wattwil und Finnland genutzt werden, um Abhängigkeiten des Myoneneinfalls vom geographischen Breitengrad zu messen. Damit erwies sich Finnland als optimaler Messstandort für Myonen.

2. Theorie

Myonen sind einfach negativ geladene Elementarteilchen, genau so wie Elektronen. Sie teilen viele Eigenschaften mit Elektronen, sind jedoch deutlich schwerer, um genau zu sein 207-mal schwerer [1]. Myonen sind ein Teil der sekundären kosmischen Strahlung, welche aus der Interaktion der primären kosmischen Strahlung hervorgeht. Diese besteht hauptsächlich aus Protonen, die beinahe mit Lichtgeschwindigkeit in Richtung Erde fliegen. Ungefähr in 15 km Höhe der Erdatmosphäre treffen diese Protonen auf Atome der Erdatmosphäre und zerfallen durch Spallation (Kernzertrümmerung) mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in neutrale oder geladene Pionen (π^0, π^+, π^-). Die neutralen Pionen (π^0) zerfallen sehr schnell in zwei Photonen und sind daher in diesem Projekt von geringem Interesse. Die geladenen Pionen (π^+, π^-) zerfallen jedoch in Myonen und Antimyonen (μ^-, μ^+). Die beiden Zerfallsprozesse

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

zeigen dies. Auch dies sind zufällige Prozesse, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten. Dies gilt für alle Zerfallsprozesse. Diese Myonen und Antimyonen (von hier an bezeichnet der Begriff «Myon» das Teilchen und Antiteilchen) sind von Hauptinteresse für das Projekt. Trifft ein solches auf ein Atom, z. B. ein Fe-Atom einer Stahlplatte, so zerfällt es gemäss den Reaktionen

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.\end{aligned}$$

Die beiden verwendeten Myonen-Teleskope machen sich unter anderem diese Zerfälle zu Nutze [2].

2.1. Funktionsweise Geiger-Müller-Zählrohr¹

Um zu verstehen, wie die verwendeten Myonen-Teleskope funktionieren, muss zuerst die Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs geklärt werden, welches ein wichtiges Bauteil des einen Myonen-Teleskops ist. Der allgemeine Aufbau ist in Abb. 1 ersichtlich. In der Mitte des Zählrohrs befindet sich ein Draht, der als Anode dient. Gleichzeitig wird die Hülle des Zählrohrs als Kathode genutzt und ist typischerweise mit Argon oder Krypton gefüllt. Trifft nun ionisierende Strahlung, also die Zerfallsprodukte der Myonen, auf ein

¹Der Inhalt dieses Kapitels wurde sinngemäss aus [3] übernommen.

Edelgas-Atom, so wird es ionisiert und wandert zur Kathode (1). Das herausgeschlagene Elektron wandert zur Anode und ionisiert dabei weitere Edelgas-Atome (2), welche auch wieder zur Kathode wandern (3). Dieses Prinzip ist unter dem Namen Stossionisation bekannt und wirkt als Verstärker. Zwischen Anode und Kathode besteht nun kurzzeitig eine Spannung, welche von einem Zähler als Event registriert wird. Nach einer gewissen Zeit kommt es zum Ladungsausgleich (4) und die Edelgas-Atome lösen sich wieder von der Kathode (5). Um α - und β -Strahlung zu messen, muss die Strahlung in das Zählrohr eintreten können, das Edelgas darf aber nicht austreten können. Möglich wird dies durch ein Glimmerfenster oder Pet-Folie zur Abdichtung an der Oberseite.

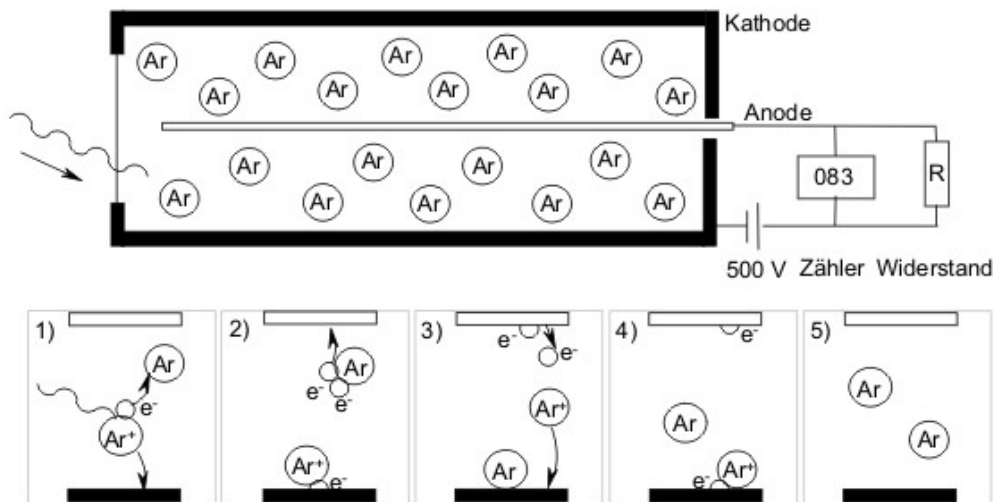


Abb. 1: Schema der Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs [3].

2.2. Funktionsweise Scattering-Teleskop

Das Scattering-Teleskop besteht aus drei Geiger-Müller-Zählrohren, die in einem gleichseitigen (regelmäßigen) Dreieck angeordnet sind und durch eine Koinzidenz-Schaltung mit einem Logger verbunden sind. Über den Zählrohren gibt es die Möglichkeit, eine variable Anzahl an Stahlplatten einzulegen. Trifft ein Myon nun auf Materie, zerfällt es in einen Regen von ionisierenden Teilchen und erzeugt gleichzeitig in allen drei Zählrohren ein Event. Das gleichzeitige Eintreten von drei Events wird von der Koinzidenzschaltung als Koinzidenz-Event an den Logger weitergegeben. Der Gebrauch von drei Zählrohren ist essentiell, da bei Annahme einer geraden Flugbahn eines einzelnen ionisierenden Teilchens nur zwei der Zählrohre Events erzeugen und so die Koinzidenzschaltung kein Koinzidenz-Event an den Logger weitergibt. Durch eine variable Anzahl an Platten können verschiedene Theorien zur Interaktion zwischen Materie und Myonen getestet werden.

2.3. Funktionsweise Plastik-Szintillator²

Ein Plastik-Szintillationsdetektor besteht aus einem organischen Szintillator und einem Photomultiplier (siehe Abb. 2). Trifft ionisierende Strahlung auf ein Atom im Szintillator entsteht ein «electron hole pair», also ein freies Elektron, und eine unbesetzte Stelle in der Valenzschale des Atoms. Da diese Elektronen eine sehr hohe Energie haben, können sie weitere «electron hole pairs» bilden. Über einen gewissen Zeitraum stellt sich daher ein thermodynamisches Gleichgewicht ein und die freien Elektronen siedeln sich im tiefsten ungebundenen Energieniveau an. Die freien Elektronen bewegen sich nun durch den Szintillator und erzeugen durch Lumineszenz Licht, welches sich im sichtbaren Spektrum befindet. Dieses Licht wird von der Photokathode im Photomultiplier in Elektronen umgewandelt. Dann werden diese Elektronen auf Elektroden (Dynoden) beschleunigt. Beim Aufprall werden weitere Elektronen aus der Dynode gelöst, wodurch

²Der Inhalt dieses Kapitels wurde aus [4] übernommen.

die Ladung verstärkt wird. Alle Schritte in diesem Prozess sind proportional zueinander. Daher kann von der finalen Ladung auf die Energie der ursprünglichen Strahlung zurückgeschlossen werden.

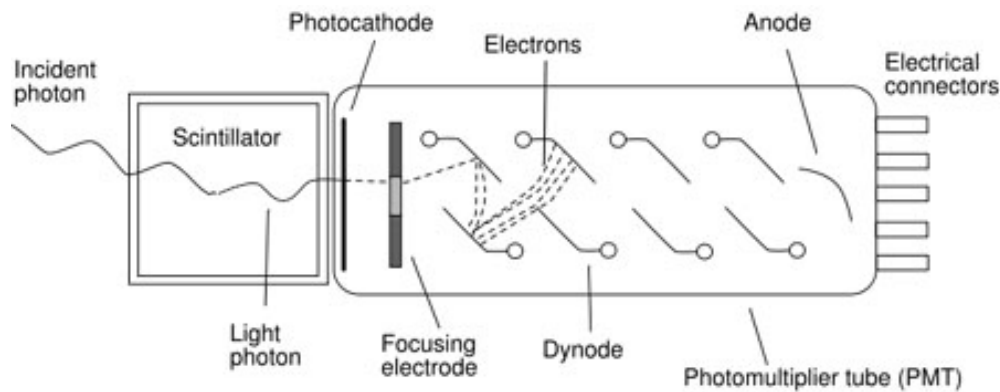


Abb. 2: Schema der Funktionsweise des Szintillators [4].

2.4. Funktionsweise Detektions-Teleskop

Das Detektions-Teleskop besteht aus zwei Plastik-Szintillatoren, die vertikal mit variablem Abstand d zueinander befestigt sind. Wird ein Myon von beiden Zählern gleichzeitig detektiert, kann man berechnen, aus welchem Himmelsareal dieses Myon stammt. Dies ist in Abb. 3 veranschaulicht. Der Öffnungswinkel des Himmelsareals ist 2θ und kann mit der Gleichung

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{d}{l}\right) = \arctan\left(\frac{l}{d}\right)$$

berechnet werden. Somit kann sich durch Variation von d ein recht genaues Bild davon gemacht werden, aus welchem Winkel wie viele Myonen kommen.

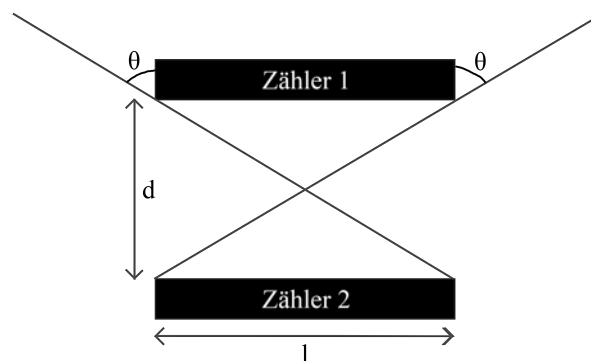


Abb. 3: Schema der Funktionsweise des Detektions-Teleskops.

2.5. Modelle

2.5.1. Einfaches Modell der Wechselwirkung der Myonen und Propagation sekundärer Teilchen

Die einfallenden Myonen werden als vertikal propagierend modelliert. Die Myonen treffen mit einer durchschnittlichen Intensität I_0 auf den Absorber. Für ein einzelnes Myon besteht während dem Durchdringen des Absorbers eine Chance mit einem Atom zu wechselwirken. In diesem Modell wird angenommen, dass Myonen während der Interaktion komplett abgebremst werden und ihre Energie im Festkörper deponieren. Die Interaktion mit den Absorberatomen wird über den Wirkungsquerschnitt σ und die Teilchendichte n des Absorbers modelliert. Für die Intensität der Myonen während der Propagation im Festkörper gilt dann

$$\frac{dI}{dz} = -n\sigma I(z),$$

wobei die Koordinate z die Eindringtiefe der Myonen in den Stahlblock bezeichnet. Es folgt die klassische exponentielle Abnahme der Myonenintensität $I(z) = I_0 \exp(-n\sigma z)$. Die Rate an Wechselwirkung pro Weglänge ist gegeben durch $An\sigma I(z)$, wobei A die Querschnittsfläche des Absorbers ist. Es wird angenommen, dass bei der Wechselwirkung immer sekundäre Teilchen entstehen, welche ebenfalls vertikal propagieren und ebenfalls eine Wahrscheinlichkeit haben auf dem Weg zum Detektor gestoppt zu werden. Wenn ein Myon an der Stelle z ein Sekundärteilchen erzeugt, so hat dieses eine Wahrscheinlichkeit von $\exp(-(L-z)/x_\tau)$ am Detektor anzukommen. Hierbei stellt L die Höhe des Absorberstapels dar und x_τ die Reichweite der Sekundärteilchen. Dadurch erhält man für die Rate an Sekundärteilchen am Detektor

$$R = \int_0^L \underbrace{AI_0 n\sigma \exp(-n\sigma z)}_{\text{Myonenwechselwirkung}} \underbrace{\exp\left(-\frac{L-z}{x_\tau}\right)}_{\text{sek. Propagation}} dx,$$

$$R = \frac{R_0}{\frac{1}{n\sigma x_\tau} - 1} \left(\exp(-n\sigma L) - \exp\left(-\frac{L}{x_\tau}\right) \right)$$

wobei $R_0 = AI_0$ ist. Es ist wichtig anzumerken, dass der radioaktive Zerfall der Myonen aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit ebenfalls vernachlässigt worden ist. Dies liegt darin begründet, dass die Zeitdauer der Propagation im Absorber unter einer Nanosekunde liegt, währenddem die mittlere Lebensdauer ruhender Myonen bei $2.2 \mu\text{s}$ liegt. Die Abschwächung der Myonenrate aufgrund des Zerfalls ist gegeben durch

$$1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\gamma\tau}\right) < 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \approx 450 \cdot 10^{-6}$$

2.5.2. Einfluss des Detektionsöffnungswinkels auf die Myonenrate im Parallel-Schichten-Modell

Es wird angenommen, dass Myonen fest in einer Höhe h_0 entstehen. Falls ein Myon in einem Polarwinkel θ auf den Detektor trifft, so hat dieses wie in Abb. 4 dargestellt eine Strecke von $h_0/\cos\theta$ zurückgelegt.

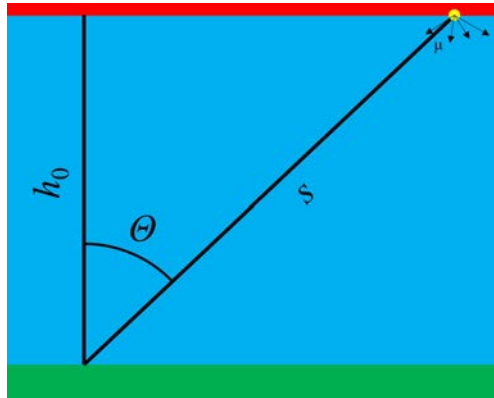


Abb. 4: Schema zum Einfluss des Polarwinkels auf den Propagationsweg der Myonen.

Aufgrund des Zerfalls mit Lebensdauer τ und der Zeitdilatation mit Lorentzfaktor γ gilt für die differentielle Rate

$$dR \propto \exp\left(-\frac{h_0}{\gamma v \tau \cos\theta}\right) d\Omega,$$

wobei v die Geschwindigkeit der Myonen, γ den Lorentzfaktor und Ω den Raumwinkel darstellen. Es wurde angenommen, dass die initiale Myonenrate konstant ist. Das heisst, mittels Integration lässt sich die Rate der Myonen darstellen als

$$R \propto 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} \sin\theta \exp\left(-\frac{h_0}{\gamma v \tau \cos\theta}\right) d\theta.$$

Dies stellt die Rate der Myonen dar, welche aus dem Polarwinkel-Intervall von 0 (senkrecht) bis $\theta_{\max}$ stammen. Der maximale Polarwinkel $\theta_{\max}$ hängt vom Abstand der beiden Platten und damit dem Öffnungswinkel ab. Dieses Integral ist nicht elementar integrierbar.

3. Methodik

3.1. Scattering-Teleskop

Messungen von Myonen-Wechselwirkungen sind sehr langwierig, da pro Zeitintervall nur sehr wenige Ereignisse gemessen werden können. Um trotzdem gute Resultate zu erhalten, kann man drei Ansätze wählen. Einerseits kann man die Messzeit verlängern. Andererseits kann man den Abstand zwischen Stahl-Platten und Detektoren variieren, um so möglichst viele Ereignisse messen zu können. Zuletzt gibt es noch die Möglichkeit, die Detektorfläche zu vergrössern. Dies war aufgrund des vorhandenen Materials aber nicht möglich.

Die Maximierung der Events ist aus dem Grund besonders wichtig, da bei Myonen-Versuchen der absolute Fehler F_{abs} durch die Formel

$$F_{abs} = \sqrt{N}$$

gegeben ist. Damit ist der relative Fehler F_{rel} durch die Formel

$$F_{rel} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

gegeben. In Zahlen bedeutet dies, dass man für einen relativen Fehler von 10 % 100 Messpunkte braucht, für einen relativen Fehler von 5 % aber bereits 400 Messpunkte.

In der Vorbereitung auf die Messungen wurde zuerst die Messzeit festgelegt. Dabei wurden Erfahrungswerte von vorherigen Projekten berücksichtigt. In einem zweiten Schritt wurde die optimale Plattenanzahl auch aufgrund von Erfahrungswerten gewählt. In den folgenden Messungen wurde mit den gewählten Parametern der Abstand zwischen Detektoren und Platten variiert. Dabei wurde ein Abstand von 4 cm als optimal auserkoren, da dabei am meisten Events detektiert wurden.

Mit den gewählten Parametern konnte im Anschluss die Plattendicke variiert werden. Dies wurde getan, um später bei der Auswertung das Zerfallsverhalten von Myonen aufgrund von verschiedenen Modellen genauer zu betrachten. Dazu wurden zuerst die beiden Extreme gemessen, einerseits mit 0 Platten, um das Hintergrundrauschen wegfiltern zu können, und andererseits mit 25 Platten, welches der maximalen Anzahl an Platten entsprach. Im Anschluss wurde immer ungefähr der Mittelwert an Platten als nächste Messung gewählt, also 15 Platten, danach 10 und 20 Platten, usw.

Nachdem ein grober Verlauf bestimmt war, wurden zwei Bereiche genauer angesehen, nämlich der Bereich, wo über eine kleine Variation an Plattendicke eine grosse Änderung der Events festgestellt wurde und andererseits das Verhalten in Richtung unendliche Plattendicke. Dazu wurden noch weitere Platten anderer Form und Dicke aufgelegt.

Im letzten der bisherigen Myonen-Projekte wurde festgestellt, dass der Messaufbau anfällig auf elektromagnetische Interferenz ist. Solche falsch detektierten Ereignisse würden zu Anomalien im Zeitverlauf der Zählrate oder in der Verteilung der Zeitintervalle zwischen Ereignissen führen. Um diese Fehlersignale zu minimieren, wurde der Aufbau verbessert, indem konsequent Koaxialkabel mit BNC-Steckern verwendet wurden, sowie Schleifen aus den elektrischen Verbindungen aller Komponenten mit der Batterie entfernt wurden.

3.2. Detektions-Teleskop

Das Vorgehen beim Detektions-Teleskop war deutlich einfacher, da diese Messapparatur bereits länger bei der academia in Gebrauch ist. Um eine Messung zu starten, wurde der Abstand zwischen den zwei Szintillator-Platten eingestellt. Um Hintergrundereignisse auszublenden, werden nur hinreichend energetische und koinzidente Ereignisse gezählt. Das heisst, es werden nur Ereignisse gezählt, welche in beiden

Platten nahezu gleichzeitig stattfinden und Spannungspulse erzeugen, die grösser als die Thresholdspannung sind. Die Thresholdspannung wurde ebenfalls vor Messbeginn über ein Potentiometer mithilfe eines Multimeters eingestellt. Es wurde dann ein Arduino UNO Microcontroller verwendet, um diese Ereignisse zu zählen. Dabei wurde er so programmiert, dass er jedesmal wenn ein Spannungspuls detektiert wird, die Zeit in Millisekunden in ein Array schreibt. Da der Microcontroller nur über einen begrenzten Speicherplatz verfügt und der Array eine feste Grösse aufweist, müssen die Daten von Zeit zu Zeit abgespeichert werden. Dazu wurde eine SD-Karte verwendet. Da das Schreiben der SD-Karte lange dauert (bis zu 100 ms) und gleichzeitig keine Ereignisse detektiert werden können, wurde wie folgt vorgegangen. Das Programm detektiert innerhalb von 10 s alle Ereignisse und schreibt diese dann auf die SD-Karte. Damit wird erreicht, dass der Prozessor während der Messung jederzeit bereit ist ein Ereignis zu detektieren.

In früheren Projekten wurde die Thresholdspannung vor und nach der Messung ausgelesen, um Veränderungen feststellen zu können. Es war jedoch bis jetzt nicht möglich, während der Messung automatisiert die Thresholdspannung auszulesen. Dazu wurde eine kleine Leiterplatte entwickelt, welche direkt auf den Arduino UNO aufgesteckt werden kann (siehe Abb. 5). Um dies zu ermöglichen, wurde der im Arduino eingebaute ADC (Analog-Digital-Converter) verwendet. Da die Temperaturstabilität und Präzision der eingebauten Spannungsreferenz eher bescheiden sind, wurde zusätzlich eine Präzisionsspannungsreferenz ADR03 von Analog Devices verwendet, welche als externe Referenz für die Konvertierung der Spannung fungiert. Diese Referenz verfügt über einen Temperatursensor, mit welchem es möglich ist neben der Spannung die Umgebungstemperatur aufzuzeichnen, um Temperatureffekte feststellen zu können. Ein Prototyp wurde vor dem Lager fertiggestellt und im Lager getestet.

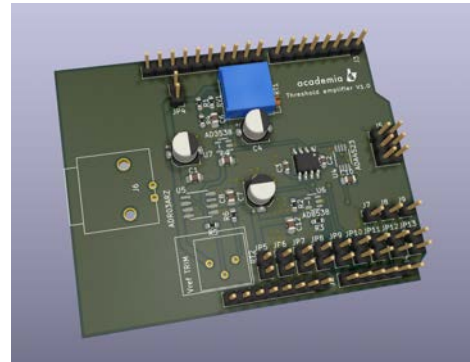


Abb. 5: KiCad-Render der Leiterplatte. Damit die Platine möglichst flexibel benutzbar ist, sind alle Pins über Jumpers umleitbar.

4. Resultate

4.1. Scattering-Teleskop

Während des Lagers wurde das Scattering-Teleskop mit 13 Stahlplatten aufgebaut und der Abstand der Zählrohre zu den Platten variiert, um die ideale Position zu finden, wo die Zählrate maximal ist. Aus früheren Projekten war bekannt, dass die Messzeiten für Myonenkollisionen mindestens 24 h betragen sollten, damit Messunsicherheiten von weniger als 20% erreicht werden können. In Abb. 6 wurde die Zählrate gegen die Position der Zählrohre aufgetragen. Die Unterseite der Stahlplatten befinden sich an der Position 21 cm. Die Fehlerbalken der letzten Messung an der Position 18 cm sind aufgrund der kurzen Messzeit von nur drei Stunden sehr gross.

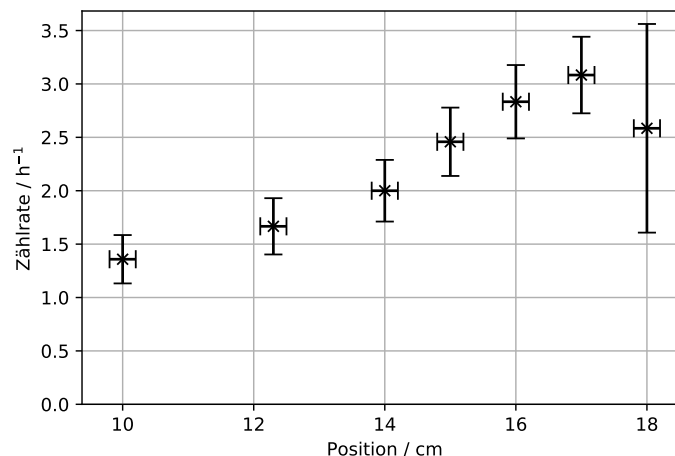


Abb. 6: Zählrate des Scattering-Teleskops bei variierender Position der Zählrohre mit eingeschalteter Dreierkoinzidenz.

Das linke Diagramm in Abb. 7 enthält die kumulierte Anzahl an gemessenen Myonenkollisionen in Abhängigkeit der Zeit bei der Messung mit den Zählrohren an der Position 15 cm. Die gestrichelte Linie zeigt die Trendlinie über die gesamte Zeit. Im rechten Diagramm der Abb. 7 wurde die Häufigkeit der Zeitintervalle zwischen zwei Ereignissen abgebildet. Da die gemessenen Myonenkollisionen einen Poisson-Prozess darstellen, ist das Zeitintervall zwischen zwei Ereignissen eine exponentialverteilte Zufallsvariable mit der Dichtefunktion $\lambda \exp(-\lambda \Delta t)$, wobei λ die mittlere Rate der Ereignisse ist. Zum Vergleich wurde die Dichtefunktion im gleichen Diagramm wie das Histogramm dargestellt.

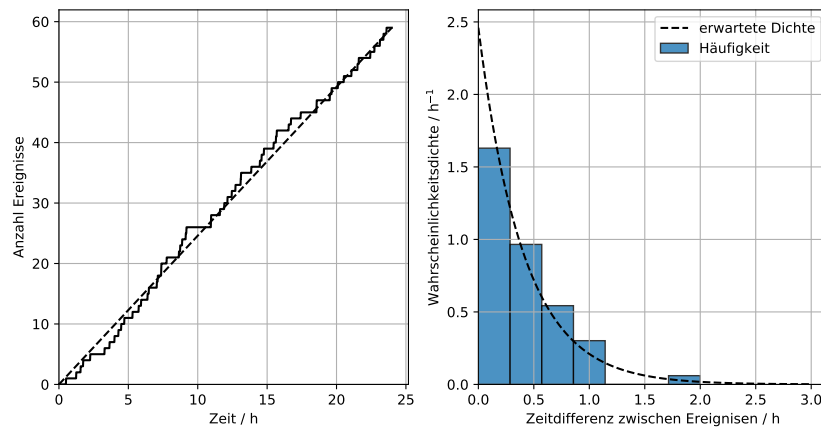


Abb. 7: Kumulierte Anzahl detektierter Ereignisse (linke Abbildung) und Häufigkeit der Zeitintervalle zwischen zwei Ereignissen (rechte Abbildung) zusammen mit der erwarteten Dichteverteilung für die Messung mit den Zählrohren an der Position 15 cm.

Die Messungen der Zählrate bei verschiedenen Absorberdicken wurden aufgrund der langen Messzeiten an der Kanti Wattwil durchgeführt. Damit konnten elf verschiedene Dicken ausgemessen werden. Um Hintergrundeffekte wie die zufällige gleichzeitige Detektion mehrerer Myonen (oder anderer ionisierender Strahlung) in allen drei Zählrohren zu eliminieren, wurde eine Null-Messung ohne Absorber durchgeführt. Die Zählrate der Null-Messung wurde von allen anderen Messungen wie in Abb. 8 dargestellt abgezogen. Das Modell aus Kapitel 2.5.1 wurde an die Daten gefittet. Die Parameter für den besten Fit beliefen sich zu $R_0 = 0.79 \text{ h}^{-1}$, $\sigma = 9.5 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ und $x_r = 0.28 \text{ m}$.

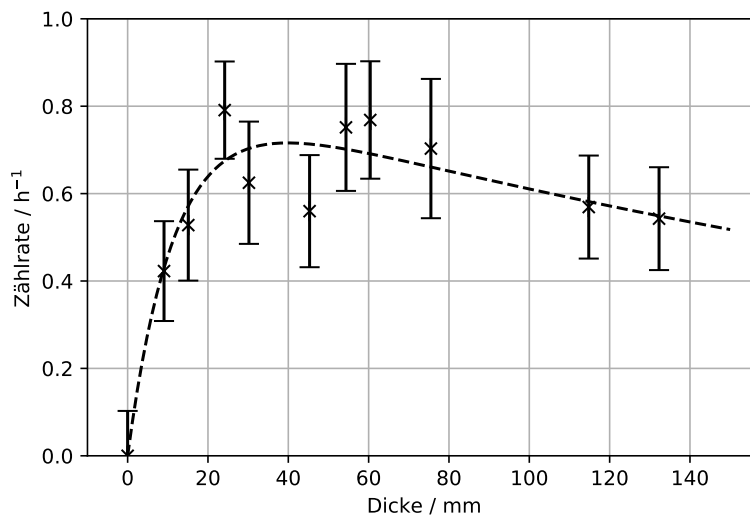


Abb. 8: Zählrate des Scattering-Teleskops bei variierender Dicke des Absorbers mit Fit des Modells (gestrichelte Linie).

4.2. Detektions-Teleskop

Mit dem Detektions-Teleskop wurden zwei Experimente durchgeführt. Im ersten wurde die Myonenrate bei verschiedenen Plattenabständen gemessen. Diese Daten können dann mit dem Modell aus Kapitel 2.5.2 verglichen werden. In Abb. 9 ist die Zählrate pro Stunde gegen den Öffnungswinkel aufgetragen, welcher über der Gleichung aus Kapitel 2.4 mit der Distanz zwischen den Platten verbunden ist. Dabei sind beide Achsen logarithmisch dargestellt.

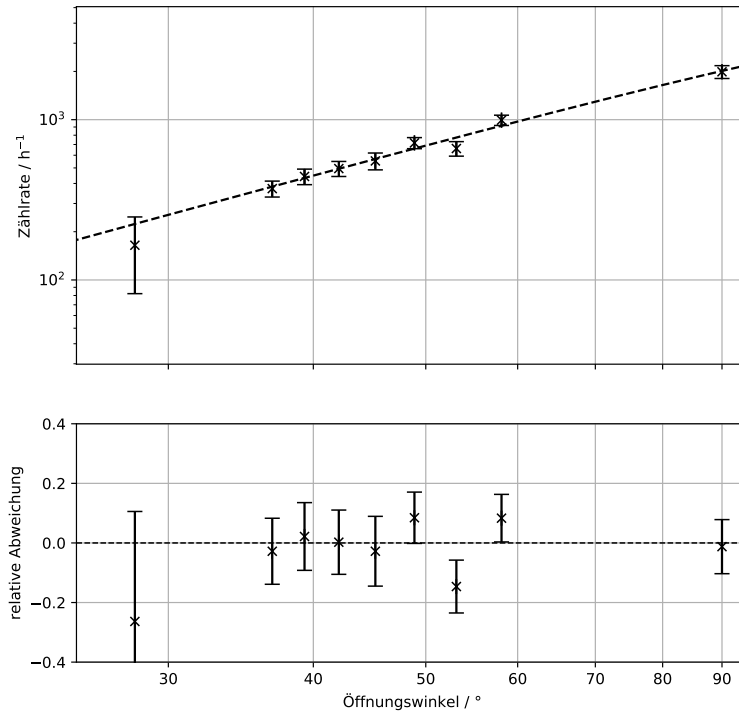


Abb. 9: Zählrate des Detektions-Teleskops bei verschiedenen Öffnungswinkeln und Fit des Modells aus Kapitel 2.5.2 (gestrichelte Linie).

Die Parameter für den besten Fit des Modells sind $\frac{h_0}{v\gamma} = 1.643 \cdot 10^{-6}$ s und 2016 für den Proportionalitätsfaktor.

Im zweiten Experiment wurde die Zählrate während der ca. 27-stündigen Überfahrt von Helsinki nach Travemünde aufgezeichnet. Dabei wurde der Plattenabstand minimal gewählt. In Abb. 10 ist der über eine Stunde gemittelte gleitende Durchschnitt der Zählrate dargestellt, sowie dessen Abweichungen von der mittleren Rate $R_{\text{mean}} = 0.423 \text{ s}^{-1}$. Da die einzelnen Messpunkte des gleitenden Durchschnitts um die mittlere Rate streuen und über ein Intervall von einer Stunde gemittelt wurden, und die Anzahl an Ereignissen in einem Zeitintervall Poisson-verteilt ist, kann man die Standardabweichung der Rate nach

$$\sigma_N = \sqrt{N} = \sqrt{R_{\text{mean}} \Delta t} \quad \rightarrow \quad \sigma_R = \frac{\sigma_N}{\Delta t} = \sqrt{\frac{R_{\text{mean}}}{\Delta t}} = 0.011 \text{ s}^{-1}$$

berechnen. Es wurde dann die Häufigkeit der Abweichungen von der mittleren Rate zusammen mit der Dichte der Normalverteilung $\mathcal{N}(0, \sigma_R)$ verglichen (siehe Abb. 10). Ausserdem wurde die kumulative Verteilung verglichen.

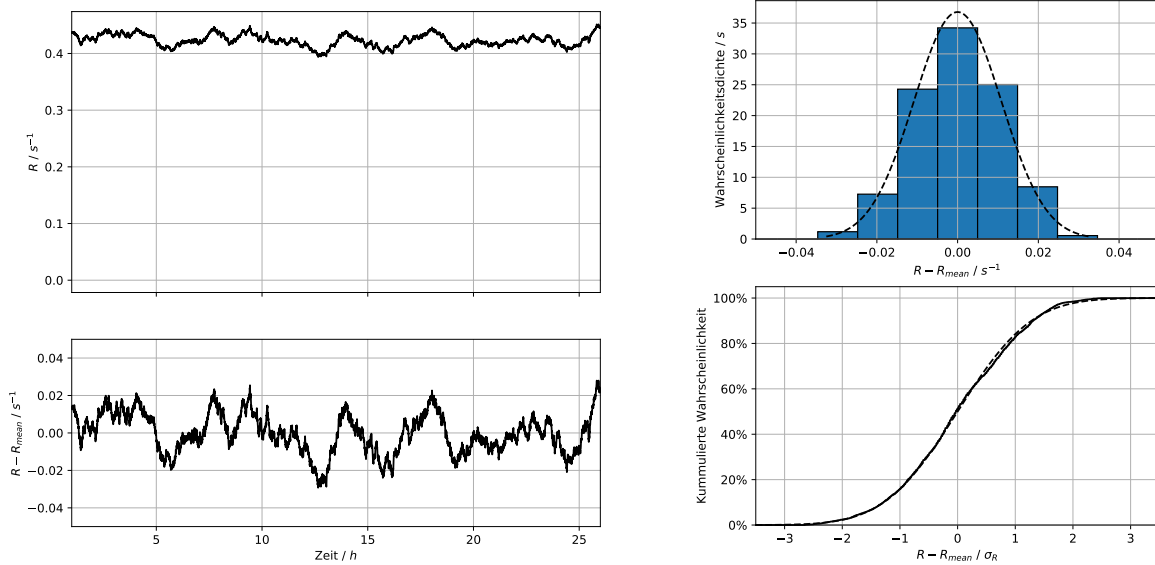


Abb. 10: Zählrate während der Nord-Süd Überfahrt in Abhängigkeit von der Zeit (linke obere Abbildung). Abweichung der Zählrate von der durchschnittlichen Rate (linke untere Abbildung). Histogramm der Abweichungen der Zählrate vom Mittelwert und die theoretische Dichteverteilung (rechte obere Abbildung). Verlauf des Anteil der Abweichungen der Zählrate vom Mittelwert und die theoretische kumulierte Verteilung (rechte untere Abbildung). Die unabhängige Achse wurde mit der Standardabweichung normalisiert.

5. Diskussion

5.1. Scattering-Teleskop

Aus den Resultaten der Abstandsversuche (dargestellt in Abb. 6), wo die Zählrohrposition bei gleicher Plattenzahl verändert wurde, kann qualitativ gesagt werden, dass die Zählrate stark mit der Nähe zu den Platten ansteigt. Dies ergibt qualitativ Sinn, da die entstehenden Streuprodukte eine begrenzte Reichweite aufgrund weiterer Wechselwirkungen haben. Es muss jedoch einen Punkt geben, ab dem die Zählrate wieder abnimmt. Dies liegt darin begründet, dass die Streuprodukte in einem engen Kegel abgestrahlt werden. So können nicht mehr alle drei Zählrohre ausgelöst werden, falls sie sich zu nahe am Kollisionsort befinden. Aus den Zeitverläufen und Spektren (siehe Abb. 7) kann kein anthropogener Einfluss auf die Myonendetektion festgestellt werden. Es konnten keine Ausreisser während hoher menschlicher Aktivität im Umfeld erkannt werden. Ausserdem scheint die Abschirmung und die Verkabelung nun adäquat zu sein, da keine Einflüsse durch Lichtschalter, Schaltnetzteile usw. festgestellt werden konnten.

Um die Werte für die Fitparameter σ und x_τ mit theoretischen Werten abzugleichen, müssen die Wechselwirkungen der Myonen mit dem Stahl verstanden werden. Aus der Literatur ist bekannt, dass für tiefe Energien $< 100 \text{ GeV}$, die primäre Wechselwirkung von Myonen in Eisen die Produktion von δ -Elektronen ist. Das heisst, das durchgehende Myon stösst elektromagnetisch auf ein Elektron und überträgt dem Elektron soviel Energie, dass es sich frei durch den Festkörper bewegen kann [5]. Damit stehen Sekundärelektronen als primärer Bestandteil der Sekundärstrahlung im Vordergrund. Man kann nun unsere gemessene Reichweite x_τ von 28 cm mit der CSDA-Reichweite (continuous slowing down approximation) für Eisen vergleichen [6]. Dazu muss man zunächst unsere Reichweite mit der Dichte von Eisen von rund 7.85 g cm^{-3} multiplizieren. Damit erhält man für die dichtebezogene Reichweite 220 g cm^{-2} , welche sehr hoch ist. Elektronen mit 1 GeV weisen nur eine CSDA-Reichweite von 56.78 g cm^{-2} auf. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da aus dem differentiellen Wirkungsquerschnitt ersichtlich ist, dass Stösse mit tiefem Energieübertrag $\nu = \frac{\epsilon}{E} < 10^{-3}$ dominieren [5]. Zusammen mit dem Wissen, dass die meisten Myonen auf Meereshöhe aus dem Energiebereich von einigen Gigaelektronenvolt stammen [7], müssten die meisten Sekundärelektronen

maximal im Energiebereich einiger Megaelektronenvolt liegen, für welche die CSDA-Reichweite sogar bei nur 0.6159 g cm^{-2} liegt.

Der Vergleich des von uns bestimmten totalen Wirkungsquerschnitts von $\sigma = 9.5 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ mit Literaturwerten stellte sich als aufwändiger heraus, da meistens der mittlere Energieverlust pro Weglänge angegeben wird. Ein Vergleich konnte dennoch durchgeführt werden, indem verwendet wurde, dass für Myonen mit Energien unterhalb von 100 GeV Ionisation die häufigste Wechselwirkung ist, und dass das Produkt $\nu \epsilon \sigma(E, \epsilon) \approx \text{const.}$ beinahe unabhängig von der auf die Elektronen übertragenen Energie ϵ ist. Hierbei ist E die Energie des Myons und $\nu = \frac{\epsilon}{E}$ der relative Energieübertrag des Myons. Daraus kann man den mittleren Energieverlust

$$\frac{dE}{dx} \approx -K \ln\left(\frac{E}{I}\right) E$$

berechnen, wobei K die vorher besprochene Konstante ist, welche für Myonen mit 100 GeV im Bereich von $4.0 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ liegt [5]. Vergleicht man nun diese Gleichung mit unserer Gleichung für die Dämpfung der Myonenintensität und nimmt an, dass die Energie der Myonen proportional zu ihrer Rate ist, so erhält man

$$n\sigma \approx K \ln\left(\frac{E}{I}\right).$$

Daraus erhalten wir für den totalen Wirkungsquerschnitt einen Vergleichswert von $4.7 \cdot 10^{-32} \text{ m}^2$ für 100 GeV Myonen, was einiges tiefer liegt als unser Wert. Mit einem anderen Ansatz kann man aus unserem totalen Wirkungsquerschnitt das Bremsvermögen $\frac{dE}{dx}$ abschätzen. Nimmt man an, dass es sich um Myonen mit Energien im Bereich 1 GeV handelt, so kann man das dichtebezogene Bremsvermögen mit

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \approx -n\sigma \frac{E}{\rho}$$

abschätzen. Dies ergibt mit unseren Messwerten $103 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$, was rund 50 bis 60-mal höher liegt als man mit der Bethe-Bloch-Gleichung erwarten würde [5]. Der Wert für die initiale Myonenrate R_0 liegt mit 0.79 h^{-1} sehr tief. Literaturwerte für die Intensität bewegen sich im Bereich von $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ [7]. Bei einer Detektorfläche von rund 100 cm^2 , müsste die stündliche Zählrate bei über 1000 h^{-1} liegen. Dies könnte daran liegen, dass nicht alle Kollisionen zu messbaren Sekundärteilchen führen, da niederenergetische Elektronen nur sehr kurze Reichweiten aufweisen und damit nicht den Detektor erreichen. Dazu weisen Stösse mit tiefem Energieübertrag den höchsten differentiellen Wirkungsquerschnitt auf, was dazu führen könnte, dass ein Grossteil der möglichen Interaktionen nicht detektierbar sind. Weiter könnte die effektive Detektorfläche aufgrund der dreifachen Koinzidenz tiefer ausfallen, als man a priori vermutet, da Wechselwirkungen an den Ränder des Absorbers nicht immer alle drei Zählrohre auslösen können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Fit des Modells gut mit dem Verlauf der Daten übereinstimmt, dass das Modell selbst jedoch unzureichend ist, um quantitative Aussagen zu treffen. Die teils grossen Abweichungen der Fit-Parameter von den Literaturwerten scheinen darauf hinzudeuten, dass das Modell wesentliche Effekte vernachlässigt.

5.2. Detektions-Teleskop

Obwohl bei der Herleitung für das Modell von kreisförmigen Platten ausgegangen worden war, stimmen die experimentellen Daten relativ gut mit dem Modell überein (Abb. 9). Es gibt nur einen Ausreisser bei 53° , wo das Modell ausserhalb des Konfidenzintervalls liegt. Unsere Fitparameter für $h_0/\nu\gamma$ liegt mit $1.643 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ in derselben Grössenordnung wie die Literaturwerte mit rund $5.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ ($\nu = 0.994c$, $h_0 = 15 \text{ km}$) [8].

Es konnte keine Veränderung in der Zählrate während der Nord-Süd-Überfahrt festgestellt werden (siehe Abb. 10). Es gab keine Anomalien in der Fluktuation der Zählrate, welche nicht mit der theoretisch erwarteten Streuung aufgrund der stochastischen Natur des Prozess vereinbar wäre. Es kann damit gesagt werden, dass es keinen messbaren Einfluss der geographischen Breite im Bereich von 53°N bis 60°N auf die Zählrate gibt.

6. Fazit und Ausblick

Abschliessend kann anhand der Verteilung der Daten davon ausgegangen werden, dass die Datenqualität bei beiden Messgeräten sehr gut ist. Alle Messgeräte funktionieren einwandfrei. Die Interferenz-Probleme, welche die Datenqualität in den letzten Jahren beeinflusst haben, konnten beseitigt werden. In weiteren Projekten soll daher die Verbesserung der Modelle vorangetrieben werden, sodass quantitative Vergleiche mit Literaturwerten möglich werden. Die Messungen der Myonen-Wechselwirkung sind besonders langwierig. Die Daten aus Abb. 8 wurden über eine kontinuierlichen Messzeit von über 9 Wochen erarbeitet. Es ist deshalb wohl unausweichlich in zukünftigen Projekten, die Messungen konsequent ausserhalb des Lagers durchzuführen, sodass bereits im Sommer mit den Messungen gestartet werden kann. Damit könnte die Datenqualität noch weiter gesteigert werden. Wie erwartet konnten bei der Schiffsüberfahrt keine signifikanten Unterschiede der Myonenrate bezüglich der geographischen Breite nachgewiesen werden. Der Prototyp für die Erweiterung des Arduino UNOs zur automatischen Aufzeichnung der Thresholdspannung und der Temperatur hat knapp 5 Stunden nach Ablegen keine vernünftigen Daten mehr produziert. Der Grund hierfür ist bis dato unbekannt. Am wahrscheinlichsten ist jedoch, dass eine Überlastung eines Operationsverstärkers zu einem Lockup geführt hatte. Diese Schaltung soll weiter überarbeitet werden, damit eine automatisierte Überwachung der Thresholdspannung möglich wird.

7. Literaturverzeichnis

- [1] «Forschen mit Myonen | Unsere Forschung | Paul Scherrer Institut (PSI)», <https://www.psi.ch/de/media/forschen-mit-myonen> (Zugriff: 01.10.2023).
- [2] «HEPHY: Kosmische Strahlung», <https://teilchenphysik.at/wissen/kosmische-strahlung/index.html> (Zugriff: 01.10.2023).
- [3] «Der Geigerzähler», <https://www.radioaktive-strahlung.org/radioaktivitaet/geigerzaehler.htm> (Zugriff: 12.12.2023).
- [4] «Stanford: Advanced Optical Ceramics Laboratory», <https://web.stanford.edu/group/scintillators/scintillators.html> (Zugriff: 13.12.2023).
- [5] Bogdanov A. et al., «Geant4 simulation of production and interaction of muons», *IEEE Transactions on Nuclear Science* **53**, 2 (2006).
- [6] «ESTAR: Stopping Power and Range Tables for Electrons», <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (Zugriff: 02.03.2024).
- [7] Nakamura K., «Review of Particle Physics», *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **37**, 7A (2010).
- [8] Lulu L., «The Speed and Lifetime of Cosmic Ray Muons», <https://web.mit.edu/lululiu/Public/8.13/Muons/muons.pdf> (Zugriff: 03.02.2024).

Wasserstoffvorkommen im All

Benedikt Baumgarten, Gian-Luca Fähr, Urs Grob, Hendrik Roos,
László Rubóczki

1. Einführung

Die Datenübertragung über Funk nutzen wir heutzutage rege - es sind keine lästigen Kabel nötig, die Radiowellen, welche die Informationen tragen, können durch den freien Raum propagieren. Physikalisch gesehen unterliegt den Radiowellen das gleiche Prinzip wie dem sichtbaren Licht, nur dass wir als Menschen für sie kein Sensorium besitzen.

Es scheint also naheliegend, dass es nicht nur spannend ist, die fantastischen Bilder aus der visuellen Astronomie des Universums zu genießen; Messungen aus der Radioastronomie bergen ebenso interessante Aspekte. Das vorliegende Projekt basiert auf der Maturaarbeit von Amanda Tran über dasselbe Fachgebiet [1]. Mithilfe einer kostengünstigen Empfangseinheit sollte das Radiosignal neutralen Wasserstoffs im Universum nachgewiesen und untersucht werden. Dazu war die Überprüfung der Funktionsweise und Sensitivität der bereits vorhandenen Apparatur notwendig. Die Radioantenne konnte erfolgreich in Betrieb genommen werden und eine grössere Himmelsregion kartiert werden. Der Vergleich der während des Lagers in Tampere gewonnenen Messdaten mit professionellen Datensätzen sieht sehr erfolgversprechend aus.

2. Theorie

2.1. Elektromagnetische Wellen

Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen. Wellen besitzen eine zeitlich periodische Struktur aus Wellbergen und -tälern. Das heisst, nach einer gewissen Zeit wiederholt sich ihre Signalform. Diese Zeit nennt man Periode T . Oft wird allerdings nicht T , sondern die Frequenz $f = 1/T$ angegeben, also wie oft sich das Wellensignal pro Zeiteinheit wiederholt. Wellen besitzen ferner eine Ausbreitungsgeschwindigkeit c , wie man es z. B. von Wasserwellen in einem Teich kennt. Von da wissen wir ausserdem, dass nicht nur die zeitliche, sondern auch die räumliche Abhängigkeit des Wellensignals periodisch ist. Im Raum wiederholt sich letzteres jeweils nach der Wellenlänge λ , wobei $c = \lambda \cdot f$ gilt. Allen elektromagnetischen Wellen ist gemein, dass ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit im freien Raum der Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ entspricht. Ihre Wellenlänge λ kann beliebig kurz bis beliebig lang sein. Zum Beispiel besitzt sichtbares Licht eine Wellenlänge zwischen 400 nm (blau) und 750 nm (rot). In Richtung kürzerer Wellenlängen folgt das ultraviolette Licht und die Röntgenstrahlung. Zu längeren Wellenlängen schliessen sich die Wärmestrahlung (Infrarotlicht) und die Radiowellen an (Wellenlängenbereich ab ca. 0.1 mm). Für die erdgebundene Astronomie sind der sichtbare und der Radiowellenbereich besonders interessant, weil die Atmosphäre in diesen Bereichen durchsichtig ist, also das sowieso schon wenige Licht nicht noch zusätzlich stark gedämpft wird. Die Signalstärke oder Intensität einer elektromagnetischen Welle ist ein Mass dafür, wieviel Energie die Welle überträgt. Dabei ist gemäss der modernen Auffassung der Quantenmechanik die Energie nicht frei wählbar, sondern quantisiert in der Form von Photonen. Ein Photon besitzt die Energie $E_{\text{photon}} = hf$, wobei $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ das Plancksche Wirkungsquantum ist (h ist eine Naturkonstante). E_{photon} gibt also die minimale Energie an, welche eine elektromagnetische Welle der Frequenz f aufweisen muss (es gibt nur ganze Photonen).

2.2. Spektren

Wie wir wissen, sind Atome und Moleküle aus Atomkernen (Protonen, Neutronen) und Elektronen aufgebaut. In dieser Konfiguration können die Elektronen bestimmte stabile Energiezustände annehmen. Die möglichen Energiezustände sind charakteristisch für das jeweilige Molekül oder Atom. Wechselt ein Elektron von einem Zustand in einen anderen, muss es die entsprechende Energiedifferenz von aussen erhalten bzw. nach aussen abgeben. Dies geschieht über die Absorption bzw. Emission einzelner Photonen der entsprechenden Energiedifferenz. Wie wir aus Kapitel 2.1 wissen, ergibt sich aus der Photonenenergie direkt

die Frequenz f und damit auch die Wellenlänge λ . Atome oder Moleküle können demnach nur Photonen passender Wellenlänge absorbieren oder emittieren. Daher widerspiegeln sich ihre charakteristischen Energiezustände in Absorptions- bzw. Emissionsspektren. Spektren geben also an, bei welchen Wellenlängen elektromagnetische Wellen von einem Atom oder Molekül absorbiert bzw. emittiert werden können.

2.3. Rot- und Blauverschiebung

Der Doppler-Effekt ist ein physikalisches Phänomen, das den Wellenlängenunterschied eines Signals zwischen einem Beobachter und einer sich relativ dazu bewegenden Quelle beschreibt. Bewegt sich letztere auf den Beobachter zu, wird die Welle komprimiert, die Wellenlänge scheint für den Beobachter also kürzer. Handelt es sich bei der Welle um sichtbares Licht, so registriert der Beobachter den Farbton des Lichts etwas nach blau verschoben (zu kürzeren Wellenlängen hin). Umgekehrt wird der Farbton etwas nach rot verschoben, wenn sich die Quelle relativ vom Beobachter entfernt. Von da kommen die Bezeichnungen Rot- und Blauverschiebung. Natürlich beschränkt sich der Doppler-Effekt nicht auf sichtbares Licht, sondern gilt auch für alle andere Wellen. Wir kennen das Phänomen wohl besser im Zusammenhang mit Schall. Die Sirene eines Krankenwagens tönt beispielsweise höher, wenn sich dieser auf uns zubewegt. Bei Schall bedeutet eine längere Wellenlänge einen tieferen Ton und umgekehrt. In der Astronomie wird der Doppler-Effekt verwendet, um die relativen Geschwindigkeiten von Himmelsobjekten zu bestimmen, indem man die Verschiebungen ihrer Lichtspektren analysiert. Dazu werden die erwarteten Absorptions- bzw. Emissionsspektren bekannter Stoffe mit den effektiv von der Erde aus gemessenen verglichen.

3. Radioastronomie - Nachweis von Wasserstoff

Warum nun aber Radioastronomie? Gemäss Kapitel 2.1 besitzen Photonen umso weniger Energie, je kleiner ihre Frequenz f bzw. je länger ihre Wellenlänge λ ist. Entsprechend können Photonen aus dem Radiowellenbereich insbesondere in verhältnismässig kühlen Regionen im Universum ausgesandt werden, in denen die zur Verfügung stehende Energie z. B. für die Entstehung sichtbaren Lichtes (hochenergetisch) nicht mehr reicht (die Temperatur ist ein Mass für die zur Verfügung stehende Energie). Die Radioastronomie ermöglicht also beispielsweise die Beobachtung kühler Gaswolken, welche sich im interstellaren Raum befinden, während die visuelle Astronomie für die Untersuchung heisser Sterne günstig ist.

3.1. Wasserstoff HI-Spektrallinie

Neutraler Wasserstoff (chemisches Formelzeichen H) besitzt in seiner atomaren Form einen Energieübergang im Radiowellenbereich bei einer Frequenz $f_{\text{HI}} = 1420.4 \text{ MHz}$ bzw. einer Wellenlänge $\lambda_{\text{HI}} \approx 21 \text{ cm}$. Diese Spektrallinie ist von besonderem Interesse, weil Wasserstoff das häufigste Element im Universum ist. Damit lassen sich insbesondere Wasserstoffwolken im interstellaren Raum und allgemein die Materieverteilung im Universum untersuchen. Ausserdem ist aus der Rot- und Blauverschiebung des Spektrums die Relativgeschwindigkeit dieser Wasserstoffwolken relativ zur Erde messbar. Dies ermöglicht tiefe Einblicke in die Struktur und Entwicklung des Universums.

3.2. Radioteleskop

Der Aufbau der Empfangseinheit ist in Abb. 1 dargestellt. Eine Parabolantenne (Durchmesser 1.8 m) ist auf einem Stativ montiert und mit einem Gegengewicht ausbalanciert. Der Parabolspiegel reflektiert das einfallende Radiosignal aus einer bestimmten Richtung so, dass es im Brennpunkt konzentriert wird. Dort befindet sich die Dipolantenne. Sie dient dazu, die elektromagnetischen Wellen in elektronische Signale umzuwandeln. Diese durchlaufen den Verstärker (LNA) und werden per Koaxialkabel zum Radiospektrometer (SDR) und dem Rechner (Raspberry Pi) übertragen. Dort werden sie digitalisiert und abgespeichert. Die gewonnen Daten werden anschliessend auf einem separaten Computer ausgewertet.

Dipolantenne

Die Dipolantenne ist eine gestreckte Drahtantenne, welche elektromagnetische Wellen aus der Luft in ein Wechselstromsignal in einer elektrischen Leitung umwandelt und umgekehrt. Im vorliegenden Projekt wur-

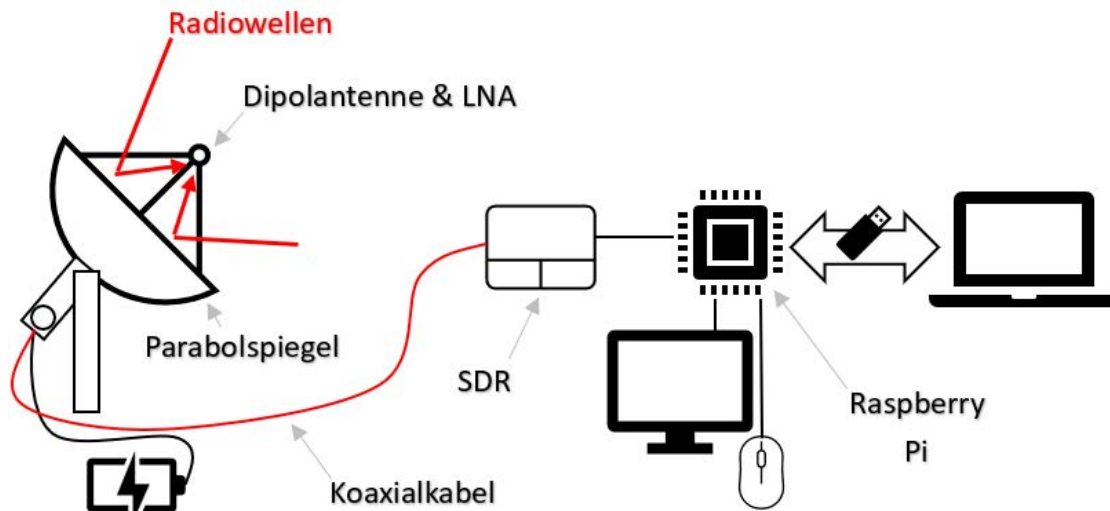


Abb. 1: Aufbau der Empfangseinheit für Radiowellen.

de sie nur zu Empfangszwecken verwendet. Die Länge des Dipols muss auf die Empfangsfrequenz abgestimmt werden. Die optimale Länge eines Halbwellendipols liegt bei $\lambda/2$. Idealerweise ist der Dipol um 45° gegen den Horizont geneigt, damit Störsignale von künstlichen, erdgebundenen Signalquellen möglichst schwach empfangen werden.

Antennenverstärker

In diesem Projekt wurden speziell für diese Anwendung optimierte, rauscharme Verstärker (Low Noise Amplifier, LNA) eingesetzt (Nooelec SAWbird+ H1). Diese verstärken das Antennensignal nur in einem engen Frequenzband um die HI-Spektrallinie herum, um die Qualität des schwachen Signals möglichst nicht zu beeinträchtigen. Um zusätzliche Rauschsignale der Kabel zu vermeiden, wurde der Verstärker unmittelbar nach der Dipolantenne angebracht. Seine Stromversorgung geschah über eine separate Akku-Quelle, um das 50 Hz-Netzrauschen zu unterdrücken.

Software Defined Radio

Für die Digitalisierung der verstärkten Antennensignale wurde ein Software Defined Radio Module (SDR) verwendet (SDRplay RSP1). Dieses konvertiert die hochfrequenten Signale über einen Trick in ein tiefes Frequenzband, damit sie mit gängiger Elektronik weiterverarbeitet werden können (Seitenbandmodulation). Die Zentralfrequenz kann programmiert werden (im vorliegenden Fall 1420.4 MHz), die Bandbreite beträgt 8 MHz und die Auflösung 4096 Kanäle. Deren einzelnen Signale werden digitalisiert, zu einem Spektrum zusammengefügt und per USB-Kabel an den Steuerungsrechner weitergeleitet. Damit sich auch schwache Signale detektieren lassen, können die Signale der einzelnen Kanäle aufintegriert werden. Das bedeutet, dass die Signalstärke über eine gewisse Zeitspanne, die Integrationszeit, zusammengezählt wird.

Steuerungsrechner

Die Steuerung des Empfängers wurde mit einem Raspberry-Pi-Einplatinencomputer umgesetzt. Unter anderem kann damit diverse Hardware gesteuert werden, im vorliegenden Fall wurde damit das SDR-Modul betrieben. Gesteuert wird der Raspberry Pi mittels angeschlossenem Bildschirm, Tastatur und Maus wie ein normaler Computer. Idealerweise stünde für den Einsatz bei astronomischen Messungen eine Internetverbindung zur Verfügung, damit das Datum und die Zeit aktualisiert werden kann. So würden die Beobachtungskordinaten automatisch in galaktische Koordinaten umgerechnet. Im vorliegenden Fall musste dieser Schritt nachträglich manuell gemacht werden.

3.3. Kalibration des Empfängers

Für die spätere Auswertung der Daten wurde eine Empfindlichkeitskurve der Empfangseinheit aufgenommen. Hierfür wurde die Dipolantenne durch einen $50\ \Omega$ -Abschlusswiderstand ersetzt und ein Referenzspektrum aufgenommen (siehe Abb. 2).

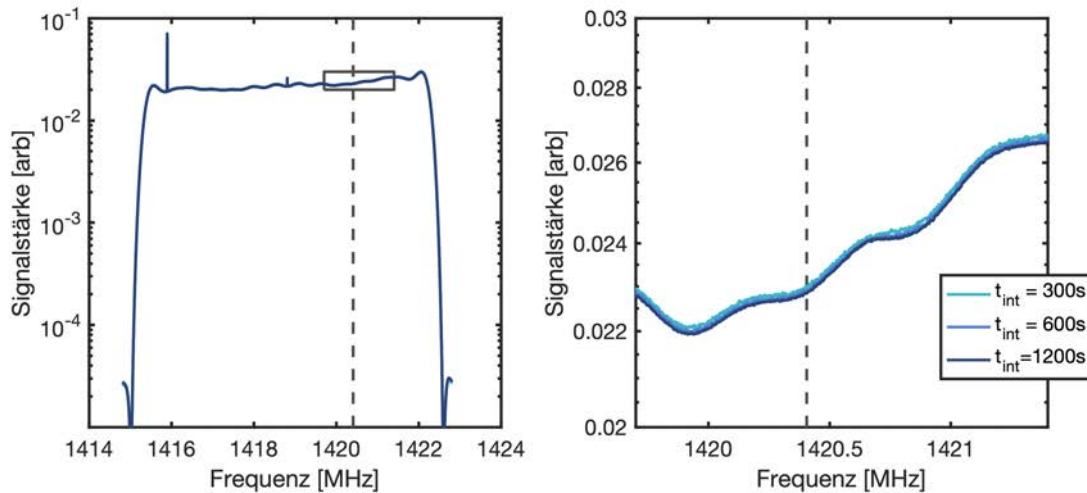


Abb. 2: Spektrale Sensitivität der Empfangseinheit für verschiedene Integrationszeiten t_{int} . Die Dipolantenne wurde für diese Messung durch einen $50\ \Omega$ -Abschlusswiderstand mit einer flachen Response ersetzt. Links: Übersicht über die ganze Bandbreite des SDR-Empfängers. Rechts: Ausschnitt um den für das Projekt relevanten Bereich der HI-Spektrallinie. Der Ausschnitt ist in der Übersicht als Rechteck eingezeichnet, die HI-Spektrallinie ist gestrichelt markiert.

Der verwendete Abschlusswiderstand ist bis 18 GHz spezifiziert und zeigt im relevanten Frequenzband um die HI-Spektrallinie eine ausreichend flache Response. Konzeptionell wurde mit dem Ersatz der Dipolantenne durch den Abschlusswiderstand aus dem Radiowellenempfänger ein (relativ aufwändiges) Thermometer für den Abschlusswiderstand gebaut. Die Messung wurde mit drei verschiedenen Integrationszeiten t_{int} durchgeführt. Wie erwartet überlagern sich die Kurven und unterscheiden sich im Wesentlichen durch ein stärkeres Rauschen für kürzere Integrationszeiten. Sie sind allerdings ausserdem absolut ein wenig zueinander verschoben, was wahrscheinlich auf Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Messungen zurückzuführen ist. Dabei dürften der Abschlusswiderstand wie auch die Empfangselektronik von einer Temperaturabhängigkeit betroffen sein. Ferner ist auf der linken Seite, sowie im Zentrum des aufgezeichneten Frequenzbandes je ein Peak zu erkennen (Abb. 2 links). Bei beiden dürfte es sich um Artefakte der Frequenzkonversion im SDR-Empfänger handeln. Der Bereich um die HI-Spektrallinie ist davon aber nicht betroffen (Abb. 2 rechts).

Im diesjährigen Radioastronomieprojekt war das Ziel, den Frequenzgang der Empfängerschaltung nach der Antenne möglichst zu glätten. Zukünftig wäre eine absolute Kalibration wünschenswert, damit nicht nur die Form der gemessenen Radiospektren, sondern auch die Intensität eine Bedeutung erhalten. Möglicherweise wäre dazu eine ausführliche Charakterisierung notwendig (insbesondere bezüglich der Temperaturabhängigkeit). Eine Alternative wäre, die Kalibration regelmässig in-situ vorzunehmen, indem zwischen einem temperaturstabilisierten Abschlusswiderstand und der Dipolantenne als Signalquelle hin- und hergewechselt wird. So wäre zu jedem Radiospektrum eine aktuelle Kalibrationskurve zugänglich.

3.4. Antennenpositionierung

Üblicherweise müssen Teleskope, egal ob für visuelle oder andere astronomische Beobachtungen, mittels einer geeigneten Montierung auf das zu beobachtende Himmelsobjekt ausgerichtet und aktiv nachgeführt werden. Ohne Nachführung verschwindet letzteres aufgrund der Erddrehung allmählich aus dem Gesichtsfeld. Eine automatisierte Montierung für eine Parabolantenne von 1.8 m Durchmesser ist technisch verhältnismässig anspruchsvoll. Zum einen muss die mechanische Stabilität und Präzision insbesondere bei

Wind gewährleistet sein, zum anderen ist auf eine rauscharme elektronische Ansteuerung zu achten, damit die Qualität der Messdaten nicht leidet. Da im vorliegenden Projekt aber nicht die Untersuchung eines bestimmten Himmelsobjekts im Zentrum stand, sondern die allgemeine HI-Kartierung, erübrigte sich die aktive Nachführung. Zur Rasterung des Himmels konnte die Erddrehung nämlich für einmal zum Vorteil genutzt werden. Die Parabolantenne wurde in Südrichtung orientiert und jeweils während 24 h unter demselben Elevationswinkel ausgerichtet. Alle 20 min wurde eine Messung von 600 s durchgeführt und daraus ein Bildpunkt berechnet (die Wartezeit zwischen den Messungen entstand wegen der ineffizienten Datenübertragung). Aufgrund der Erddrehung ergab sich auf diese Weise automatisch im Mittel ein Abstand von ca. 5° in Azimutrichtung zwischen den einzelnen Bildpunkten. Nach einem Tag wurde der Elevationswinkel angepasst und der nächste Transekt gestartet. Insgesamt wurden Daten für fünf verschiedene Elevationswinkel erhoben (15° , 22.5° , 30° , 37.5° und 45°). Leider sind nicht alle Datensätze vollständig, da die Empfängersteuerung mehrfach ausgefallen ist. Der erhobene Datensatz umfasst Spektren von 320 Bildpunkten.

3.5. Auswertung

Für eine aussagekräftige Analyse der Messergebnisse mussten die Rohdaten erst digital aufbereitet werden. Der Prozess wird im Folgenden anhand eines zufällig ausgewählten Beispiels dargestellt. Der gesamte Rohdatensatz wurde für alle weiteren Auswertungen gleich bearbeitet. In Abb. 3 oben ist ein Beispiel für ein Rohdatenspektrum abgebildet. Entsprechend der Abtastrate des SDR-Empfängers beträgt die aufgezeichnete Bandbreite 8 MHz mit einer Auflösung von 4096 Punkten. Deutlich zu erkennen ist, dass ohne konkrete Angabe des spannenden Frequenzbereichs der HI-Spektrallinie um 1420.4 MHz kaum das eigentliche Signal ausfindig gemacht werden kann.

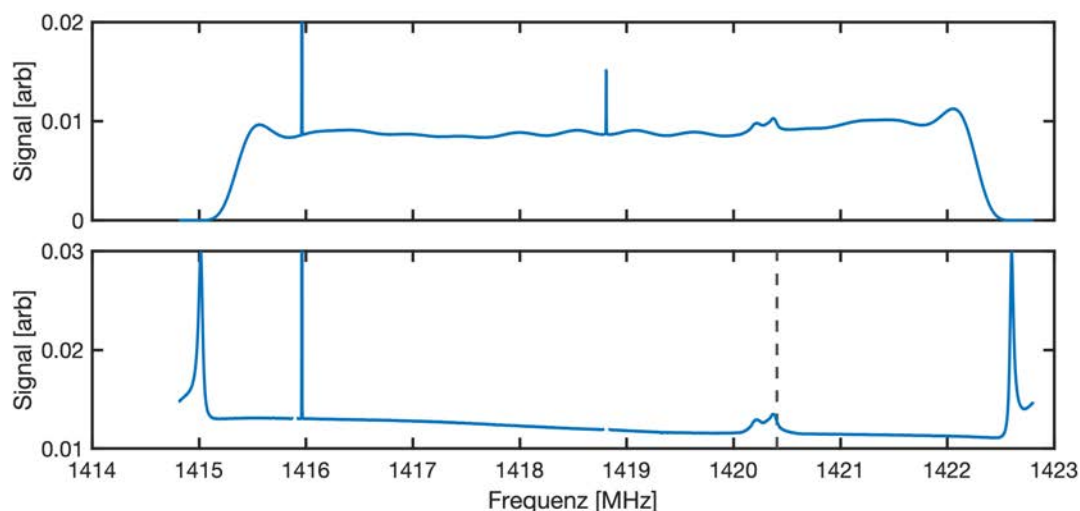


Abb. 3: Oben: Beispiel für ein Rohdatenspektrum, das eigentliche Signal bei 1420.4 MHz sticht über dem Rauschhintergrund nur wenig hervor. Unten: Mit der Eichkurve aus Kap. 3.3 normiertes Spektrum. Nach dieser Normierung ist zwar das Signal um die HI-Spektrallinie (gestrichelt eingezeichnet) wesentlich prominenter, der Hintergrund ist aber nach wie vor nicht ganz flach. Die Frequenzskala ist für beide Diagramme identisch.

In einem ersten Schritt werden die Daten mit dem Frequenzgang der Verstärkungs- und Filterschaltung aus Kapitel 3.3 normiert (vgl. Abb. 3 unten). Im relevanten Bereich des Spektrums kann so ein ausreichend flacher Hintergrund erreicht werden, aus welchem das eigentliche Signal heraussticht. Im Idealfall wäre der Hintergrund nun komplett flach, allerdings sind in der verwendeten Kalibrationskurve weder der Einfluss der Dipolantenne, noch die Temperaturabhängigkeit der Komponenten berücksichtigt. Für den vorliegenden Fall wurden die normierten Daten lokal um den relevanten Bereich zusätzlich linear geglättet. Die so aufbereiteten Daten des Beispielspektrums sind in Abb. 4 dargestellt.

Gut erkennbar ist, dass das Spektrum nicht zentral um die erwartete HI-Spektrallinie (schwarz gestrichelt eingezeichnet) verteilt ist, sondern rotverschoben ist. Das emittierende Gas entfernt sich also offenbar von der Erde. Damit kann gezeigt werden, dass mit der vergleichsweise einfachen Radioantenne nicht nur das HI-

Signal nachgewiesen und kartiert werden kann, sondern sogar die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit von Wasserstoffwolken analysiert werden können.

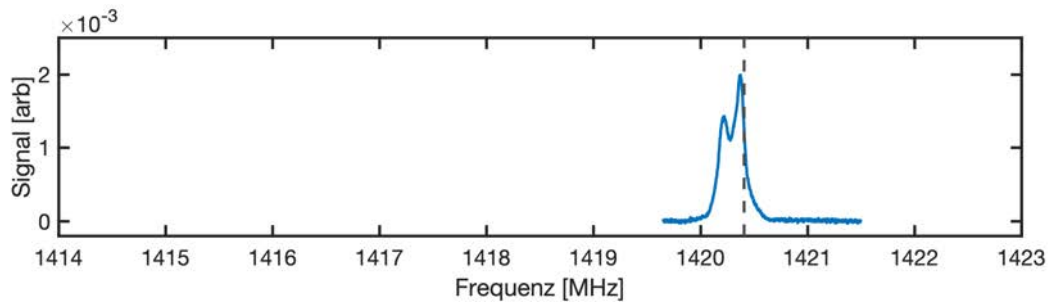


Abb. 4: Nachträglich um das HI-Signal geglättetes und auf den relevanten Bereich zugeschnittenes Spektrum. Der gesamte Datensatz (320 Bildpunkte) wurde für die weiteren Auswertungen so vorbereitet.

4. Resultate

Untersuchungen des HI-Signals wurden mit diesem Projekt im Rahmen der **academia** zum ersten Mal durchgeführt. Wichtigstes Ziel war es daher, die Empfangsapparatur zu testen und nachzuweisen, dass effektiv sinnvolle Messungen durchgeführt und interpretiert werden können. Es musste davon ausgegangen werden, dass Quellen einzelner astronomischer Objekte aufgrund der schwachen Signale und des technischen Aufwandes (aktive Nachführung) schwierig nachzuweisen wären. Alternativ dazu finden sich in der Literatur Untersuchungen zu HI-Spektren mit den entsprechenden Rot- und Blauverschiebungen, sowie zur Kartierung der Signalstärke. Die beiden Aspekte konnten parallel verfolgt werden und es standen ausreichend Vergleichsdaten aus der wissenschaftlichen Astronomie zur Verfügung, um die eigenen Messdaten zu überprüfen.

4.1. Spektrale Rot- und Blauverschiebung des HI-Signals

Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurde die Erddrehung ausgenutzt, um mit einem statischen Instrument den Himmel zu rastern. Dabei wurde für jeden Bildpunkt über eine Integrationszeit von 600 s ein Spektrum um 1420.4 MHz aufgenommen. Die Daten wurden gemäss der Beschreibung in Kapitel 3.5 aufbereitet.

Vergleicht man Spektren aus verschiedenen Himmelsrichtungen, so sind tatsächlich grosse Unterschiede zu erkennen. Abb. 5 zeigt drei zufällig entlang des Transeks bei einem Elevationswinkel von 30° ausgewählte Beispielmessungen. Die Bildpunkte liegen in einer Reihe und sind in Azimutrichtung ca. 10° voneinander entfernt. Die Separation ist so gewählt, dass es keinen nennenswerten Überlapp der jeweiligen Gesichtsfelder gibt. Der beugungsbegrenzte Öffnungswinkel der Parabolantenne beträgt ca. 7° für den untersuchten Frequenzbereich. In der Graphik ist die statische HI-Spektrallinie bei 1420.4 MHz zur Orientierung schwarz gestrichelt eingezeichnet. Die Frequenzskala ist für alle Spektren gleich. Zusätzlich ist oberhalb der drei Diagramme die korrespondierende relative Geschwindigkeitsskala zur Erde dargestellt. Diese wurde aus der relativistischen Dopplerverschiebung der Frequenzabweichung von 1420.4 MHz berechnet. Gut zu erkennen ist, dass sich bereits über den vergleichsweise kleinen Abstand der drei Bildpunkte beträchtliche Veränderungen in der Form des Spektrums ergeben. Ist im obersten der drei Spektren noch deutlich das Wasserstoffsignal eines Objekts zu erkennen, welches sich mit gegen 80 km s⁻¹ auf die Erde zubewegt (Peak ganz rechts), verschwindet dieses in den beiden folgenden Spektren vollständig. Dafür erscheint im Gesichtsfeld letzterer ein Objekt, welches sich mit ca. 40 km s⁻¹ von der Erde entfernt und damit ein rotverschobenes Spektrum zeigt (Peak ganz links in den unteren beiden Diagrammen). Darüber hinaus offenbart sich ein weiteres ausgedehntes Objekt über alle drei Bildpunkte, welches sich mit knapp 10 km s⁻¹ von der Erde entfernt (zentraler Peak, welcher in allen drei Spektren erkennbar ist). Gemäss der Literatur sind relative Geschwindigkeitswerte um bis zu 100 km s⁻¹ für Signale hoher Intensität üblich. Die hohe Intensität lässt auf nahe Quellen schliessen. Diese Signale stammen vermutlich hauptsächlich von Wasserstoffwolken aus der näheren Umgebung der Erde innerhalb der Milchstrassengalaxie.

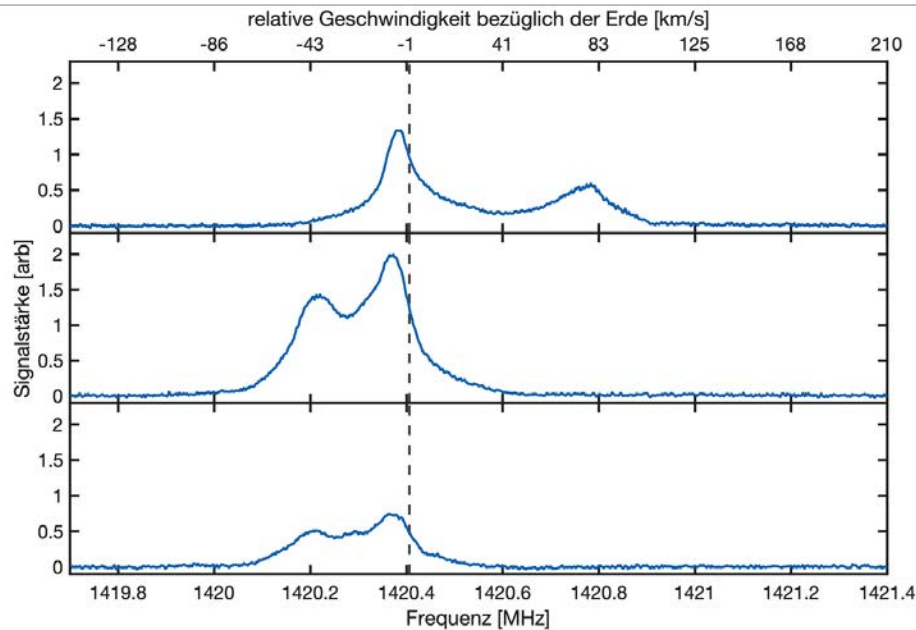


Abb. 5: Spektren um die Grundfrequenz der HI-Spektrallinie bei 1420.4 MHz (schwarz gestrichelt) aus einer Himmelsregion. Die Diagramme von oben nach unten zeigen Daten, welche von drei Bildpunkten in einer Reihe stammen. Sie wurden bei einer Elevation von 30° gemessen und sind jeweils in Azimutrichtung 10° voneinander entfernt. Die Frequenzskala ist für alle Spektren gleich. Über der Graphik ist zusätzlich die relative Geschwindigkeit zur Erde aufgetragen. Diese wurde aus der relativistischen Dopplerverschiebung bei der jeweiligen Frequenzverschiebung bezüglich der Zentralfrequenz bei 1420.4 MHz berechnet. Die ändernde Rot- und Blauverschiebung der Spektren ist trotz der nahen Positionslage der zugehörigen Bildpunkte deutlich erkennbar.

Zum Vergleich sind in Abb. 6 Beispiele von Spektren der HI-Spektrallinie aus der professionellen Radioastronomie abgebildet. Hier wurde die Frequenzskala direkt durch die relative Geschwindigkeitsskala bezüglich der Erde ersetzt. Die vier abgebildeten Spektren stammen von Bildpunkten, welche um einiges näher beieinander liegen als jene in Abb. 5 (weniger als 5°). Auch da sind bereits deutliche Unterschiede in der Form zu erkennen. Die Ähnlichkeit der Charakteristik zu den eigenen Daten aus dem vorliegenden Projekt lässt darauf schließen, dass sehr wahrscheinlich tatsächlich HI-Signale detektiert wurden. Die Signalqualität der ausgewerteten Daten ist erstaunlich gut, das Signal ist deutlich vom Rauschhintergrund zu unterscheiden.

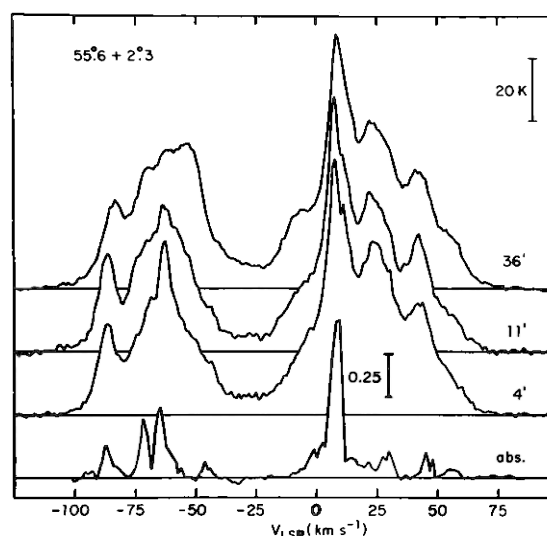


Abb. 6: HI-Spektren aus der professionellen Forschung als Vergleich. Die Frequenzskala wurde bei dieser Darstellung direkt in Relativgeschwindigkeiten umgerechnet [2].

4.2. Kartierung des HI-Signals

Mit der überraschend guten Qualität der Daten liessen sich aussagekräftige Kartierungen erstellen. Dazu wurde das Signal jedes Bildpunktes über einen wählbaren spektralen Bereich aufsummiert und als Pixelgraphik dargestellt. Wie zu erwarten ist, ergab die Kartierung des gesamten Signals die deutlichsten Resultate. Hierfür wurde jeweils das Signal über das ganze Spektrum aufintegriert. Damit sich die eigenen Daten gut mit Datensätzen aus der Literatur vergleichen lassen, wurde die Darstellung entsprechend gewählt. Die Kartierung der Messungen aus dem vorliegenden Projekt sind in Abb. 7 dargestellt. Es wurden galaktische Koordinaten in der Mollweide-Darstellung verwendet. Hierbei liegt der Äquator des Diagramms (0° -Breitengrad) in der Ebene der Milchstrassengalaxie. Das Zentrum der Abbildung zeigt in Richtung des Zentrums der Milchstrasse. Die gefundene Intensitätsverteilung zeigt in der Ebene der Milchstrasse ein Maximum. In diesen Richtungen gibt es erwartungsgemäss verhältnismässig viele und ausgedehnte Quellen, welche ausserdem relativ nah liegen. Dadurch ist mit einer hohen Signalintensität zu rechnen.

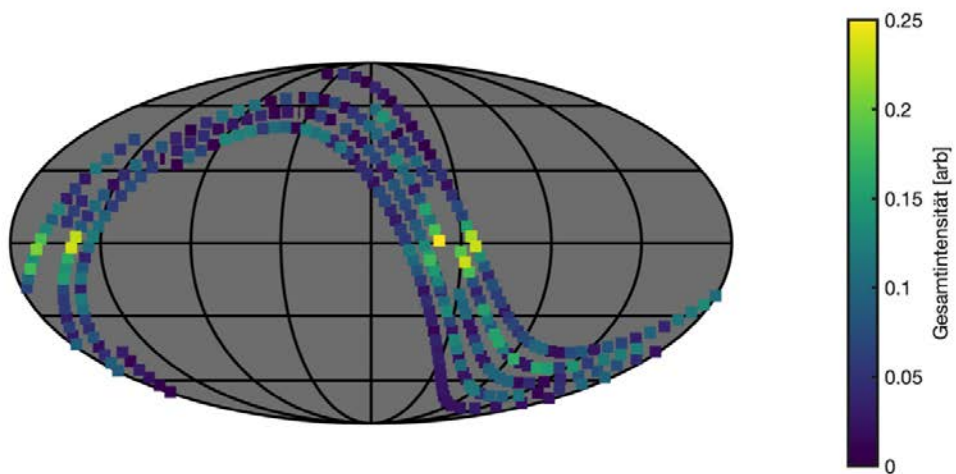


Abb. 7: Kartierung des spektral aufsummierten HI-Signals. Für die Darstellung wurden galaktische Koordinaten in der Mollweide-Darstellung verwendet. Wie zu erwarten ist, gibt es aus der Richtung der Ebene der Milchstrassengalaxie (Äquator) eine besonders hohe Signalintensität.

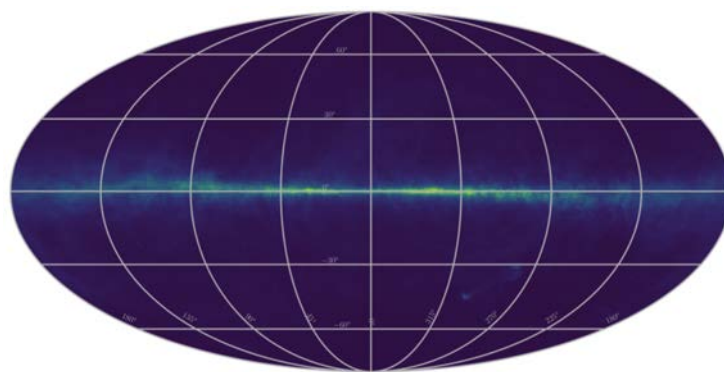


Abb. 8: Kartierung der HI-Intensitätsverteilung aus der HI4PI-Untersuchung [3]. Die Daten sind bezüglich den galaktischen Koordinaten in der Mollweide-Projektion dargestellt. Die Farbskala entspricht relativ jener aus Abb. 7.

Zum Vergleich sind in Abb. 8 Daten aus der HI4PI-Untersuchung (HI-Signal über den 4π -Raumwinkel) dargestellt [3]. Die Farbskala entspricht qualitativ jener in Abb. 7. Die Übereinstimmung zwischen den Literaturdaten und der eigenen Kartierung ist erfreulich. Bei beiden Datensätzen ist die Signalintensität auf die Äquatorebene der Milchstrasse konzentriert. Der Streifen hoher Intensität fällt im eigenen Datensatz eher breiter aus. Dies ist auf die schlechtere räumliche Auflösung der verwendeten Antenne zurückzuführen. Weiterführende Untersuchungen der Kartierung von Teilen der Spektren, z. B. nur der rot- oder blau-

verschobenen Anteile, wurden für diesen Bericht weggelassen. Eine Interpretation ist aufgrund des (noch) unvollständigen Datensatzes über den ganzen Himmel schwierig.

5. Diskussion und Dank

Die Messdaten aus der ersten Auflage des vorliegenden Projekts sind überraschend gut. Nicht nur konnte das Radioteleskop zur Detektion des HI-Signals erfolgreich in Betrieb genommen werden, die erhobenen Daten zeigen sogar bereits interessante Aspekte und eine gute Übereinstimmung mit den Literaturdaten. Neben der Messung konnte ein mehrheitlich automatisierter Auswertungsprozess erarbeitet werden, welcher für die zukünftige Weiterführung des Projektes sehr hilfreich sein wird. Für eine bessere Aussage sollte der Datensatz für die Kartierung des HI-Signals vervollständigt bzw. wenigstens grosszügig erweitert werden. Technisch sollte die Empfangseinheit genauer auf Umwelteinflüsse, insbesondere Temperaturschwankungen, untersucht werden. Ideal wäre, wenn zukünftig nicht mehr nur relative, sondern absolute Signalintensitäten gemessen werden könnten. Ob dazu eher der Weg über eine gute Charakterisierung der Empfangseinheit gewählt werden soll oder eher jener über eine in-situ Kalibriermöglichkeit, muss vorgängig abgeklärt werden. Als Fernziel wäre eventuell eine bessere räumliche Auflösung interessant. Möglicherweise liesse sich die in diesem Projekt verwendete Antenne zu einem Interferometer erweitern.

Für die geduldige Einführung in die Bedienung der SDR-Empfangseinheit möchten wir uns bei Daniel Erni bestens bedanken. Ein grosser Dank gilt ausserdem Christian Monstein, er lieferte vor einigen Jahren die Idee für dieses Projekt, indem er auf die Verfügbarkeit entsprechender Messmodule aufmerksam machte.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Tran A., «Radiospektroskopie bei der H1-Wellenlänge», Maturaarbeit Kantonsschule Wattwil Fachbereich Physik, Wattwil (2022).
- [2] Dickey J. M. und Lockman F. J., «HI in the galaxy», *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **28**, 215–261 (1990).
- [3] Bekhti N. B. et al., «HI4PI: a full-sky HI survey based on EBHIS and GASS», *Astronomy & Astrophysics*, **594**, A116 (2016).