

**Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science**

**PROPOSAL-Simulationsstudien zur
Myographie in stillgelegten
Bergbaustollen**

Martin Schönfeld
geboren in Neustadt a.d.Aisch

2022

Lehrstuhl für Experimentelle Physik V
Fakultät Physik
Technische Universität Dortmund

Erstgutachter: Prof. Dr. Dr. Wolfgang Rhode
Zweitgutachter: Prof. Dr. Kevin Kröninger
Abgabedatum: 19. Mai 2022

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlage	3
2.1 Atmosphärische Myonen	3
2.2 Myographie	6
3 Verwendete Myonen Simulationssoftware	9
3.1 Myonen Erzeugung mit EcoMug	9
3.2 Lepton Propagation mit PROPOSAL	9
4 Simulation eines Detektors unter verschiedenen Wassertiefen	12
4.1 Bodenmodell	12
4.2 Myonenfluss	15
4.3 Simulation der Myonen mit PROPOSAL	17
4.4 Ergebnisse	18
5 Zusammenfassung und Ausblick	21
A Anhang	22
A.1 verwendete Programme	22
A.2 Schichtverzeichnis	22
A.3 Konfiguration von EcoMug	24
A.4 Konfiguration von PROPOSAL	25
Literatur	27

1 Einleitung

Das Ruhrgebiet ist aus historischer Sicht für den Bergbau bekannt. Heutzutage gibt es im Ruhrgebiet allerdings keinen aktiven Braun- oder Steinkohleabbau mehr¹.

Beim Bau und während der Benutzung musste rund um die Uhr mit Pumpen dafür gesorgt werden, dass die Stollen nicht überfluten. Jene Bodenschichten besitzen von Natur aus ein gewisses Hohlraumvolumen, welches naturgemäß mit Wasser gefüllt ist.

Trotz sukzessiver Stilllegung der Bergwerke in den letzten Jahrzehnten muss allerdings weiterhin der Wasserstand der Stollen mit Pumpen unter Kontrolle gehalten werden. Dies geschieht aus zwei Gründen:

Zum einen ist durch den massiven Bergbau im Ruhrgebiet im Laufe des letzten Jahrhunderts das Ruhrgebiet allmählich abgesackt und unter den Grundwasserspiegel gesunken. Ein Vernachlässigen der Wasserstände hätte zur Konsequenz, dass ganze Städte überflutet würden (siehe Abb. 1.1). Zum anderen sind Verschmutzungen des Grubenwassers ² ³. Es soll verhindert werden, dass das Grubenwasser unser Grundwasser und somit teilweise auch das Trinkwasser verschmutzt.

Die Forschungsfrage dieser Arbeit ist es herauszufinden, inwiefern mithilfe der Myographie der Wasserstand in einem stillgelegten Bergbaustollen gemessen werden kann.

Es wird die Zählrate eines Detektors am Boden einer Bohrung simuliert. Aus den Informationen der Bohrung wird als Fundament für die Simulation ein Bodenmodell erstellt. Es werden verschiedene Wasserhöhen aus den für den Bergbau drainierten Bodenschichten modelliert. Es wird untersucht, wie sensitiv die Zählrate des Detektors auf veränderliche Wasserstände ist.

Der Myonenfluss wird mit EcoMug bestimmt und die Myonen mit PROPOSAL simuliert.

¹Das letzte Steinkohlebergwerk Prosper-Haniel Bottrop schloss am. 21. Dezember 2018.

²Verschmutzungen Steinkohlenbergwerke z.B.: Nickelsulfat, Eisenoxide und Mangan.[1]

³Verschmutzungen Braunkohlenbergwerke z.B.: Kalzium, Eisenmonoxid, Zink, Magnesium, Natrium, Ammonium und Mangan [1]

1 Einleitung

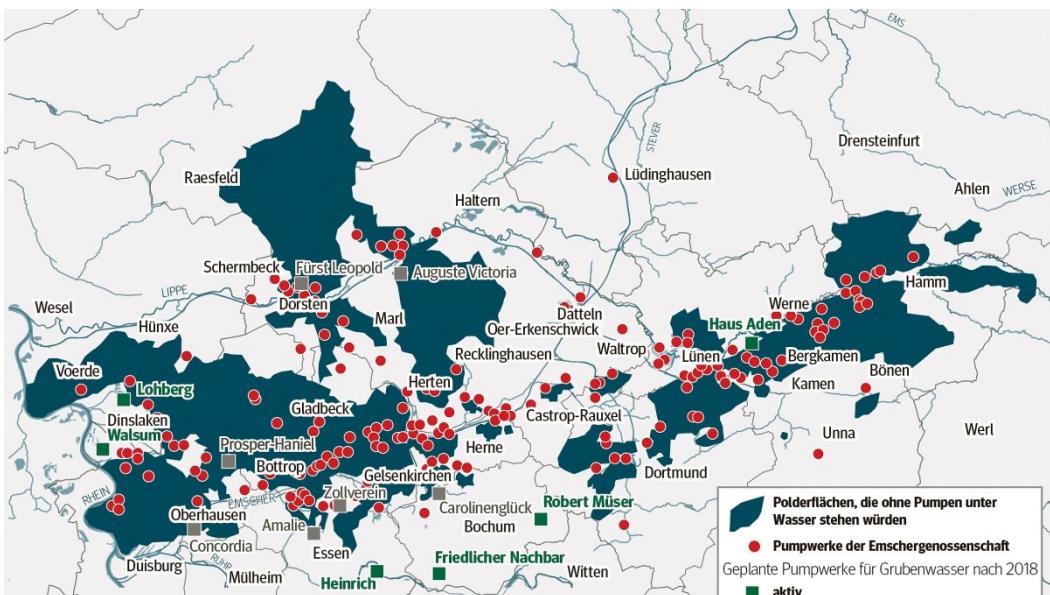


Abbildung 1.1: In Dunkelblau die Regionen im Ruhrgebiet, welche aufgrund der Absenkungen unter Wasser stehen würden, wenn nicht ständig gepumpt werden würde. 2019 betrugen sich die Kosten für die Pumpwerke auf 220 Millionen Euro[11]

2 Theoretische Grundlage

Dieser Abschnitt behandelt die theoretischen Grundlagen der Myographie. Als Erstes werden atmosphärische Myonen vorgestellt, auf deren Absorption die Myographie basiert.

2.1 Atmosphärische Myonen

Myonen sind geladene Leptonen mit einer Ruhemasse von $m_0 \approx 106 \text{ MeV}$ [10] und werden in der Atmosphäre aus der geladenen kosmischen Strahlung erzeugt (deshalb auch kosmische Myonen genannt). Die kosmische Strahlung besteht im Allgemeinen aus hochenergetischen Teilchen, welche von der Sonne, der Milchstraße oder fernen Galaxien kommt. Die kosmische Strahlung ist beschreibbar über das Potenzgesetz

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\gamma}.$$

N steht für die Anzahl an Teilchen und E für die Energie. γ ist der sog. *spektrale Index*. Für $E \leq 10^{15,5} \text{ eV}$ gilt $\gamma = 2,7$ [9].

Die geladene kosmische Strahlung wechselwirkt mit den Stickstoff-, Sauerstoff- und Argonatomen in der Erdatmosphäre und erzeugt Luftschauder bestehend aus Hadronen, einem elektromagnetischen Teil, sowie Myonen.

Zur Produktion der Myonen wird zwischen den konventionellen und prompten Myonen unterschieden [9]. Konventionelle Myonen entstehen aus Zerfällen von Pionen und Kaonen:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, & K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu, & K^- &\rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu.\end{aligned}$$

Da π und K Mesonen eine verhältnismäßig lange Lebensdauer haben mit $\tau_{\pi^\pm} = (2,6033 \pm 0,0005) \cdot 10^{-8} \text{ s}$ und $\tau_{K^\pm} = (1,2380 \pm 0,0020) \cdot 10^{-8} \text{ s}$ und somit vor ihrem Zerfall mit der Atmosphäre wechselwirken und Energie verlieren, besitzt das Energiespektrum jener Myonen den Spektralindex $\gamma = 3,7$ [9].

2 Theoretische Grundlage

Prompte Myonen entstehen aus dem Zerfall von schwereren, meist charmhaltigen Hadronen wie z.B.:

$$D^0 \rightarrow K^- + \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$A_c^+ \rightarrow p + \mu^+ + \mu^-.$$

Da die Lebensdauer jener Hadronen jedoch sehr kurz ist, $\tau_{D^0} = (410,1 \pm 1,5) \cdot 10^{-15}$ s und $\tau_{A_c^+} = (202,4 \pm 3,1) \cdot 10^{-15}$ s, zerfallen sie fast instantan, sodass sie ihre gesamte Ursprungsenergie an die entstehenden Teilchen weitertragen können. Daher erben prompte Myonen den Spektralindex $\gamma = 2,7$ der geladenen kosmischen Strahlung.

Abb. 2.1 zeigt, dass für $E_\mu < 10^4$ GeV > 99% konventionelle Myonen sind. Prompten Myonen werden erst für $E_\mu > 10^5$ GeV relevant und dominant ab $E_\mu > 2 \cdot 10^6$ GeV

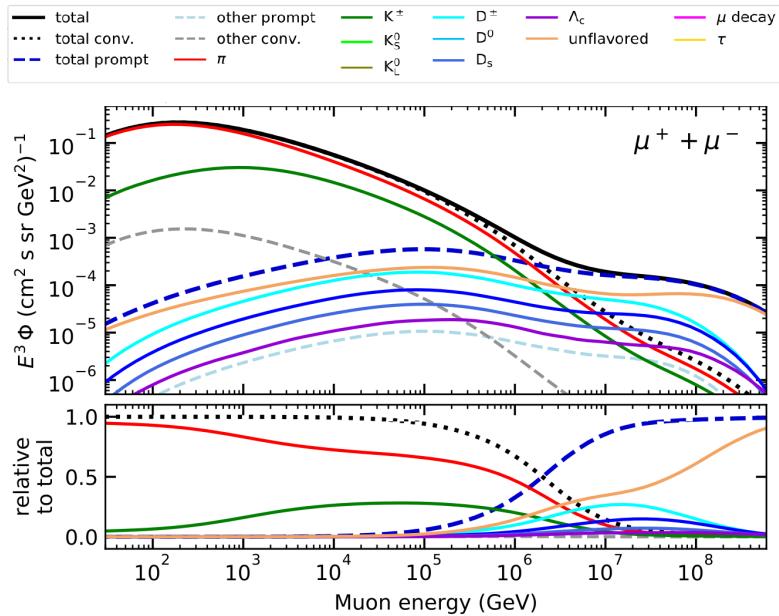


Abbildung 2.1: Energiefluss atmosphärischer Myonen aufgeteilt nach den erzeugenden Hadronen, sowie deren relativen Beiträge, simuliert mit MCEq [8]

Auf Meereshöhe liegt die Flussdichte von Myonen typischerweise bei ca. $1 \frac{\text{Myon}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$. [10] [18]

Da die Dichte des Erdreichs wesentlich höher ist als die der Atmosphäre, nimmt die Myonenrate mit steigender Tiefe rapide ab, wie in Abb. 2.2 zu sehen ist.

Die Reichweite kosmischer Myonen ist in Abb. 2.3 zu sehen.

2.1 Atmosphärische Myonen

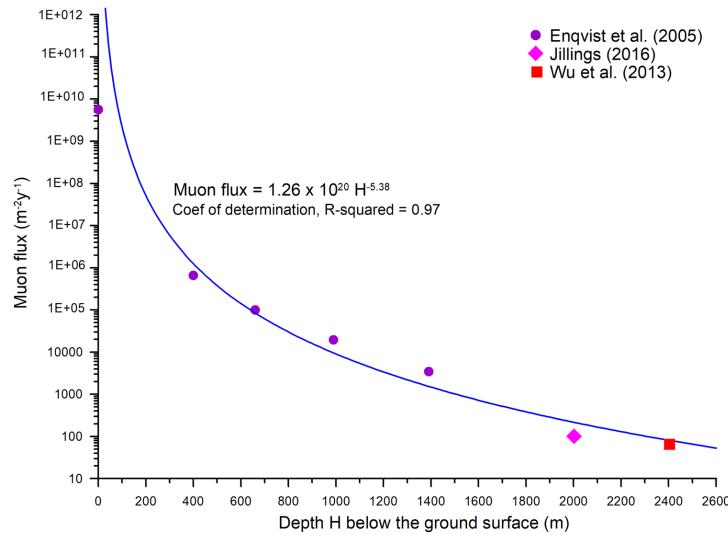


Abbildung 2.2: Myonen Fluss gegen Tiefe unterhalb der Erdoberfläche. Mehrfarbig sind in verschiedenen Tiefen Messungen des Myonenflusses eingetragen. [20]

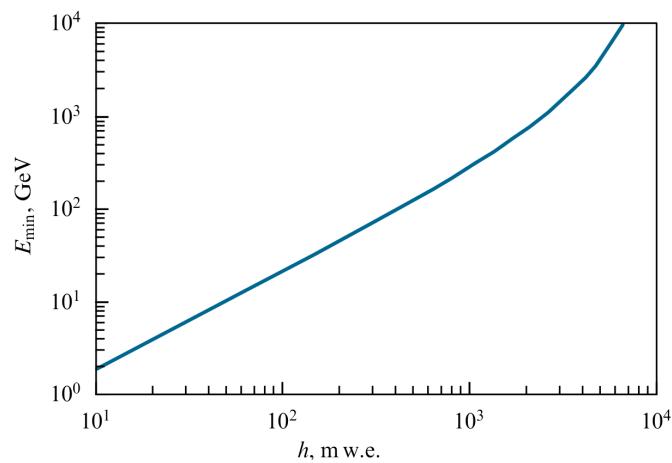


Abbildung 2.3: Die Reichweite von Myonen in *mwe* [4]

2.2 Myographie

Die Myographie ist wie die Röntgentomografie, ein bildgebendes Verfahren. Sie verwendet statt künstlich erzeugter Röntgenstrahlung bereits natürlich vorhandene kosmische Myonen. Da Myonen einen wesentlich geringeren Wirkungsquerschnitt als Röntgen-Photonen haben und teils sehr hohe Energien besitzen, haben sie eine wesentlich höhere Reichweite als Röntgen-Photonen. Das ermöglicht der Myographie je nach angepeilter Präzision, Größe des Detektors und vorhandener Messzeit eine Reichweite von mehreren Kilometern und ist daher für weitläufige Untersuchungen größerer Strukturen oder des Erdrechts geeignet. Es wurde z.B. zur Entdeckung noch unbekannter Kammern in der Cheops-Pyramide verwendet[12] oder zur Untersuchung des inneren eines Vulkans[19].

Der Energieverlust und die Ablenkung der Myonen hängt von dem Bodenmaterial ab, durch das es propagiert. Die Stärke des Energieverlusts ist proportional zur Dichte des Mediums für Energiebereiche der Myographie¹. Die Stärke der Ablenkung ist bei der Coulomb-Streuung zusätzlich zur Kernladungszahl Z des Mediums proportional. Im Rahmen der Energiebereiche und Distanzen der Myographie liegt die mittlere Ablenkung bei $\sim 1,5^\circ$ [4].

Da die Menge der atmosphärischen Myonen mit der Tiefe abnimmt, steigt benötigte Messzeit für präzise Messungen. Die Messzeit lässt sich allerdings verkürzen durch Vergrößerung des Detektor Volumens

Genauso wie die Röntgentomografie einen Röntgenschirm braucht, der die Röntgenstrahlen "detektiert", verwendet die Myographie einen Teilchendetektor für Myonen. Die einfachste Form eines Detektors für die Myographie zählt die Anzahl der Myonen die den Detektor pro Zeiteinheit durchqueren. In Kombination mit der Messzeit lässt sich dann eine Rate angeben, wie viele Myonen pro Zeiteinheit durch den Detektor detektiert werden.

Detection eines Untergrundschachts mithilfe der Myographie

Zur Veranschaulichung der Myographie wird im Folgenden ein Beispiel im Detail erklärt. In [4] wird das FIAN-SINP MSU Experiment beschrieben. Ein Photo-Emulsions-Detektor hat über eine Messzeit von 4 Monaten Myonenrichtungsabhängig gezählt. Dieser wurde in einem Raum 30 m unterhalb der Erdoberfläche installiert. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2.4 zu sehen.

Ziel des Versuchs war es herauszufinden, ob der Aufzugsschacht in der Messung sichtbar ist. Parallel wurde eine Simulation der Messung zum Vergleich erstellt. In Abb. 2.5 sind die Ergebnisse zu sehen. Der rote Kasten zeigt die Richtung

¹Unter Vernachlässigung des LPM-Effektes bei hohen Energien.

des Aufzugsschachts. Der rote Bereich innerhalb des Kastens bedeutet eine hohe Intensität an Myonen aus dieser Richtung. Da in dem Schacht lediglich Luft ist, verlieren die Myonen beim Propagieren durch die Luft wesentlich weniger Energie als im Erdreich, daher wurden aus dieser Richtung besonders viele Myonen detektiert.

Zusammenfassend konnte also erfolgreich mithilfe eines Photo-Emulsions-Detektors ein Untergrundschacht entdeckt bzw. gemessen werden.

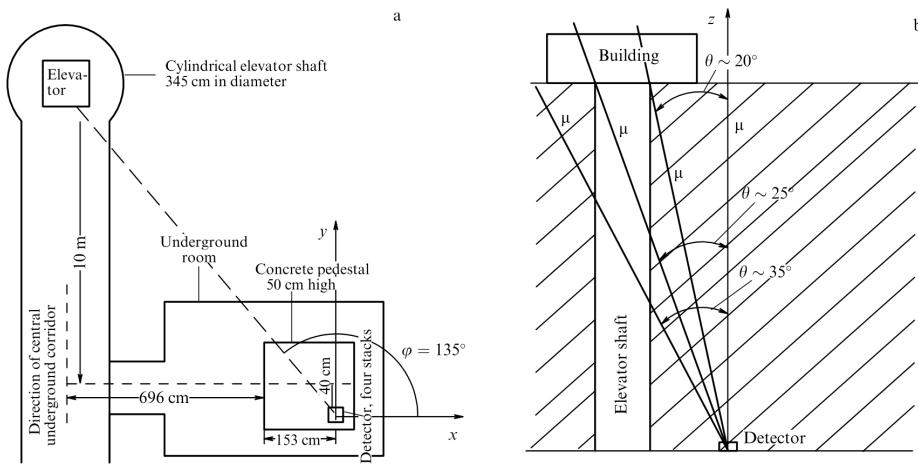


Abbildung 2.4: Horizontale (a) und vertikale (b) Sicht auf das FIAN-SINP MSU Experiment [4]. Der Detektor hat in einer Tiefe von 30 m über einen Zeitraum von 4 Monaten Myonen richtungsabhängig gemessen. Ziel war es, den Aufzugsschacht auflösen zu können. Die Anordnung der Koordinatenachsen ist im Detektorsystem angegeben.

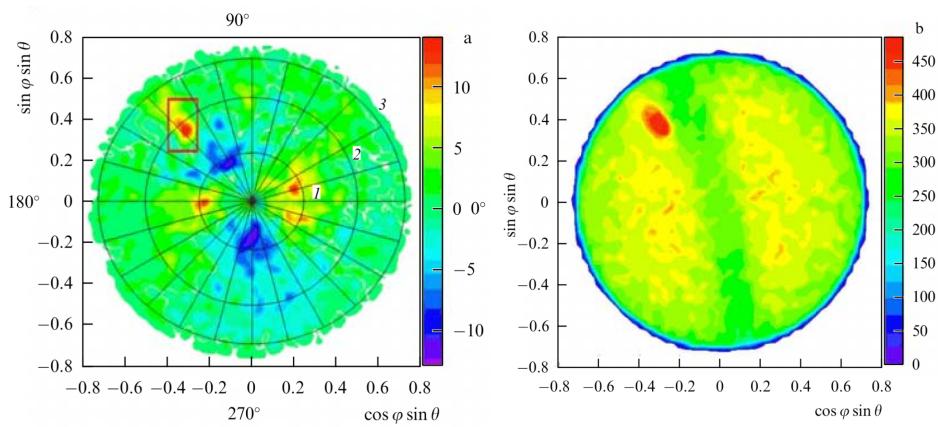


Abbildung 2.5: (a) Zweidimensionale SpurendichteVerteilung der Myonen 30 m unter der Erde. Das rote Rechteck markiert den Blickwinkel in Richtung des Aufzugschachts. Die Kreise nummeriert mit 1, 2 und 3, markieren jeweils die Zenitwinkel $\theta = 15^\circ$, 30° und 45° (b) Simulierte Verteilung aus der Simulation. Der deutlich zu erkennende rote Fleck repräsentiert einen hohen Myonenfluss aus der Richtung des Aufzugsschachts. Die Verteilungen der Spurendichte sind in Form der Variablen $\sin \phi \sin \theta$ und $\cos \phi \sin \theta$ dargestellt. Sie repräsentieren den Einfallsinkel der detektierten Myonen gegenüber der Senkrechten zur Detektorebene. [4]

3 Verwendete Myonen Simulationssoftware

Dieser Abschnitt führt die Myonen Simulationssoftwares, EcoMug und PROPOSAL ein.

3.1 Myonen Erzeugung mit EcoMug

EcoMug¹ ist ein C++-Programm zur Generierung einzelner Myonen [15] anhand einer Parametrisierung des differentiellen Myonenflusses.

Es lässt sich neben dem standardmäßig implementierten Myonenfluss auch ein eigener definieren. Außerdem bietet EcoMug die Möglichkeit, Myonen aus verschiedenen Oberflächen (Ebene, Zylinder und Halbkugel) mit physikalisch korrekter Winkel- und Impulsverteilung zu erzeugen. Zu guter Letzt ist EcoMug mit besonderem Merkmal auf Schnelligkeit entwickelt worden.

3.2 Lepton Propagation mit PROPOSAL

PROPOSAL² ist ein in C++ geschriebenes Simulationsprogramm und steht für **P**ropagator with **O**ptimal **P**recision and **O**ptimized **S**peed for **A**ll **L**eptons. [14, 3, 7] Über den Monte-Carlo-Algorithmus lassen sich Leptonen wie Elektronen, Myonen und Taus durch verschiedene Medien propagieren. PROPOSAL kann den Energieverlust, Ablenkung sowie Zerfall der Teilchen simulieren.

PROPOSAL wird hauptsächlich an der TU Dortmund weiterentwickelt sowie als OpenSource Projekt auf GitHub. Es ist unter anderem ein Bestandteil der Simulationskette des Neutrino-Detektors IceCube [2]. Im Vergleich dazu sei auch das Simulationsprogramm GEANT4 erwähnt, welches speziell für die Simulation von Teilchen innerhalb eines Detektors konzipiert ist. PROPOSAL ist dahingehend optimiert, über längere Strecken ($> 1 \text{ km}$) Teilchen zu propagieren, daher ist es auch für die Anwendung in der Myographie gut geeignet.

¹<https://github.com/dr4kan/EcoMug>

²<https://github.com/tudo-astroparticlephysics/PROPOSAL>

3.2.1 Funktionsweise von PROPOSAL

In PROPOSAL sind für die Propagation von Myonen die Wirkungsquerschnitte für Ionisation, Bremsstrahlung, Paarproduktion und Photonukleare Wechselwirkung implementiert. Außerdem wird der Zerfall anhand der Lebensdauer simuliert. [14] In Abb. 3.1 ist der mittlere Energieverlust der verschiedenen Wechselwirkungen dargestellt.

Die meisten³ physikalischen Wechselwirkungen sind stochastisch, das heißt Teilchen verlieren in diskreten Interaktionen Energie bzw. werden abgelenkt. Die Anzahl an Bremsstrahlungswechselwirkungen divergiert allerdings für immer kleinere Energien gegen unendlich, was bedeutet würde, dass unendlich viele Interaktionen berechnet werden müssten. Aufgrund dieses Problems und um die Präzision zugunsten der Laufzeit steuern zu können, gibt es einen frei wählbaren Energieschnitt (Energy-Cut).

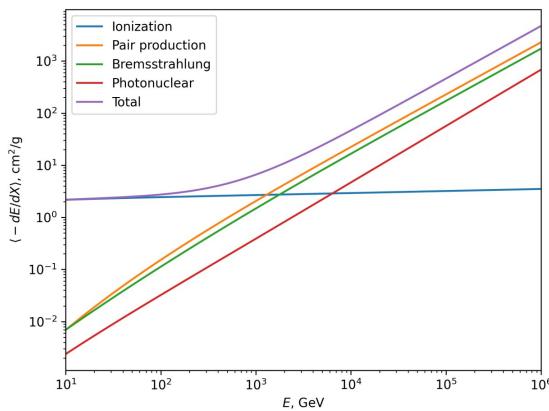


Abbildung 3.1: Der mittlere Energieverlust von Myonen in Standardgestein.
Mit PROPOSAL simuliert.

Der Energy-Cut ist als absoluter E_{cut} bzw. relativer v_{cut} konfigurierbar. Unterhalb des Energieschnitts werden die Interaktionen statt stochastisch zufällig gezogen zu werden, kontinuierlich berechnet. Das bedeutet, dass ein durchschnittliches $\frac{dE}{dx}$ für die kontinuierlichen Energieverluste berechnet wird. Dadurch werden die sonst unendlichen Interaktionen der Bremsstrahlung endlich und so simulierbar. Es lässt sich optional die sog. kontinuierliche Randomisierung aktivieren, welche die kontinuierlichen Berechnung über eine Gauß-Verteilung stochastisch verschmiert.

³Nicht stochastisch bspw.: die Dichtekorrektur bei der Ionisation. Sie ist ein rein kontinuierlicher Prozess

3.2 Lepton Propagation mit PROPOSAL

PROPOSAL wird die Energie, Position, Richtung und Art des zu propagierenden Teilchens sowie Sektoren für die Propagation übergeben. Diese Sektoren werden über eine Liste an implementierten Medien und selbst konfigurierbaren Dichte-Verteilungen definiert. Pro Sektor lässt sich ein individueller Energy-Cut setzen. Es sind verschiedene Medien wie z. B. Standardgestein oder Wasser implementiert. Zudem kann bestimmt werden, wann die Propagation gestoppt werden soll: Bis zu einer Energie, nach einer bestimmten Strecke oder nach Verlassen eines Sektors. Zudem muss ein E_{cut} bzw. v_{cut} gesetzt werden. Als Ausgabe übergibt PROPOSAL dem Nutzer ein Objekt *track*, welches Informationen über die Propagation des Teilchens innehält. Es sind unter anderem Endposition, Endenergie und propagierte Strecke abrufbar.

Genauere Informationen über die Funktionsweise von PROPOSAL lassen sich aus den Veröffentlichungen [14], [3] und [7] nachlesen.

4 Simulation eines Detektors unter verschiedenen Wassertiefen

Aufgrund der Bergbauvergangenheit sind im Ruhrgebiet viele Bohrungen gemacht worden. In einige der Bohrungen ist ein Metallrohr mit einem Durchmesser von 10 m eingelassen. Um den Wasserstand der trocken gelegten Schichten zu überwachen ist die Idee dieser Arbeit in eines dieser Rohre einen zylinderförmigen Detektor herunterzulassen und zu ermitteln welche Detektorraten erwartet werden.

Um zu ermitteln in welchen Rahmen der Wasserstand dieser Schichten messbar ist, wird für den zylinderförmigen Detektor eine Grundfläche von 75 cm^2 angenommen. Er soll sich auf dem Boden der Bohrung befinden. Es wird anhand des Schichtverzeichnisses der Bohrung ein Bodenmodell erstellt, welches die unterschiedlichen Bodenzusammensetzungen über Variationen der *Standardrock*-Dichte. Dieses ist die Basis für die Propagation mit PROPOSAL. Kosmische Myonen werden mithilfe einer Parametrisierung des Myonenflusses auf Meereshöhe mit EcoMug erzeugt.

4.1 Bodenmodell

4.1.1 Beschreibung der Bohrung

Als Basis für das Bodenmodell dient eine Bohrung in der Kirchheller Heide¹, welches freundlicherweise von Prof. Dr. Ing. Tobias Rudolph² zur Verfügung gestellt wurde. In Abb. 4.1 ist ein Ausschnitt des Schichtverzeichnis der Bohrung zu sehen. Das vollständige Schichtverzeichnis befindet sich im Anhang A.1

Die Schichten von 1259 bis 419,5 m (siehe Abb. 4.1) wurden aufgrund des Bergbaus in der Region trocken gelegt und während der Benutzung trocken gehalten (im folgenden *Wasser-Schichten genannt*). Jene Schichten haben ein sog. Hohlraumvolumen von ca. 5 bis 15 % welche naturgemäß mit Wasser gefüllt sind. Das Hohlraumvolumen entspricht im Allgemeinen dem das, was von Kristallen in einer dichtesten

¹boreholemap.bgr.de/mapapps/resources/apps/boreholemap/ Standort: (351221,19 5719599,6)
ID: DABO_65808 nahe dem Schwarze Heide Airport

²Technische Hochschule Georg Agricola - Forschungszentrum Nachbergbau

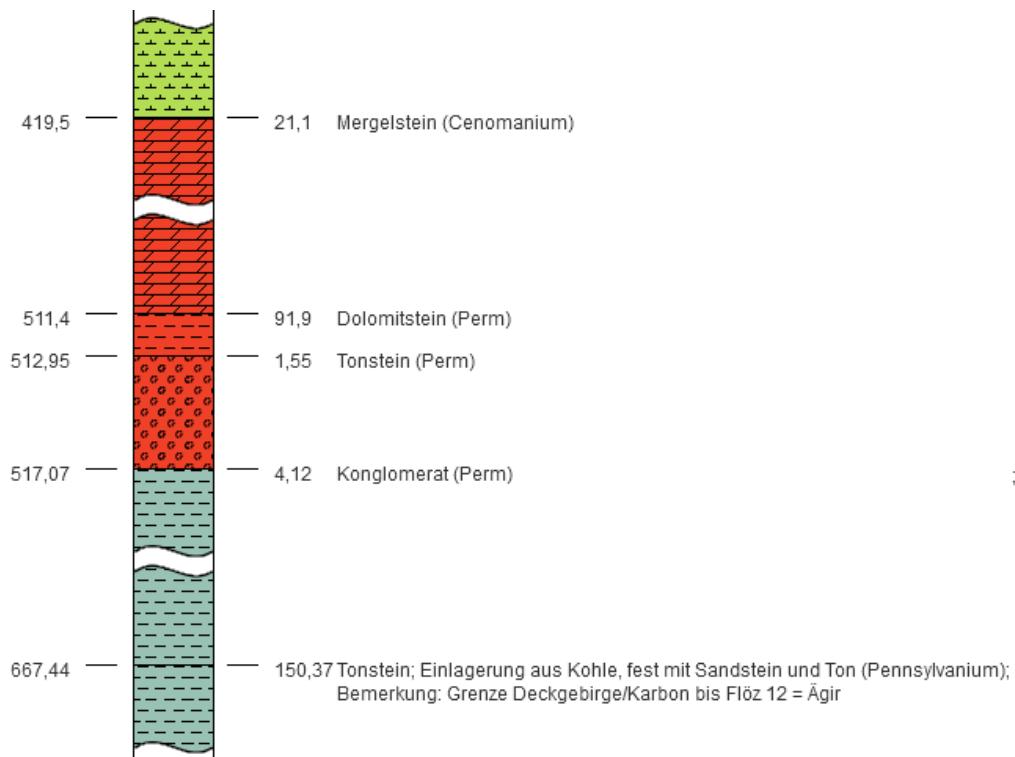


Abbildung 4.1: Ein Auszug aus einer Bohrung in der Kirchheller Heide Die Tiefe in Metern (links) ist als das untere Ende der Schicht gemeint, d.h. die Dolomit-Schicht geht von 419,5 bis 511 Metern. Die rechte Zahl ist die Höhe der Schicht in Metern. Hinter der Bodenart ist die jeweilige erdgeschichtliche Epoche in Klammern. Das vollständige Verzeichnis ist im Anhang A.2 zu sehen.

Kugelpackung erwartet wird. Zusätzlich zu dem Hohlraumvolumen müssen Risse berücksichtigt werden, welche zusätzlich 5 bis 10 % an Volumen ausmachen können und sich ebenfalls mit Wasser füllen können.

Die Geschwindigkeit des Wasseranstiegs liegt in Größenordnungen von 10 cm pro Woche.

4.1.2 Umsetzung des Bodenmodells

Es wird nun ein Bodenmodell anhand der Bohrung erstellt.

Zunächst wird festgestellt, dass die einzelnen Schichten jeweils aus einer Zusammensetzung verschiedener Gesteinsarten bestehen. Da in PROPOSAL nicht die

Möglichkeit besteht beliebige Gesteine in ihrer chemischen Zusammensetzung zu modellieren, werden die Schichten mit dem Medium *Standardrock*³ genähert. Die Dichten werden entsprechend der echten Medien gesetzt. Als Dichte der Schichten wird der Mittelwert zwischen ρ_{\min} und ρ_{\max} der jeweiligen Gesteinsarten⁴ benutzt (siehe Tabelle 4.1) In Abb. 4.2 ist das Bodenmodell als Plot gegen die Tiefe abgebildet.

Tabelle 4.1: Benutzte Dichten der verschiedenen Gesteinsarten in [g/cm³]. KS steht für Kalkstein, TS für Tonstein.

Gesteinsart		ρ_{\min}	ρ_{\max}	ρ_{avg}
Sand		1,43	1,47	1,45
Tonmergelstein (20 % KS, 80 % TS)				1,87
Kalkmergelstein (70 % KS, 30 % TS)				2,045
Kalkstein		1,55	2,75	2,15
Mergelstein		1,2	3	2,1
Dolomitstein		2,4	2,9	2,65
Tonstein		1,3	2,3	1,8
Sandstein		2	2,8	2,4

Zur Modellierung der Wasser-Schichten, wird angenommen, dass die Dichte einer Wasser-Schicht, das Gestein mit einem Hohlraumvolumen von 10 % repräsentiert. Es wird also für Wasser-Schichten $\rho_{\text{Gestein}10\%} = \rho_{\text{avg}}$ angenommen. Im trockenem Zustand wird der Hohlraum mit einer Luftdichte von $\rho_{\text{Luft}} = 0 \text{ g/cm}^3$ genähert. Daraus folgt

$$\rho_{\text{Gestein}0\%} = \rho_{\text{Gestein}10\%}/0,9. \quad (4.1)$$

Mit $\rho_{\text{Gestein}0\%}$ als die Dichte des Gesteins ohne Hohlraumvolumen. Wenn ein Gestein mit Wasser vollläuft, wird die neue Dichte ρ_{nass} über

$$\rho_{\text{nass}} = 0,9 * \rho_{\text{Gestein}0\%} + 0,1 * \rho_{\text{Wasser}} \quad (4.2)$$

berechnet. Für die Dichte des Wasser ρ_{Wasser} wird $1,0 \text{ g/cm}^3$ [16] angenommen.

Für die Tonstein-Schichten bspw. mit $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$ steigt die Gesamtdichte mit Wasser auf $1,9 \text{ g/cm}^3$. Also eine effektive Erhöhung um ca. 5,5 %.

³Mit *Standardrock* ist ein Material mit $Z = 11$, $A = 22$ und einer Dichte von $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$ gemeint [6].

⁴Tonstein, Dolomitstein, Sandstein: [17], Kalkstein [5], Mergelstein [13], Sand hausjournal.net/dichte-sand

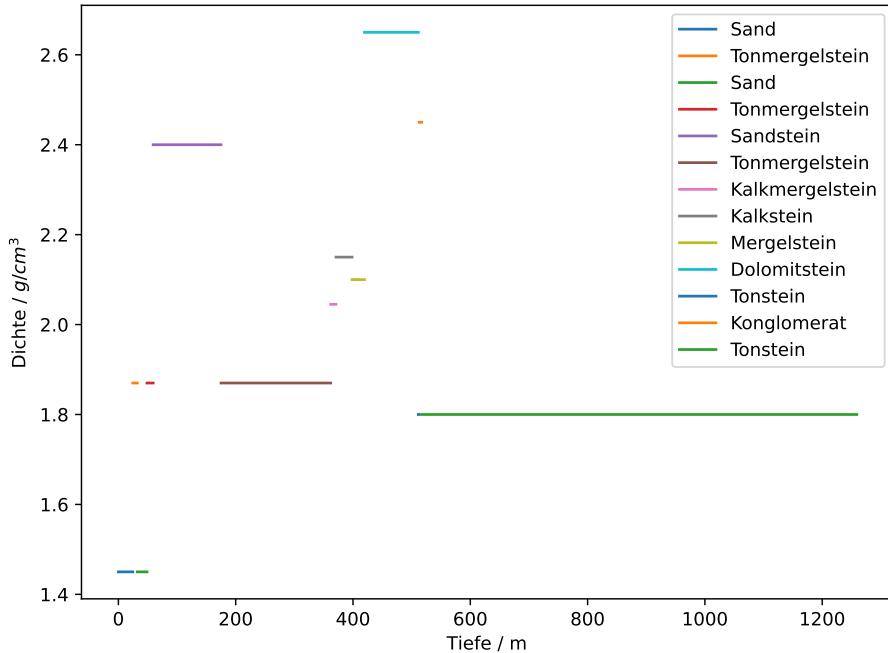


Abbildung 4.2: Das Bodenmodell nach Dichte und Tiefe aufgelöst. Der Tonstein in grün rechts, sowie die Dolomitschicht oben in hellblau, können mit Wasser volllaufen.

4.2 Myonenfluss

Zur Beschreibung des Myonenflusses auf der Erde wird die *Gaisser*-Parametrisierung [4] verwendet:

$$\frac{dN_\mu}{dE_\mu d\Omega} \approx \frac{0.14 E_\mu^{-2.7}}{\text{GeV cm}^2 \text{ s sr}} \left(\frac{1}{1 + 1.1 E_\mu \cos \theta / (115 \text{ GeV})} + \frac{0.054}{1 + 1.1 E_\mu \cos \theta / (850 \text{ GeV})} \right). \quad (4.3)$$

N_μ ist die Anzahl an Myonen, E_μ die Myonen Energie und Ω der Raumwinkel. Die Parametrisierung modelliert den Myonenfluss auf Meereshöhe.

Die zwei Terme in Klammern repräsentieren jeweils die Beiträge über Zerfälle von Pionen bzw. Kaonen, wie beschrieben in Kap. 2. Die Parametrisierung gilt unter

zwei Annahmen. Es wird die Krümmung der Erde vernachlässigt, welche den Zenit-Winkel einschränkt. Des Weiteren wird der Myon Zerfall vernachlässigt. Folgende Einschränkungen gelten:

$$\theta < 70^\circ \text{ und } E_\mu > \frac{100 \text{ GeV}}{\cos \theta}. \quad (4.4)$$

Zur Vereinfachung wird angenommen dass das Bohrloch auf Meereshöhe beginnt.

Zur Einhaltung dieser wird in EcoMug das Maximum für den Winkel θ auf 30° konfiguriert. Da die Myonen mehr als 600 GeV benötigen um den Detektor zu erreichen, ist die Zweite Bedingung auch erfüllt. Es wird für die Erzeugung der Myonen mit EcoMug der Energiebereich von 600 GeV bis 200 TeV gewählt. In Abb. 4.3 ist das verwendete Energiespektrum aus EcoMug zu sehen.

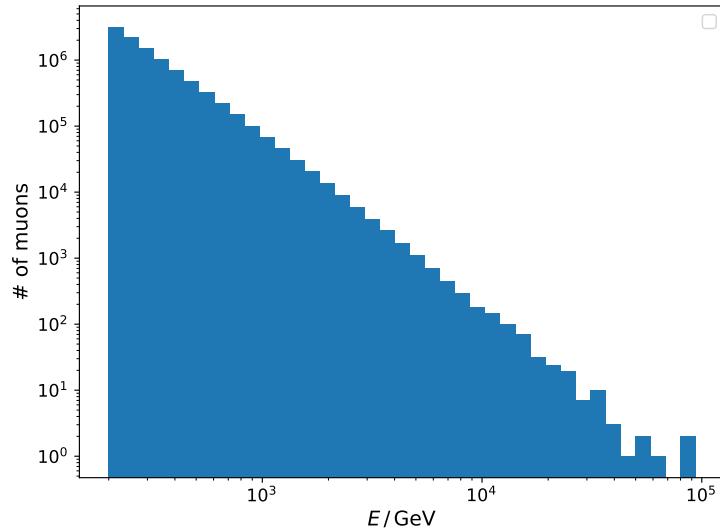


Abbildung 4.3: Das verwendete Energiespektrum, mit EcoMug erzeugt.

Zur Übertragung der Simulationsdaten auf die echte Welt, wird die Myonenfluss-Parametrisierung (4.3) über E in den Grenzen 600 GeV bis 200 TeV, sowie Ω von 0° bis 30° integriert. Bei einer angenommenen Detektorgrundfläche von 75 cm^2 ergibt sich eine Myonenrate von:

$$\Phi_0 = 1.0857 \frac{\text{Myonen}}{\text{Tag}}. \quad (4.5)$$

Zur Berechnung der Detektorrate in Abhängigkeit zur Tiefe wird gerechnet:

$$\Phi_h = \Phi_0 * a \quad (4.6)$$

4.3 Simulation der Myonen mit PROPOSAL

Φ_h als Detektorrate mit dem Wasserstand h und a als der Anteil der Myonen, die es zum Detektor geschafft haben.

Es wird angenommen, dass der Detektor jedes Myon, das ihn trifft, messen kann. Eine Detektion über die seitlichen Flächen des Detektors wird nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zur echten Welt wird keine langsam steigende Wasserhöhe simuliert, sondern die Messrate mehrerer statischen Wasserstände.

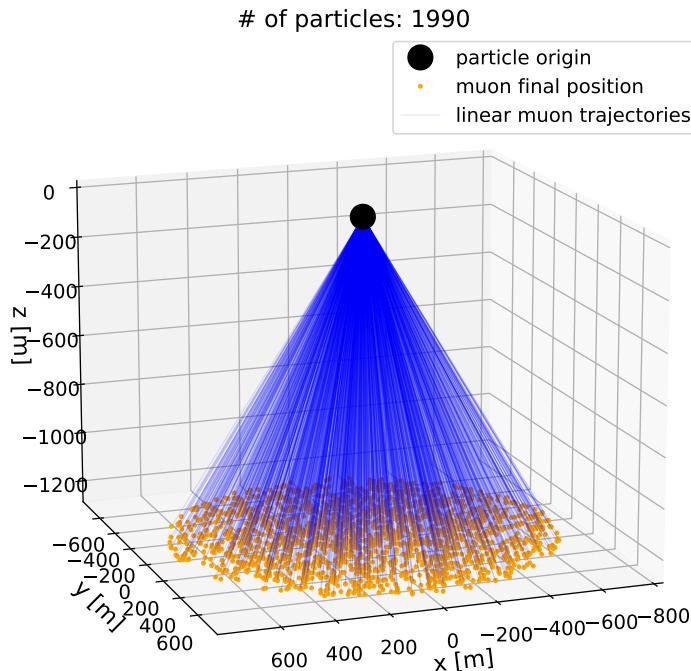


Abbildung 4.4: Veranschaulichung der Start und Endpunkte der Myonen die den Detektor erreicht haben. Die Punkte werden durch eine blaue gerade Linie verbunden. Alle Myonen werden bei 1259 m gestoppt.

4.3 Simulation der Myonen mit PROPOSAL

PROPOSAL propagiert die Teilchen, hat allerdings gegenüber der echten Welt Einschränkungen. Durch die Energieschnitte (siehe Kap. 3.2.1) wird ein Teil immer kontinuierlich genähert. Durch die Wahl eines kleinen v_{cut} ist dieser Effekt allerdings vernachlässigbar. Des Weiteren muss bezüglich der Messunsicherheit

PROPOSALs bedacht sein, dass sich PROPOSAL nicht in allen Energiebereichen und Szenarien vergleichen kann mit echten Daten, sondern dort sich mit ähnlichen Simulationsprogrammen vergleicht.

4.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Auf den Detektor umgerechneten Detektorzählraten sind in 4.6 dargestellt. In Abb. 4.5 ist das Energiespektrum der ursprünglichen Myonen dieser die am Detektor angekommen sind, sowie die Endenergien am Detektor.

Es ist ein klarer Zusammenhang zwischen Wassertiefe und Myonenanzahl bzw. Detektorrate erkennbar. Damit ist bestätigt, sich Wassertiefen in alten Berbauregionen mithilfe der Myographie messen lassen. Zwischen der höchsten (840 m) und niedrigsten (0 m) Wasserhöhe besteht in der Detektorrate ein Unterschied von

$$\Delta\Phi = 33,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Myonen}}{\text{Tag}} \quad \text{oder} \quad 13,06 \%. \quad (4.7)$$

Zwischen den extremsten Wasserschichten Schichten sinkt also die Rate um. Pro 100 m sind das im Mittel eine Reduktion von

$$4,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Myonen}}{\text{Tag}} \quad \text{oder} \quad 1,55 \% \quad (4.8)$$

Wird nun die wesentlich dichtere Dolomit Schicht zwischen 748 m und 840 m betrachtet wird im Kontrast zu der darunter liegenden Tonsteinschicht , keine signifikante Änderung der Abschwächungen der Raten beobachtet. Es ist außerdem festzustellen, dass die Dichten der Schichten wenig Einfluss haben auf die Änderung der Absorption bei fixen Hohlraumvolumen.

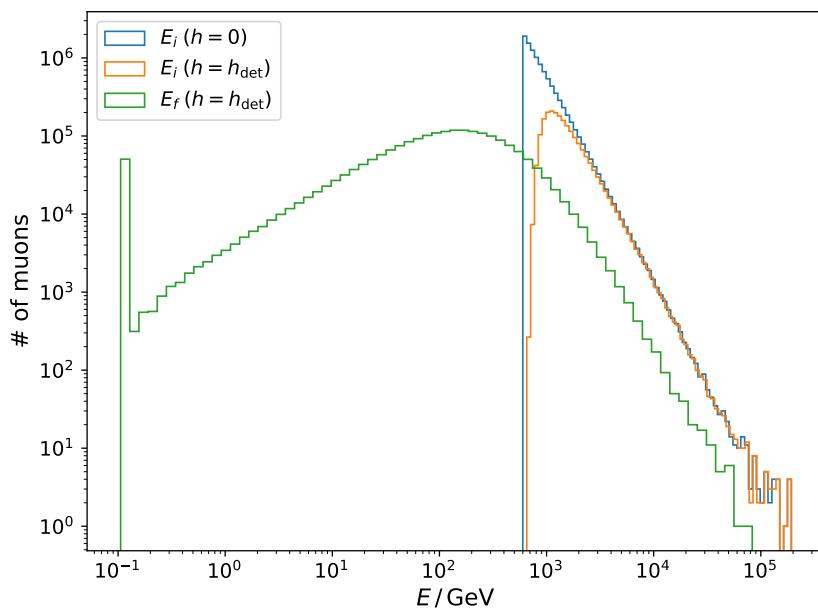


Abbildung 4.5: Das Energiespektrum für eine Wassertiefe von 800 m. In Blau die ursprünglichen Myonen auf der Erdoberfläche. In Orange diejenigen, die angekommen sind. In Grün die Endenergie der Myonen am Detektor.

Tabelle 4.2: Für verschiedene Wassertiefen, die Anzahl an detektierten Myonen sowie deren prozentuales Verhältnis N_d/N_0 zur Gesamtmenge an propagierten Myonen.

Wassertiefe / m	# Teilchen	% N_d/N_0
0	2 344 409	23,44
100	2 303 835	23,04
200	2 266 474	22,66
300	2 227 742	22,28
324	2 218 556	22,19
400	2 192 224	21,92
500	2 155 066	21,55
600	2 118 887	21,19
700	2 085 579	20,86
748	2 070 024	20,70
800	2 051 255	20,51
840	2 038 287	20,38

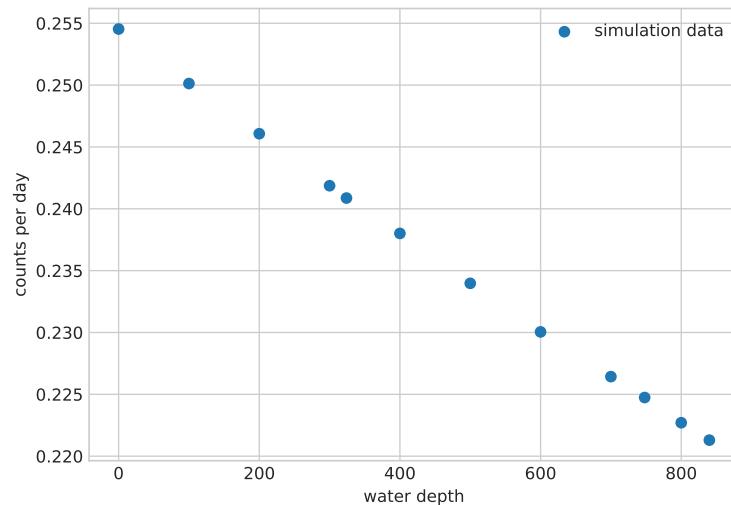


Abbildung 4.6: Detektorraten in Teilchen pro Tag gegen die Wasser Tiefe.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde anhand einer Bohrung aus dem Ruhrgebiet ein Bodenmodell erstellt, um Detektorzählraten bei verschiedenen Wasserständen innerhalb für den Bergbau trocken gelegten Erdschichten zu simulieren. Es konnten signifikante Unterschiede in den Zählraten gezeigt werden. Pro 100 m ändert sich die Detektorrate um 1,55 %.

Da sich in der Realität die Wasserstände um cm pro Woche ändern können, detektiert der in dieser Arbeit angenommene Detektor zu wenig Teilchen pro Tag, um Veränderungen schnell genug oder überhaupt verlässlich nachweisen zu können.

Da in dieser Arbeit nur die Detektion über die horizontale Oberfläche in Betracht gezogen wird, könnte in zukünftigen Arbeiten über die Vergrößerung des Detektors in vertikaler Richtung die Messzeit gesenkt werden, technisch ist lediglich zu beachten, dass der Detektor in 30 Fuß Schritten teilbar sein muss. Des Weiteren sollte über Alternativen zur Platzierung des Detektors innerhalb einer Bohrung nachgedacht werden. Der Durchmesser von 10 cm limitiert die Möglichkeiten des Detektors massiv.

Alte Bergwerkschächte hatten ursprünglich einen Durchmesser von 7 bis 10 m. Dort existieren teilweise Inspektionsrohre mit einem Durchmesser von 80 bis 100 cm. Diese werden vorgehalten, um ggf. Pumpen einzuhängen. Jene Inspektionsrohre würden alleine durch den höheren Durchmesser eine ca. 24 mal größere Grundfläche besitzen können, welche bspw. die Rate für 800 m von $0,254 \frac{\text{Myonen}}{\text{Tag}}$ auf $6,108 \frac{\text{Myonen}}{\text{Tag}}$ heben würde.

Wenn die xy-Ebene einer Bohrung verlassen wird, treten große Inhomogenitäten auf. Dies senkt die Übertragbarkeit des Bodenmodells auf die echte Welt. Um diese zu verbessern, könnten mit mehr Bohrungen das Bodenmodell in der xy-Ebene verfeinert werden, um die Berechnung zu verbessern.

Spannend könnte im Rahmen kommender Arbeiten eine echte Messung innerhalb eines Bohrlochs oder anderen Öffnungen sein. Es könnte untersucht werden, inwiefern die in dieser Arbeit bestimmten relativen Raten-Unterschiede mit den Vorhersagen dieser Arbeit übereinstimmen.

Auch könnte ein Vergleich der absoluten Detektorraten mit den simulierten ein Maß über die Gültigkeit aller Näherungen in dieser Arbeit liefern.

A Anhang

A.1 verwendete Programme

Der Programmcode dieser Arbeit ist unter <https://github.com/Martin-SF/muography-bachelor> verfügbar.

Alle Ergebnisse werden mit Python 3.10.4 (<https://www.python.org>) mit Hilfe dieser aufgelisteten Bibliotheken erzeugt:

1. PROPOSAL 7.3.1 (<https://github.com/tudo-astroparticlephysics/PROPOSAL>)
2. EcoMug 1.3.1 (<https://github.com/dr4kan/EcoMug>)
3. Numpy 1.21.6 (<https://numpy.org/>)
4. pandas 1.4.2 (<https://pandas.pydata.org/>)
5. matplotlib 3.5.2 (<https://matplotlib.org/>)
6. distributed 2022.5.0 (<https://distributed.dask.org/en/stable/>)
7. tqdm 4.64.0 (<https://github.com/tqdm/tqdm>)
8. numba 0.55.1 (<https://numba.pydata.org/>)
9. pytables 3.7.0 (<https://www.pytables.org/>)
10. prettytable 3.2.0 (<https://pypi.org/project/prettytable/>)
11. scipy 1.8.0 (<https://scipy.org/>)
12. uncertainties 3.1.6 (<https://pythonhosted.org/uncertainties/>)

A.2 Schichtverzeichnis

A.2 Schichtverzeichnis



Abbildung A.1: Zu sehen sind die einzelnen Schichten einer Bohrung nahe Bottrop. Die erste Zahl steht für die Tiefe des unteren Ende der Schicht in m, die zweite Zahl ist die Dicke der Schicht in m. Der Standort ist im untersten Bild markiert. Zu finden unter boreholemap.bgr.de/mapapps/resources/apps/boreholemap/. Standort: (351 221,19 5 719 599,6) ID: DABO_65808 (nahe dem Schwarze Heide Airport)

A.3 Konfiguration von EcoMug

Für EcoMug ist ein Pythoninterface erstellt worden¹. Alle relevanten Funktionen EcoMugs sind nun also auch aus Python benutzbar. Energieangaben sind in EcoMug immer als Impuls des Teilchens definiert. Zur Vereinheitlichung werden alle Werte EcoMugs in die Schwerpunktsenergie umgerechnet. Mit Dask.distributed wird die Erzeugung der Myonen auf mehrere Kerne parallelisiert. Jeder Kern zieht einen eigenen zufälligen Seed für EcoMug.

Während erster Testläufe wird festgestellt, dass die in EcoMug standardmäßig verwendete Parametrisierung für den Myonenfluss auf Meereshöhe nicht für hohe Energien geeignet ist.

In Testläufen ergibt sich eine Menge von 10^7 Myonen als geeignetes Mittelmaß zwischen Präzision und Laufzeit. Auf dem *phobos* Server des Lehrstuhls benötigt EcoMug ca. eine Minute und PROPOSAL ca. 30 min um 10 Mio. Myonen zu generieren bzw. zu propagieren pro Wassertiefe. Specs: 2x Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2680 v3 @ 2.50GHz (je 12 Kerne); 128 GB RAM.

Außerdem ergibt sich, dass Myonen min. über 600 GeV je nach Wasserstand brauchen, um den Detektor erreichen zu können. Bei 8 m Wasserstand haben Myonen mit der geringsten Energie 638,9 GeV ($1 \cdot 10^7$ simulierte Myonen). Aufgrund dessen wird in EcoMug die minimale Myonenenergie auf 600 GeV gesetzt.

Ohne diesen Energieschnitt haben die hochenergetischsten Myonen bei 10^7 erzeugten ca. 200 GeV wie in Abb. A.2 zu sehen.

In Testläufen mit 10^7 Myonen ergibt sich wie in Abb. 4.3 zu sehen, dass die hochenergetischsten Myonen unter 100 TeV bleiben.

Deshalb wird die maximale Myonenenergie in EcoMug auf 200 TeV gesetzt.²

Des Weiteren wird die Generationsfläche auf einen Punkt vereinfacht (siehe Kap. 4.4), d.h. jedes Myon hat als Start Position (0,0,0)³ Im Abschnitt 4.4 findet sich die Begründung.

¹pybind11 <https://github.com/pybind/pybind11>

²Der Grund dafür ist, dass EcoMugs Laufzeit mit der Breite des Energiebereichs skaliert. Es sollte also ein Energiemaximum leicht oberhalb des maximalen E_μ gewählt werden.

³Zur Vermeidung unnötiger Zyklen wird im gesamten Programmcode angenommen das die Myonen bei (0,0,0) starten.

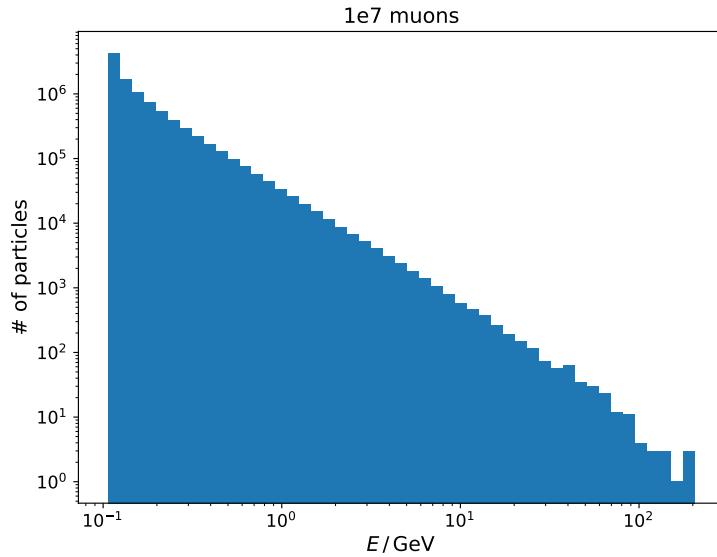


Abbildung A.2: Abgebildet 10^7 Myonen mit EcoMug ohne Energieschnitt erzeugt. Es wird die Gaisser-Parametrisierung benutzt. Die Maximale Energie liegt lediglich bei ca. 200 GeV

A.4 Konfiguration von PROPOSAL

Da das erstellte Bodenmodell eindimensional ist und die verwendete Gaisser-Parametrisierung (siehe Kap. 4.2) $\theta < 70^\circ$ vorschreibt, da es die Erdkrümmung vernachlässigt, wird sich folgende Näherung überlegt: Es wird die Emissionsfläche der Myonen mit dem, in der Größenordnung des Experiments punktförmigen Detektor, vertauscht. Diese Näherung garantiert das jedes Myon, soweit es genug Energie besitzt, den Detektor trifft.

Zu den in Kap. 4.1 beschriebenen Schichten wird der PROPOSAL Konfiguration noch eine Detektorschicht hinzugefügt und eine *hierarchy* von 20 gegeben. Die *hierarchy*-Bedingung wird dazu benutzt zu definieren, wann PROPOSAL mit der Propagation stoppen soll. Diese Schicht repräsentiert ohne die am Anfang des Kapitels beschriebene Näherung anschaulich die Fläche der Myonen aus der Atmosphäre, welche den Detektor treffen.

Für die Berechnung der Ergebnisse wird folgende Konfiguration verwendet:

$$v_{\text{cut}} = 0.001 \text{ und } \text{multiplescattering} = \text{Highland} \quad (\text{A.1})$$

A Anhang

Zur weiteren Optimierung der Laufzeit wird wieder mit Dask.distributed eine Parallelisierung auf mehreren Kernen ermöglicht. Da PROPOSAL einen standardmäßigen Seed setzt erzeugt sich jeder Kern einen neuen zufälligen Seed.

Literatur

- [1] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Grubenwasser>.
- [2] M.G. Aartsen et al. „The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems“. In: *Journal of Instrumentation* 12.03 (März 2017), P03012–P03012. DOI: [10.1088/1748-0221/12/03/p03012](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/p03012).
- [3] Jean-Marco Alameddine et al. *tudo-astroparticlephysics/PROPOSAL: Zenodo*. März 2020. DOI: [10.5281/zenodo.1484180](https://doi.org/10.5281/zenodo.1484180).
- [4] A B Alexandrov et al. „Muon radiography method for fundamental and applied research“. In: *Physics-Uspekhi* 60.12 (Dez. 2017), S. 1277–1293. DOI: [10.3367/ufne.2017.07.038188](https://doi.org/10.3367/ufne.2017.07.038188).
- [5] Robert S Carmichael. *Handbook of Physical Properties of Rocks (1982): Volume II*. CRC press, 2017.
- [6] Dmitry Chirkin und Wolfgang Rhode. *Propagating leptons through matter with Muon Monte Carlo (MMC)*. 2004. DOI: [10.48550/ARXIV.HEP-PH/0407075](https://doi.org/10.48550/ARXIV.HEP-PH/0407075).
- [7] Mario Dunsch et al. „Recent Improvements for the Lepton Propagator PROPOSAL“. In: *Computer Physics Communications* 242 (2019), S. 132–144. DOI: [10.1016/j.cpc.2019.03.021](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.03.021). arXiv: [1809.07740 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1809.07740).
- [8] Anatoli Fedynitch et al. „Hadronic interaction model sibyll and inclusive lepton fluxes“. In: *Physical Review D* 100.10 (Nov. 2019). DOI: [10.1103/physrevd.100.103018](https://doi.org/10.1103/physrevd.100.103018).
- [9] Thomas K. Gaisser, Ralph Engel und Elisa Resconi. *Cosmic Rays and Particle Physics*. 2. Aufl. Cambridge University Press, 2016. ISBN: 978-0-521-01646-9.
- [10] Particle Data Group et al. „Review of Particle Physics“. In: *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2020.8 (Aug. 2020). 083C01. ISSN: 2050-3911. DOI: [10.1093/ptep/ptaa104](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104).
- [11] Helge Hoffmann. *Das Ruhrgebiet als Seenlandschaft: So sähe es aus, wenn die Pumpen stillständen*. URL: <https://www.waz.de/region/rhein-und-ruhr/wenn-die-pumpen-stillstaenden-id12358775.html>.
- [12] Morishima K., Kuno M., Nishio A. et al. „Discovery of a big void in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons.“ In: *Nature* 552 (2017), S. 386–390. DOI: [10.1038/nature24647](https://doi.org/10.1038/nature24647).

Literatur

- [13] V.N. Kobranova. *Petrophysics*. MIR Publishers, Springer Verlag, 1989.
- [14] Jan-Hendrik Koehne et al. „PROPOSAL: A tool for propagation of charged leptons“. In: *Computer Physics Communications* 184.9 (2013), S. 2070–2090. DOI: [10.1016/j.cpc.2013.04.001](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2013.04.001).
- [15] D. Pagano et al. „EcoMug: An Efficient COsmic MUon Generator for cosmic-ray muon applications“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1014 (2021), S. 165732. ISSN: 0168-9002. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165732](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165732).
- [16] J B Patterson und E C Morris. „Measurement of Absolute Water Density, 1 °C to 40 °C“. In: *Metrologia* 31.4 (Jan. 1994), S. 277–288. DOI: [10.1088/0026-1394/31/4/001](https://doi.org/10.1088/0026-1394/31/4/001).
- [17] Jürgen H Schön. *Handbook of Geophysical Exploration: Fundamentals and Principles of Petrophysics. Seismic Exploration. Physical Properties of Rocks*. Pergamon, 1996.
- [18] Doug Schouten. „Muon geotomography: selected case studies“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 377.2137 (2019), S. 20180061. DOI: [10.1098/rsta.2018.0061](https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0061).
- [19] Hiroyuki K.M. Tanaka et al. „High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan“. In: *Earth and Planetary Science Letters* 263.1 (2007), S. 104–113. ISSN: 0012-821X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X07005638>.
- [20] ZX. Zhang, T. Enqvist, M. Holma et al. „Muography and Its Potential Applications to Mining and Rock Engineering“. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53 (2020), S. 4893–4907. DOI: [10.1007/s00603-020-02199-9](https://doi.org/10.1007/s00603-020-02199-9).

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einigen Personen danken, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Zunächst danke ich Herrn Prof. Dr. Dr. Rhode sehr herzlich für das Erstgutachten und die Möglichkeit, meine Bachelorarbeit am Lehrstuhl EVb schreiben zu können. Herrn Prof. Dr. Kröninger möchte ich ebenfalls herzlich für das Zweitgutachten danken. Ganz besonders möchte ich in erster Linie Jean-Marco, Pascal, Jan und Alexander der PROPOSAL Gruppe danken. Egal an wen ich mich von euch gewandt habe, standet ihr mir immer tatkräftig und ausdauernd an meiner Seite, auch zu ungewöhnlichen Tageszeiten. Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr. Ing. Tobias Rudolph bedanken. Sie haben uns eine Bohrung zur Verführung gestellt sowie detailliert viele Fragen zur Geologie und Bergbau erklärt. Ohne ihr Mitwirken wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Des Weiteren möchte ich Mirco Hünnefeld und Dominik Baak für die Verbesserungsvorschläge in Bezug auf Optimierung des Codes , sowie dem gesamten Lehrstuhl für die angenehme Atmosphäre danken. Darüber hinaus möchte ich besonders allen aus der PROPOSAL Gruppe sowie meinen Freunden Sebastian, Santosh, Judith, Noah sowie meinen Eltern für das Korrekturlesen danken, ohne euch wäre die Arbeit nicht im Ansatz da, was sie jetzt ist. Zum Schluss möchte ich noch meiner Familie und meinen Freunden danken, die mich in den stressigen Phasen immer wieder ermuntert haben und unterstützend zur Seite standen.