

Datierung von Umweltproben einer Salzwiese  
mittels radiometrischer Methoden

Bachelorarbeit

am

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

der Leibniz Universität Hannover

von

Beriwan Christiane Öner

geboren am 11.08.1999

Fächerübergreifender Bachelor Physik - Mathematik

Erstprüfer: Prof. Dr. Clemens Walther

Zweitprüferin: PhD Maike Paul

### **Erklärung der Selbstständigkeit**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie die Zitate deutlich kenntlich gemacht habe.

Hannover, den 01. Juni 2023

Beriwan Christiane Öner

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Eigenschaften der untersuchten Radionuklide</b>	<b>2</b>
2.1	Eigenschaften von Cäsium . . . . .	2
2.2	Eigenschaften von Kalium . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Gammaskopimetrische Untersuchung</b>	<b>4</b>
3.1	Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie . . . . .	4
3.1.1	Photoeffekt . . . . .	4
3.1.2	Comptoneffekt . . . . .	4
3.1.3	Paarbildungseffekt . . . . .	4
3.2	Der Reinstgermaniumdetektor . . . . .	6
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	6
3.3	Nulleffekt . . . . .	7
3.4	Kalibrierungen des Reinstgermaniumdetektoren . . . . .	7
3.4.1	Energiekalibrierung . . . . .	7
3.4.2	Halbwertsbreitenkalibrierung . . . . .	8
3.4.3	Efficiencykalibrierung . . . . .	8
3.5	Berechnung der spezifischen Aktivität . . . . .	8
3.5.1	Erkennungs- und Nachweisgrenzen . . . . .	9
3.6	Messen von Ringversuchen zur Qualitätssicherung . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Probenahme, Messung und Auswertung der Bodenproben</b>	<b>11</b>
4.1	Beschreibung des Untersuchungsgebietes . . . . .	11
4.2	Probenahme . . . . .	11
4.3	Probenaufbereitung . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>16</b>
5.1	Korngrößenanalyse . . . . .	17
5.2	K-40 . . . . .	18
5.3	Cs-137 . . . . .	19
5.3.1	Datierung von Cs-137 . . . . .	20
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>29</b>
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	<b>30</b>
<b>B</b>	<b>Abbildungen</b>	<b>36</b>
<b>C</b>	<b>PDF-Dokumente</b>	<b>37</b>
	<b>Literatur</b>	<b>44</b>

## 1 Einleitung

Salzwiesen der Küsten sind in Mittel- und Westeuropa typische Lebensräume an der Nord- und Ostseeküste und haben wichtige ökologische Bedeutungen als Übergangsökosysteme vom Festland zum Meer. Aufgrund intensiver Bewirtschaftungs- und Eindeichungsmaßnahmen haben Küstenlebensräume erhebliche Veränderungen erlitten, weshalb aktuelle Renaturierungsmaßnahmen erfolgen [Zer19]. Das Bundesland Niedersachsen hat seine Wattenmeeranteile als Nationalparks ausgewiesen und damit deren ökologische Bedeutung und Schutz vor Naturgefahren hervorgehoben. Die aktive Absenkung des Geländeniveaus sowie die Modellierung naturnaher Prielsysteme ermöglichen den Wiederanschluss an die Tidendynamik [LHM20].

Im Rahmen eines Forschungsprojektes am *Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau und Ästuar- und Küsteningenieurwesen* (LuFI) wird eine renaturierte Salzwiese an der niedersächsischen Küste am Neßmersiel Hafen untersucht. Das Projekt geht der Frage nach, was eine gute Küste ist, in dem unterstützt mit naturschutzfachlich und ethisch vertretbaren Bedingungen gelebt werden kann. Anhand von Sedimentkernen untersucht das *Institut für Radioökologie und Strahlenschutz* (IRS) Entwicklungen in den Sedimentationsraten der vergangenen Jahrzehnte in einer bewirtschafteten Salzwiese. Hierbei sollen Radionuklide wie zum Beispiel Cs-137 und Pb-210 als Tracer und Chronometer dienen.

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf einer radiometrischen Datierung von Umweltproben mittels dem anthropogenen Radionuklid Cs-137. Eine genaue Datierung an dynamischen und anthropogen beeinflussten Standorten in der untersuchten Salzwiese stellt eine große Herausforderung dar. In einer weiteren Arbeit am IRS wurde eine radiometrische Datierung mit Hilfe des natürlich vorkommenden radioaktiven Isotops Pb-210 durchgeführt, wobei die Ergebnisse miteinander verglichen und diskutiert werden [Sch23].

Durch die Atomwaffentests, die in den 1950er und 1960er durchgeführt wurden, und den Unfall von Tschernobyl, welcher sich im Jahre 1986 ereignete, ist Cs-137 in die Umwelt gelangt. Aufgrund der anschließenden Migration von Cs-137 in Böden, wird in der vorliegenden Arbeit Cs-137 in den Bodenproben gammaspektrometrisch untersucht. Da Cäsium und Kalium Homologe mit ähnlichem chemischen Verhalten sind, wird auch das primordiale Radionuklid K-40 analysiert, wobei die Messwerte aus der Arbeit von [Sch23] verwendet werden.

Die durch die Gammaskpektrometrie ermittelten Cs-137-Aktivitätskonzentrationen werden gegen die Sedimenttiefe aufgetragen. Aus der ersten angewandten Datierung wird die Sedimentationsrate bestimmt, da anhand dieser Rate das Aufwachsen der Salzwiese beschrieben werden kann. In einer weiteren Datierungsmethode werden durch die Pb-210-Datierung bestimmten Alters-Werte hinzugezogen, um auftretende Peaks historischen Ereignissen zuordnen zu können.

## 2 Eigenschaften der untersuchten Radionuklide

### 2.1 Eigenschaften von Cäsium

Cäsium gehört zu der Gruppe der Alkalimetalle, mit einer Ordnungszahl von 55, und besitzt eine Valenzelektronenkonfiguration von  $6s^1$  [Lie80]. Insgesamt gibt es 38 Isotope des Cäsiums. Das Cs-133 ist das einzig stabile und kommt als Reinelement in der Natur vor. Die Radionuklide Cs-137 und Cs-134 sind von radioökologischer Bedeutung, da sie im Verlauf des 20. Jahrhunderts bei Kernwaffenexplosionen und beim Reaktorunfall von Tschernobyl freigesetzt wurden. Mit einer Halbwertszeit von 2 Jahren ist Cs-134 vor allem in den ersten Monaten nach einem Reaktorunfall von großer Bedeutung [Nuc23]. Demgegenüber hat Cs-137 eine Halbwertszeit von 30 Jahren und eine größere radioökologische Bedeutung als Cs-134, da Cs-137 nach einem Reaktorunfall langfristig über mehrere Jahre in die Umwelt freigesetzt wird [Nuc23].

Cs-137 ist ein anthropogen erzeugtes Radionuklid und wird als ein Spaltprodukt aus Kernreaktoren freigesetzt. Als anthropogen werden Radionuklide bezeichnet, die durch Einfluss des Menschen erzeugt werden. Cs-137 zerfällt über einen  $\beta^-$ -Zerfall zu Ba-137 bzw. Ba-137m, einem angeregten Zustand von Barium. Anschließend geht das Ba-137m in den Grundzustand über und emittiert dabei einen  $\gamma$ -Quant mit einer Energie von 661,66 keV [Nuc23]. Das bildet die Grundlage zum Nachweis von Cs-137 in dieser Arbeit.

In die Umwelt gelangte Cs-137 mit dem globalen Fallout der oberirdischen Kernwaffenversuche, der in den späten 1950er und Anfang der 1960er Jahren ein Maximum erreichte (Abbildung 1) und in den meisten Umgebungen schnell und stark von Bodenpartikeln der Erdoberfläche adsorbiert wurde [Eff+00].

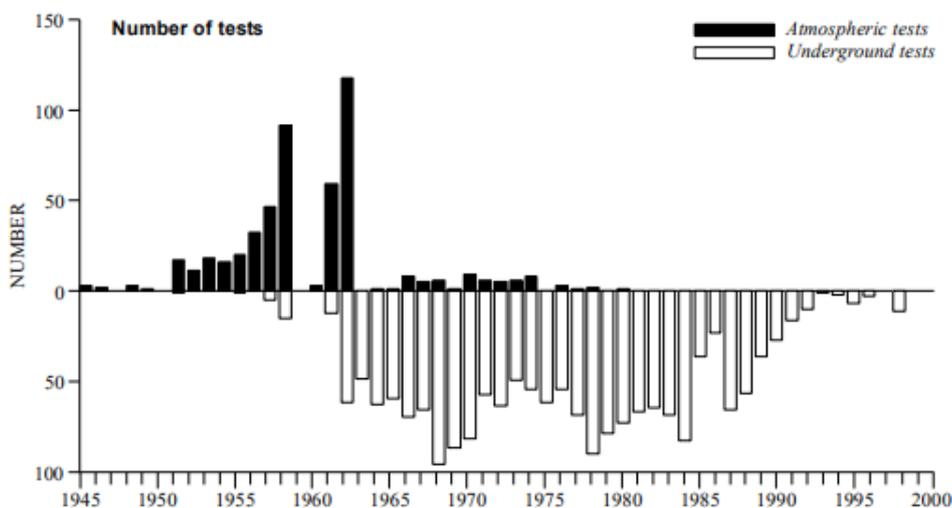


Abbildung 1: Anzahl von oberirdischen und unterirdischen Atomwaffentests [Eff+00].

Nach dem der *Vertrag über das Verbot von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre* im Jahr 1963 in Kraft gesetzt wurde, ging die Anzahl an oberirdischen Atomwaffentests deutlich zurück (Abbildung 1). Jedoch sind langlebige Radionuklide wie Cs-137 nach wie vor in der Umwelt nachweisbar. Neben dem Eintrag durch Atomwaffentests ist das anthropogene Radionuklid Cs-137 in der Vergangenheit auch durch Unfälle an kerntechnischen Anlagen in die Umwelt gelangt, insbesondere durch den Reaktorunfall in Tschernobyl am 26. April 1986.

Cs-Radionuklide sind als freie, monovalente Kationen  $Cs^+$  im Boden vorhanden und gehören der mobilen Fraktion an. In einem hohen Maße wird Cs-137 durch Tonminerale adsorbiert, die eine hohe Affinität gegenüber Cäsium aufweisen. Die Bindungsstärke von Cs-137 in den Zwischenschichten wird vor allem durch die negative Ladungsstärke der Tonminerale bestimmt [Lan04].

Je nach Bodenart und Bodennutzung können Unterschiede bezüglich des Gehalts radioaktiver Stoffe festgestellt werden. Bei unbearbeiteten Böden verhindert die Fixierung an Tonmineralien die Wanderung der Radionuklide in tiefere Schichten [Sta+08].

Über bedeutende Relevanz für das Verhalten von Cs-137 verfügt das chemisch verwandte Kalium. Die Cäsium-Aufnahme ist an die Kaliumdynamik im Boden und an die Kaliumversorgung des Gewebes gekoppelt, sodass bei geringer Kaliumversorgung Cäsium verstärkt aufgenommen wird und umgekehrt [Brü92].

Die Aufnahme von Cäsium erfolgt bei Mensch und Tier über die Nahrung bzw. das Futter. Im Körper verhält sich Cäsium ähnlich wie Kalium, d. h. es wird vor allem in das Muskelgewebe eingebaut.

## 2.2 Eigenschaften von Kalium

Kalium gehört als Alkalimetall zu der ersten Hauptgruppe des Periodensystems und hat eine Elektronenkonfiguration von  $4s^1$  [Lie80]. Das primordiale Radionuklid K-40, mit einer Halbwertszeit von 1,28 Milliarden Jahren, stammt aus der Nukleosynthese vor Entstehung des Sonnensystems und ist aufgrund ihrer langen Halbwertszeit noch nicht vollständig zerfallen und somit noch heute zu finden [Nuc23]. In der Natur tritt das Kalium als Gemisch von drei Isotopen auf: 93,2 % K-39, 6,73 % K-41 und 0,0117 % K-40 [Lie80]. Die ersten beiden Isotope sind stabil, wohingegen K-40 instabil ist.

K-40 zerfällt zu 89 % über einen  $\beta^-$ -Zerfall direkt in den Grundzustand des Calcium Ca-40 und zu etwa 11 % über einen Elektroneneinfang (*electron capture*) in einen angeregten Zustand des Edelgases Argon Ar-40. Dieses gibt seine Anregungsenergie über einen Gammazerfall mit einer Photonenenergie von 1461 keV ab [Lie80]. Dieser Übergang dient als Nachweis von Kalium in dieser Arbeit.

Kalium liegt häufig in größeren Konzentrationen in Böden vor und wird überwiegend von Tonmineralien gebunden und bindet sich eher schwach an organische Substanzen. Das Kation  $K^+$  wird vor allem in den Zwischenschichten von Tonmineralien fixiert. [Brü92].

Eine weitere besondere Eigenschaft von Kalium ist, dass es ein für die Erhaltung des Lebens essentieller Mineralstoff ist, da er insbesondere an den biochemischen Prozesse der Zelle beteiligt ist. Bevorzugt wird das Kalium in Muskelgewebe abgelagert [Völ17].

## 3 Gammaskopimetrische Untersuchung

### 3.1 Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie

Der Nachweis von gammastrahlenden Nukliden erfolgt unter Verwendung der ionisierenden Wirkung dieser Strahlung. Die Ionisation von Atomen durch Gammaquanten beruht auf drei physikalischen Prozessen: Der Photoeffekt, der Comptoneffekt und der Paarbildungseffekt, welche im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

#### 3.1.1 Photoeffekt

Beim Photoeffekt wechselwirkt ein Gammaquant mit einem Elektron, das an ein Atom gebunden ist, wobei das Photon vollständig absorbiert wird. Dabei gibt es seine Energie an ein Elektron ab, das aus der Elektronenhülle des Atoms freigesetzt wird [Mus95]. Dieser Effekt ist in Abbildung 2 als *Photoelectric* wiederzufinden und überwiegt bei Germanium in einem Energiebereich bis 160 keV.

#### 3.1.2 Comptoneffekt

Der Comptoneffekt beschreibt eine elastische Streuung eines Photons mit einem Elektron in der Außenhülle eines Atoms [Mus95]. Diese Wechselwirkung taucht in Abbildung 2 als *Compton* auf und dominiert im Bereich der mittleren Energie dominiert (ab 160 keV bis 8.600 keV).

Wechselwirkt ein Photon mit einem Atom mittels des Comptoneffekts, so wird ein Elektron aus der Elektronenhülle freigesetzt und das Photon gestreut [Mus95]. Die Energie  $E'$  des gestreuten Photons ist winkelabhängig und berechnet sich gemäß:

$$E' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0c^2} (1 - \cos(\Theta))} \quad (3.1)$$

Hierbei ist  $m_0c^2$  die Ruheenergie eines Elektrons,  $E_\gamma$  die Energie eines einlaufenden  $\gamma$ -Quants und  $\Theta$  der Streuwinkel des auslaufenden Photons. Die Energie des (Compton-)Elektrons ist somit:

$$E_e = E_\gamma - E' . \quad (3.2)$$

#### 3.1.3 Paarbildungseffekt

Bei dem Paarbildungseffekt zerfällt gemäß der Äquivalenz von Masse und Energie ein Photon in ein Elektron-Positron-Paar. Dementsprechend wird mindestens eine Photonenenergie von  $2 \cdot m_e c^2 = 1022$  keV benötigt, wobei sich die überschüssige Energie auf die kinetische Energie der entstandenen Teilchen verteilt. Die Energie der Photonen ist somit mindestens das Doppelte der Ruheenergie der Elektronen und Positronen und  $m_e$  entspricht der Elektronenmasse.

### 3.1 Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie    Gammaspektrometrische Untersuchung

$$E_{\text{kin},e^-} + E_{\text{kin},e^+} = E_\gamma - 2m_e c^2 \quad (3.3)$$

Kollidieren die durch Paarerzeugung entstandenen Elektronen und Positronen, so vernichten sie sich unter Aussendung zweier Photonen mit jeweils einer charakteristischen Energie von  $E_\gamma = 511 \text{ keV}$  (3.3). Dieser auftretende Peak wird als *Annihilationspeak* benannt. Bei einem *Single-Escape-Peak* entkommt eines der beiden Photonen aus dem Detektor und bei einer Energie von  $E_\gamma - 511 \text{ keV}$  tritt ein weiterer kleinerer Peak auf. Wenn beide Photonen entkommen, entsteht ein *Double-Escape-Peak* bei einer Energie von  $E_\gamma - 1022 \text{ keV}$  [Gil08].

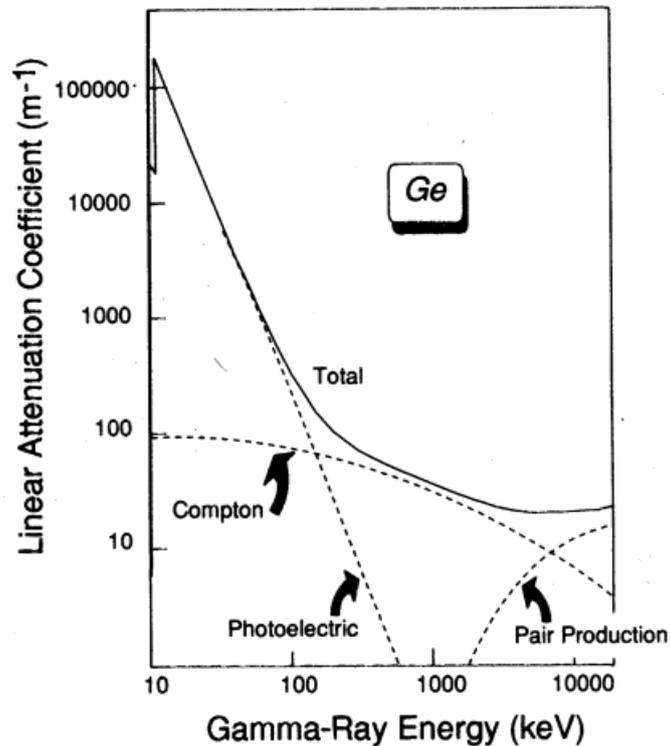


Abbildung 2: *Linear Attenuation Coefficient* (linearer Dämpfungskoeffizient) drückt aus wie stark die  $\gamma$ -Strahlung beim Durchgang durch Germanium (Ge) abgeschwächt wird. Der Photoeffekt dominiert als Wechselwirkung bei niedrigeren Energien, bis etwa 160 keV, und der Comptoneffekt ab 160 keV bis 8.600 keV. Der Paarbildungseffekt dominiert ab einer Energie von 8.600 keV [Gil08].

### 3.2 Der Reinstgermaniumdetektor

Der Reinstgermaniumdetektor ist ein Halbleiterdetektor und nutzt die Eigenschaft von ionisierender Strahlung, um Ladungsträger zu erzeugen. Halbleiter besitzen eine kleine Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband, sodass bereits bei geringer Energiezufuhr freie Ladungsträger erzeugt werden [Bük13].

In der vorliegenden Arbeit werden für die Untersuchung der Bodenproben zwei solcher Detektoren verwendet.

#### 3.2.1 Aufbau und Funktionsweise

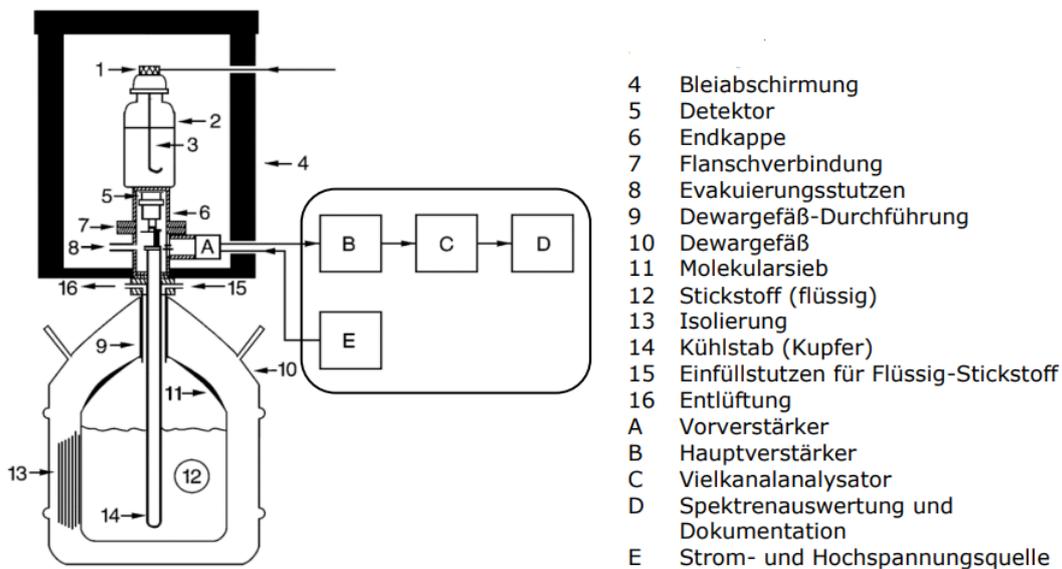


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Halbleiterdetektors, entnommen aus [Arn+18].

Der Detektorkopf besteht aus einem Germaniumkristall und arbeitet wie eine Diode. Mit einem angelegten elektrischen Feld fließen die erzeugten freien Ladungsträger zu den Seiten des Kristalls ab und werden registriert, wobei das elektrische Feld durch eine Spannung zwischen zwei leitenden Flächen außen am Kristall erzeugt wird. Das erste Elektron erzeugt durch Stoßprozesse weitere Elektronen-Loch-Paare, wobei deren Anzahl proportional zu der Photonenenergie ist. Die Energie, die dabei zur Bildung eines Elektron-Loch-Paares benötigt wird, ist höher als die Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband [Gil08].

Da es sich um einen Halbleiter handelt, sind Verunreinigungen, die als Akzeptor oder Donor Löcher bzw. freie Elektronen in den Kristall bringen, zu berücksichtigen. Handelt es sich bei den

eingebrachten Verunreinigungen um Akzeptoren, so spricht man von p-dotierten Halbleitern, ansonsten von n-dotierten Halbleitern.

Die angeschlossene Elektronik ist ebenfalls in Abbildung 3 abgebildet. Ein Vorverstärker liegt hinter dem Detektorkristall und wandelt einen Spannungspuls um. Die Amplitude ist proportional zur deponierten Energie. Die weiteren elektronischen Komponenten des Detektorsystems bestehen aus einer Hochspannungsquelle, und Hauptverstärker, AD-Wandler, Vielkanalanalysator und einem Rechner zur Auswertung und Speicherung der aufgenommenen Spektren. Hierbei liefert der AD-Wandler die Pulshöhenverteilung, welche dann das Spektrum bildet. Anschließend wird das Spektrum von dem Programm *Genie-2000* ausgewertet, wobei das Spektrum eine hohe Anzahl von Kanälen besitzt, denen jeweils ein charakteristisches Energieintervall zugeordnet werden kann.

Die dicken Bleiziegeln sorgen für die Abschirmung gegen Gammastrahlung aus der Umgebung der Detektoren. Des Weiteren ist für den Betrieb des Detektors eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff nötig, um Hintergrundrauschen zu vermeiden [Wic04].

### 3.3 Nulleffekt

Für die vorliegende Arbeit sind die Aktivitätsbestimmungen von K-40 und Cs-137 im Fokus, weshalb aus dem aufgenommenen Spektrum die Fläche des *Full-Energy-Peaks* sich bei der dem Nuklid entsprechenden Energie berechnet wird. Hierzu wird von der Gesamtfläche der sogenannte Nulleffekt abgezogen. Der Nulleffekt wird durch Messung des Spektrums ohne Probe ermittelt [Wic04].

### 3.4 Kalibrierungen des Reinstgermaniumdetektoren

Die Kalibrierung ist notwendig, um die bei der Gammamessung erhaltenen Impulshöhenspektren der Aktivitätskonzentrationen von Radionukliden zu ermitteln. Drei grundlegende Kalibrierungen werden somit durchgeführt [Bir09], diese werden in den nachfolgenden Unterkapiteln näher erläutert.

1. Energiekalibrierung: ordnet die jeweiligen Energien den einzelnen Kanälen zu.
2. Halbwertsbreitenkalibrierung: stellt den Zusammenhang zwischen Peakbreite und Energie her.
3. Efficiencykalibrierung (Effizienz): gibt das Verhältnis zwischen detektierten und emittierten Photonen in Abhängigkeit der Energie wieder.

#### 3.4.1 Energiekalibrierung

Die vom Spektrum registrierten Signale werden zunächst über die Impulshöhe einzelnen Kanälen zugeteilt. Mit Hilfe der Energiekalibrierung wird diesen Kanälen jeweils eine Energie in keV zugeordnet. Hierzu wird ein Kalibrierpräparat mit Radionukliden unterschiedlichster Emissionslinien, die einen möglich großen Energiebereich abdecken, gemessen.

Für Detektor 4 sowie für Detektor 6 wurden die flächenhaften Kalibrierstandards QCY-13 sowie QCY-14 eingesetzt. Beide sind Multinuklidstandards, d. h. sie enthalten 10 Radionuklide mit 12

Linien hoher Emissionwahrscheinlichkeiten und decken den Energiebereich von 60 bis 1836 keV ab. Diese sind in den Tabellen 1 und 2 im Anhang aufgeführt. Nach Messung der zwei Standards können die entstandenen Full-Energy-Peaks mit den bekannten Gammaenergien der Radionuklide verglichen und den Kanälen die entsprechenden Energien zugeteilt werden.

### 3.4.2 Halbwertsbreitenkalibrierung

Die Halbwertsbreite, engl. *Full Width at Half Maximum* - FWHM, beschreibt die Breite eines Peaks auf halber Höhe seines Maximums. Die Breite der Peaks ist abhängig von der Energie der Gammaquanten und dem verwendeten Detektor und nimmt mit steigender Energie zu. Eine solche Kalibrierung wurde schon vorab und wurde daher nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt.

### 3.4.3 Efficiencykalibrierung

Die Efficiency  $\epsilon$  (Effizienz), ist energie- sowie geometrieabhängig und ist erforderlich, um die Aktivität in der Probe zu ermitteln. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der Rate der detektierten  $r_{det}$  und der emittierten Gammastrahlung  $r_{emit}$  [Bir09]:

$$\epsilon = \frac{r_{det}}{r_{emit}}. \quad (3.4)$$

Die Effizienz wird für die Berechnung der spezifischen Aktivitäten von Cs-137 und K-40 in den Bodenproben benötigt. Für die vorliegenden Bodenproben wurde die Folienmethode verwendet, die im Anhang in Abbildung 22 schematisch dargestellt ist.

Für die Effizienz einer Linie wird der logarithmische Mittelwert gebildet [Wic04]:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_u}{\ln(\epsilon_0/\epsilon_u)}. \quad (3.5)$$

Für Energien  $E_\gamma > 400$  keV wurde eine Funktion mit zwei Parametern a,b gebildet [Wic04]:

$$\epsilon(E_\gamma) = a \cdot E_\gamma^b \quad (3.6)$$

## 3.5 Berechnung der spezifischen Aktivität

Die spezifische Aktivität ist die Aktivität einer Probe in Bezug auf ihre Masse und besitzt die Einheit Bq/kg. Die spezifische Aktivität lässt sich wie folgt berechnen:

$$A = \frac{1}{m \cdot \epsilon_\gamma \cdot p_\gamma} \left( \frac{N}{t} - \frac{N_0}{t_0} \right) \quad (3.7)$$

Hierfür gilt:

$m$ : Trockenmasse der Probe [kg]

$\epsilon_\gamma$ : Effizienz bei Energie  $E_\gamma$

$p_\gamma$ : Emissionswahrscheinlichkeit für ein Photon mit der Energie  $E_\gamma$

$t, t_0$ : Messzeiten der Probe bzw. des Nulleffekts [s]

$N, N_0$ : Nettopeakfläche im Spektrum der Probe bzw. im Nulleffektspektrum

Das Programm *Genie-2000*, welches zur Auswertung verwendet wird, bestimmt automatisch die Nettopeakflächen und deren Unsicherheiten.

Entsprechend üblicher Konventionen (siehe [Bir09]) wird die Unsicherheit für die Effizienz  $\epsilon_\gamma$  mit 10 % abgeschätzt. In dieser Arbeit wurde die spezifische Aktivität von Cs-137 für alle Proben bestimmt. Dabei wurde die Auswertung mithilfe von Excel durchgeführt. Die Ergebnisse für die spezifische Aktivität von K-40 werden aus [Sch23] verwendet.

### 3.5.1 Erkennungs- und Nachweisgrenzen

Bei Messungen von Proben niedriger Aktivität stellt sich die Frage, ob ein Messwert aufgrund des Vorhandenseins eines Nuklids in der Probe auftritt oder auf statistischen Schwankungen des Untergrunds beruht.

Die Erkennungsgrenze beantwortet die Frage, ob der durch die Messgröße ermittelte physikalische Effekt charakteristisch vorliegt. Die Nachweisgrenze gibt an, ob das verwendete Messverfahren den gestellten Anforderungen ausreicht und damit für den vorgesehenen Messzweck passend ist [DIN11].

Für jeden Detektor wurde jeweils eine Probe mit geringer Aktivität ausgewählt. Anschließend wurde die Nettointensität der 661,66-keV-Linie des Ba-137m durch Abzug des Untergrundes ermittelt und untersucht, ob das Messergebnis über der Erkennungsgrenze liegt.

Die Erkennungsgrenze  $a^*$  lässt sich wie folgt berechnen:

$$a^* = k_{1-\alpha} \cdot \sqrt{\omega^2 \left( \frac{c_0^2(n_0)}{t_m^2} + \frac{z_0}{t_m^2} \right)} \quad (3.8)$$

Hierbei entspricht  $\omega = \frac{1}{m\epsilon p}$ .

Das Messergebnis liegt über der berechneten Erkennungsgrenze für die Aktivitätskonzentration.

Die Nachweisgrenze  $a^\#$  ist größer als die Erkennungsgrenze und wird definiert als:

$$a^\# = a^* + k_{1-\alpha} \cdot \sqrt{\tilde{a}_m^{\#2} \cdot u_{\text{rel}}^2(\omega) + \omega^2 \cdot \left( \frac{\tilde{a}_m^\#}{\omega t_m} + \frac{z_0}{t_m^2} + \frac{c_0^2(n_0)}{t_m^2} \right)}. \quad (3.9)$$

Der berechnete Wert der spezifischen Aktivität liegt um eine Größenordnung über der Nachweisgrenze  $a^\#$ .

Die Messdaten für die Erkennungs- und Nachweisgrenze können aus dem Anhang entnommen werden.

### 3.6 Messen von Ringversuchen zur Qualitätssicherung

Um die Genauigkeit der Aktivitätsmessungen am *Institut für Radioökologie und Strahlenschutz* (IRS) der Leibniz Universität Hannover zu überprüfen, nimmt das Institut an Ringversuchen teil. Hierbei wurden ältere Ringversuche gemessen und ausgewertet, wobei die Ergebnisse bekannt waren. Zur Überprüfung der Messungen stand eine Bodenprobe des Ringversuchs „IAEA-TEL-2012-03, world-wide open proficiency test“ des „INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA)“ zur Verfügung.

Mit der Folienmethode und einem QCY14-Flächenstandard wurden die Aktivitäten verschiedener Nuklide, unter anderem auch Cs-137 und K-40, ausgewertet. Die Abbildung 4 stellt die Ergebnisse der Messungen im Vergleich mit den Referenzwerten dar. Die ermittelten Aktivitäten werden auf das Referenzdatum 20.03.2023 zeitlich korrigiert.

Aus der Abbildung 4 ist zu entnehmen, dass eine gute Übereinstimmung der Messdaten, im Rahmen der Unsicherheiten, der IAEA und der eigenen Messungen besteht.

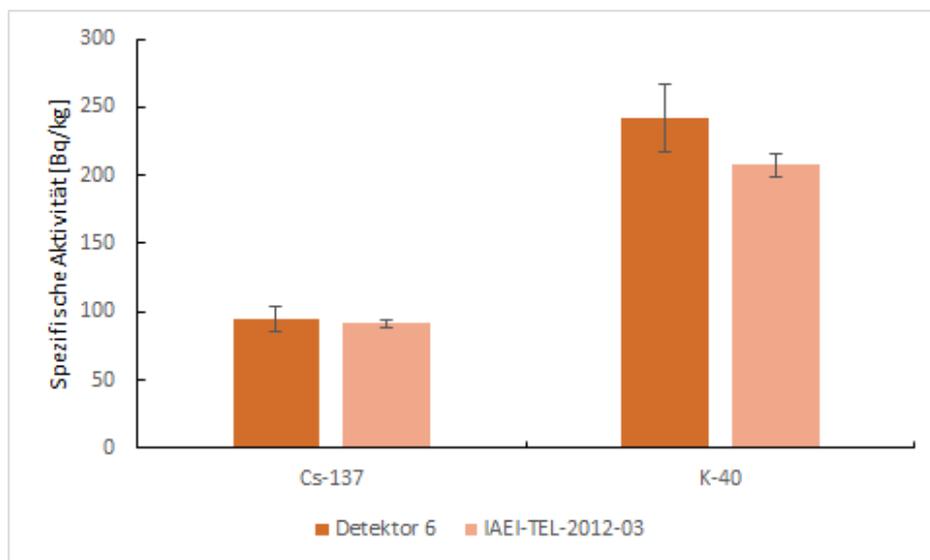


Abbildung 4: Vergleich zwischen Mess- und Referenzwert der Probe *IAEA-TEL-2012-03* des für die Arbeit verwendeten Detektors.

## 4 Probenahme, Messung und Auswertung der Bodenproben

### 4.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Die untersuchte Salzwiese befindet sich am Neßmersiel Hafen (siehe Abbildung 5), im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer, welcher neben den Salzwiesen auch die Wattflächen, Dünen und Strände umfasst. Insgesamt hat die Salzwiese, die im Sommer 2022 durch das Abtragen des Oberbodens und im Zuge von Kompensationsmaßnahmen großflächig renaturiert wurde, eine Fläche von rund 38 ha. Die Salzwiesenstruktur wurde gezielt verändert, indem das damalige mittlere Höhenniveau der Salzwiese tiefer abgesenkt wurde [LHM20]. Beim Oberbodenabtrag wurden in der Höhe nur wenige Zentimeter entfernt [Zer19].

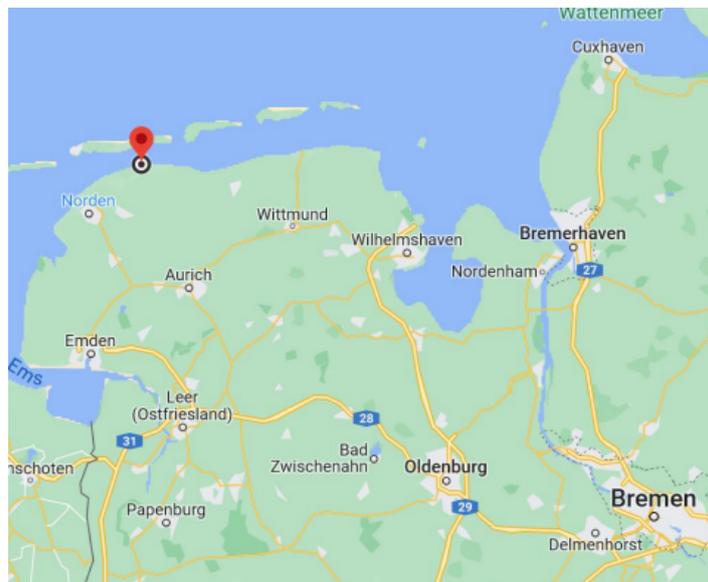


Abbildung 5: Standort des untersuchten Gebietes [Goo23].

### 4.2 Probenahme

Am 02.12.2022 fand die Beprobungsfahrt zum Neßmersiel Hafen statt. Die Probenahme wurde von Mitarbeitern des *Instituts für Radioökologie und Strahlenschutz* (IRS), in Begleitung von Mitarbeitern des LuFI, durchgeführt. Dabei wurden 21 Bohrkern aus sieben Messstellen entlang einer Linie genommen (siehe Abbildung 6). Die Gewinnung zylinderförmiger Bohrkern erfolgte mit einem speziellen Bohrgerät. Ein Bohrkopf wurde verwendet, um den Boden zu durchdringen und den Bohrkern zu extrahieren.

Es wurden an jeder Stelle drei Proben genommen, wobei jeweils zwei Proben im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit ausgewertet wurden und die dritte Probe als Archivmaterial dient. Das Probenahmeprotokoll sowie die GPS-Koordinaten der Messstellen befinden sich im Anhang.

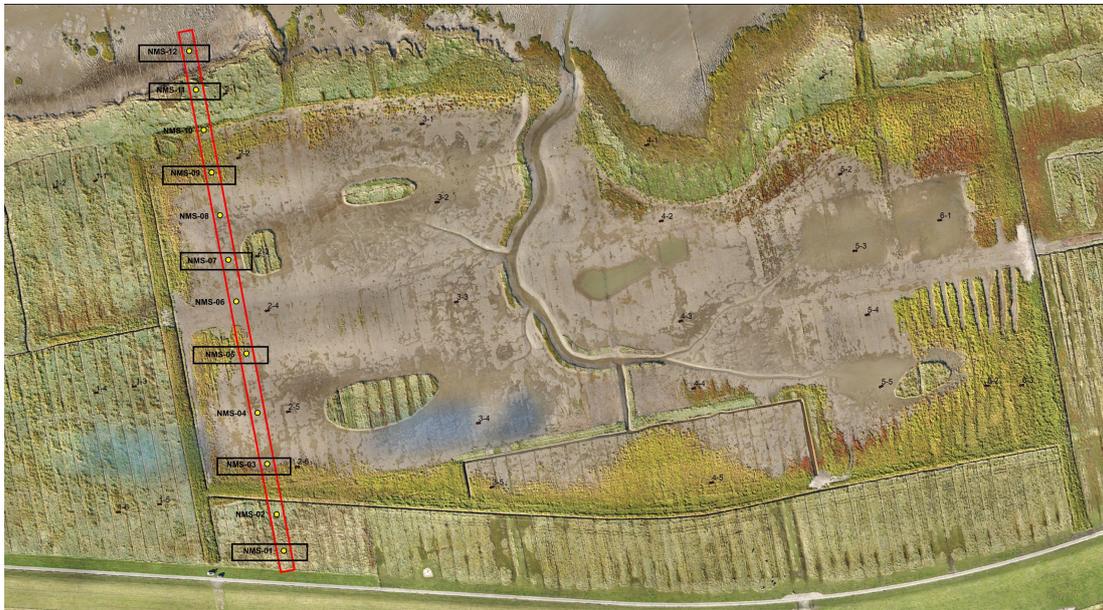


Abbildung 6: Aufnahme der Salzwiese von oben mit den sieben Probenahmepunkten (siehe schwarze Rechtecke) [Ten22].

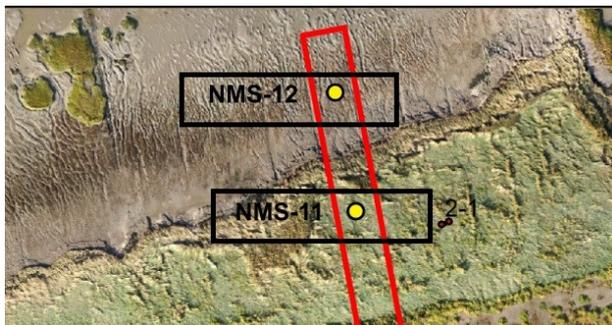


Abbildung 7: Ausschnitt aus Abb. 7 für die Standorte NMS-11 und NMS-12.

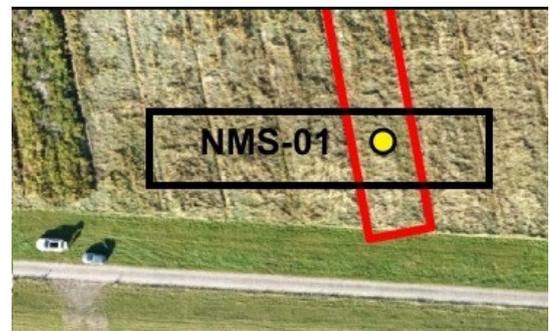


Abbildung 8: Ausschnitt aus Abb. 7 für den Standort NMS-01.

Im Folgenden wird eine Klassifizierung von Standorten vorgenommen. Hierzu wird zwischen renaturierten (NMS-03 bis NMS-09) und den unberührten Flächen (NMS-01 und NMS-11) sowie der Standort direkt im Watt (NMS-12) unterschieden.

Der Messstandort NMS-12 befindet sich direkt im Watt und wird somit regelmäßig im Rahmen der Gezeiten überflutet. Direkt südlich von dem Standort NMS-12 liegt NMS-11 mit vermehrten Quecken (eine Grasart), wobei dieser zwischen dem Watt und der renaturierten Fläche liegt (Abbildung 7). Hierbei handelt es sich um einen Bereich, der von den Renaturierungsmaßnahmen nicht betroffen ist. Der Bereich wurde also nicht umgestaltet und wird als eine klassische unberührte

Fläche betrachtet.

Der Probenahmepunkt NMS-01 ist der weit entfernteste Standort vom Watt und mit vielen Quecken umgeben (Abbildung 8). Außerdem ist dieser Standort ebenfalls nicht von den Renaturierungsmaßnahmen betroffen.

An den Standorten NMS-03, NMS-05, NMS-07 und NMS-09 wurde der Oberboden großflächig abgetragen (Abbildung 9), da in diesen Flächen die Salzwiese vorher insgesamt zu „hoch“ war und damit nicht mehr während Hochwasser oder Sturmfluten überbeflutet wurde.

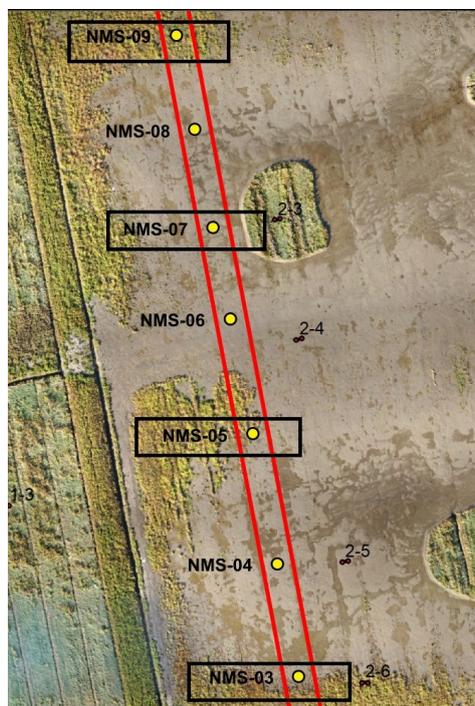


Abbildung 9: Ausschnitt aus Abb. 6 für die Standorte NMS-03, NMS-05, NMS-07 und NMS-09.

Die Entnahme der Bodenproben wurden mithilfe von Bohrstöcken durchgeführt, wobei diese 30 cm tief in die Böden gestochen wurden. Um zu vermeiden, dass die Proben sich gegenseitig kontaminieren, wurde nach jedem Durchgang die Bodenramme sorgfältig gereinigt. Pro Standort wurden drei Proben in einem Abstand von maximal 10 cm zueinander entnommen. Die Bodenproben wurden beschriftet und ohne weitere Bearbeitung ins IRS gebracht, wo sie in einen Gefrierschrank eingelagert wurden. Durch die Lagerung im Gefrierschrank konnten biologische Aktivitäten wie z.B. das Wachstum von Mikroorganismen, verlangsamt oder gestoppt werden. Somit konnten die ursprünglichen Eigenschaften der Bodenprobe erhalten bleiben und mögliche Veränderungen minimiert werden.

### 4.3 Probenaufbereitung

Die Bohrkern wurden in horizontale Abschnitte unterteilt und analysiert. Hierzu wurde zunächst die effektive Höhe der einzelnen Bodensäulen bestimmt, wobei die gemessenen Höhen untereinander nicht einheitlich waren (siehe Tabelle 3 im Anhang). Daraufhin wurde angenommen, dass die Bodensäulen eine gemeinsame Anfangshöhe von 30 cm besitzen und im weiteren Schritt wurden die Bodensäulen in vier gleich große Segmente unterteilt. Durch das Vierteln wurden die Höhen auf 30 cm zurück korrigiert. Aufgrund der geringen Probemenge erschien eine höhere Anzahl an Segmenten nicht als sinnvoll. Es ergibt sich folgendes Tiefenprofil, wobei XY der jeweilige Standort und NMS eine verwendete Abkürzung für Neßmersiel, die vom LUFU gewählt wurde. Diese Notation wurde für die vorliegende Arbeit übernommen:

1. NMS-XY-04 = 1. Tiefenprofil: 0-7,5 cm.
2. NMS-XY-03 = 2. Tiefenprofil: 7,6-15 cm.
3. NMS-XY-02 = 3. Tiefenprofil: 15,1-22,5 cm.
4. NMS-XY-01 = 4. Tiefenprofil: 22,6-30 cm.

Nachdem das Tiefenprofil ermittelt wurde, wurden zwei Säulen eines Messpunktes ausgewählt und in vier gleich große Segmente aufgeteilt. Anschließend wurden die Probenrohre im gefrorenen Zustand zersägt und in Keramikschaalen gefüllt, welche zuvor mit Aluminiumfolie ummantelt wurden. Im weiteren Verlauf wurden die Bodenproben bei 105 Grad Celsius getrocknet und anschließend zerkleinert. Hierbei war die Trocknung notwendig, um das Verdunsten des Wassers in den Bodenproben zu erreichen und eine konsistente Basis für weitere Untersuchungen, wie die Bestimmung des Trockengewichts, zu schaffen. Die Trocknungstemperatur von 105 Grad Celsius ist ein gängiger Standardwert, welcher in vielen bodenkundlichen Untersuchungen verwendet wird. Zum Teil waren noch Steine, Muscheln sowie deutlich sichtbare organische Bestandteile wie Wurzelmaterial zu sehen.

Ein weiterer Zweck der Trocknung ist das Erreichen der Gewichtskonstanz. Hierbei werden die aus dem Ofen entnommenen Schalen in Exsikkatoren gelegt, da festgestellt wurde, dass die vorliegenden Bodenproben hygroskopisch sind. Nach dem Abkühlen in den Exsikkatoren wurden die Proben mit einer Feinwaage abgewogen, wobei hier beachtet wurde, dass der Unterschied maximal 0,02 g betrug.

Nachdem dieser Schritt abgeschlossen war, wurden nun die sichtbaren Bestandteile, die nicht zum Boden gehörten, mit einem Sieb der Maschenweite 1 mm entfernt und gemörsert. Das Mörsern sorgte für eine Trennung des klumpigen Bodens. Das hierzu geführte Labortagebuch befindet sich im Anhang. Bei allen Bodenproben war genug Material vorhanden, um das Volumen einer Petrischale ausreichend auszufüllen. In Tabelle 4 sind die Probenmassen (getrocknet) dargestellt, welche für die Berechnung der spezifischen Aktivität verwendet werden.



Abbildung 10: Die zerkleinerten Bodenproben, die sich in den Keramikschalen befinden, wurden in den Ofen gelegt und für mindestens 24 Stunden bei 105 Grad Celsius getrocknet. Die weißen Keramikschalen, ohne Aluminium, waren Versuchsproben für das Zersägen und Zerkleinern.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Für diese Arbeit wurden 28 Bodenproben von sieben Standorten entlang der Salzwiese entnommen und gammaspektrometrisch analysiert. In den Bodenproben aus der renaturierten Salzwiese, in je vier der Tiefenprofilen, konnten die Radionuklide K-40 und Cs-137 nachgewiesen werden.

Von Interesse ist die Aktivität von Cs-137 in den verschiedenen Bodenschichten-Tiefen. Mit Hilfe der Datierung erfolgt damit eine Altersbestimmung für die verschiedenen Standorte der Salzwiese. Zur Datierung werden die historischen Ereignisse, der Unfall von Tschernobyl sowie das prä nukleare Zeitalter, hinzugezogen. Hierzu wird eine 3-Punkt-Kalibrierung durchgeführt. Anhand des Steigung werden dann die Sedimentationsraten bestimmt, da diese angeben wie stark sich die Dicke des Sediments pro Jahr verändert. Im Anschluss erfolgt eine Beurteilung, wie sich die Salzwiese bis zum jetzigen Zeitpunkt entwickelt hat.

Eine weitere der häufigsten radiometrischen Methoden ist die Datierung mit Hilfe des natürlich vorkommenden radioaktiven Isotops Pb-210. Hierzu wird in einer anderen Arbeit das C.I.C.-Modell (constant initial concentration) zur Berechnung des Alters der jeweiligen Tiefe im Vergleich zur Oberfläche verwendet, wobei hier angenommen wird, dass bei der untersuchten Salzwiese konstante Oberflächenkonzentration von Blei vorliegt [Sch23].

Die Sedimentationsraten, die in [Sch23] bestimmt wurden, werden mit den in dieser Arbeit ermittelten Sedimentationsraten verglichen und diskutiert. In einer weiteren Datierungstechnik werden die Cs-137-Aktivitäten gegen die in der Pb-210-Datierung bestimmten Alterswerte der Bodenschichten aufgetragen. Solch eine Datierungstechnik wurde ebenfalls in [FL91] verwendet und lieferte wertvolle Erkenntnisse über das Tiefenprofil der Cs-137-Aktivität einer Küste.

## 5.1 Korngrößenanalyse

Des Weiteren werden anhand von bodenkundlichen Informationen zusätzliche Interpretationen für die Cs-137-Verteilungen an den jeweiligen Standorten durchgeführt. Die Korngrößenverteilung gibt für eine Bodenart die Massenanteile der enthaltenen Körnungsgruppen in Gewichtsprozenten an. Das Verfahren zur Ermittlung der Korngrößenverteilung wurde von einer Mitarbeiterin vom IRS durchgeführt und die Ergebnisse wurden zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 5 im Anhang).

Die Körnung teilt sich in drei Korngrößen auf: Sand (63- 1000  $\mu\text{m}$ ), Schluff (2-63  $\mu\text{m}$ ) und Ton (< 2  $\mu\text{m}$ ). Hierzu wurden 6 Bodenproben von drei Standorten untersucht, wobei jeweils die oberste und unterste Schicht gewählt wurde.

Aus der Abbildung 11 ist zu entnehmen, dass die unterste und oberste Tiefenschicht von dem Standort NMS-01 einen deutlich geringeren Anteil (6 %) an Sand besitzen. NMS-01-01 hat einen Anteil von 54 % an Schluff und 39 % an Ton, wohingegen bei NMS-01-04 ein überwiegender Anteil von 86 % an Schluff und 8 % an Ton vorliegt.

Die oberste Schicht von NMS-03 weist gegenüber NMS-01-01 einen gleichen Anteil an Ton, Schluff und Sand auf. Die unterste Schicht hingegen hat einen Anteil von 20 % an Sand und überwiegend Schluff mit einem Anteil von 50 % sowie einem Tongehalt von 30 %.

Die zwei Proben aus dem Standort NMS-11 haben beide einen überwiegenden Anteil an Sand (über 50 %) und einen kleinen Anteil an Ton und Schluff.

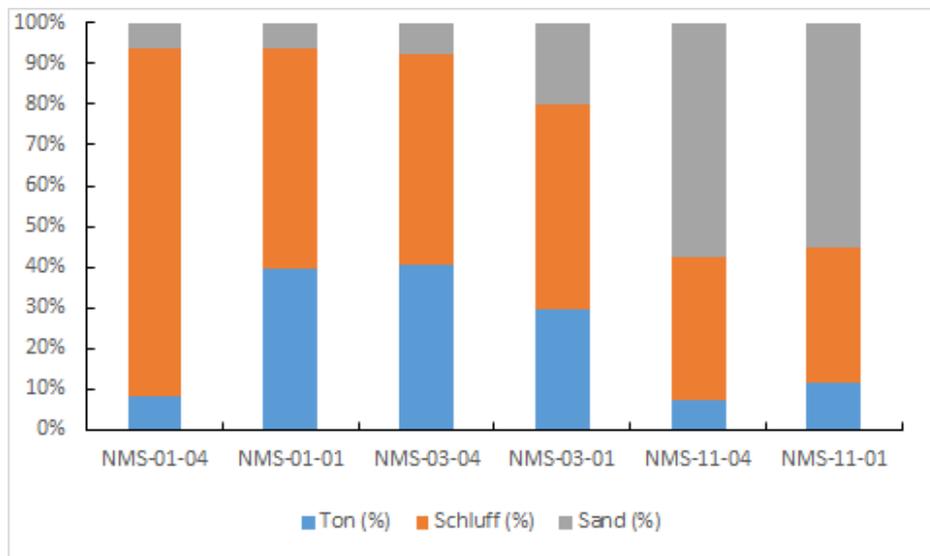


Abbildung 11: Graphische Darstellung der Ergebnisse der Korngrößenverteilung. Die Tabelle hierzu befindet sich im Anhang, Tabelle 5.

## 5.2 K-40

In Abbildung 12 sind die Messwerte der spezifischen Aktivität von K-40 grafisch dargestellt, welche aus [Sch23] entnommen wurden. Die Messwerte befinden sich in Tabelle 6 im Anhang. Insgesamt sind die K-40-Gehalte recht gleichmäßig über die Standorte verteilt. Der Mittelwert über alle Standorte beträgt 874 Bq/kg. Der durchschnittliche Gehalt an K-40 beträgt in der Erdkruste 605 Bq/kg [Pet+05]. Für Böden in Deutschland sind für die spezifischen Aktivitäten von K-40 Werte zwischen 16 bis 2.960 Bq/kg angegeben [Pet+05]. Die für diese Arbeit berechneten Werte liegen in diesem Bereich und überschreiten die oben genannte durchschnittliche spezifische Aktivität.

Am Standort NMS-03 tritt in der obersten Tiefenschicht (NMS-03-04) ein Maximum mit einem Wert von  $(1510 \pm 152)$  Bq/kg auf. Dieser Standort und der Standort NMS-01 besitzen im Durchschnitt die höchsten K-40-Werte wohingegen NMS-09 den im Durchschnitt niedrigsten K-40-Wert annimmt.

Die spezifische Aktivität von K-40 liegt nicht nur oberflächennah in der gleichen Größenordnung, sondern auch bei den Profilen bis zu einer Tiefe von 30 cm.

Trotz der verschiedenen Korngrößen in den Bodenschichten (Abbildung 11) ergeben sich konstante K-40-Werte über alle Standorte.

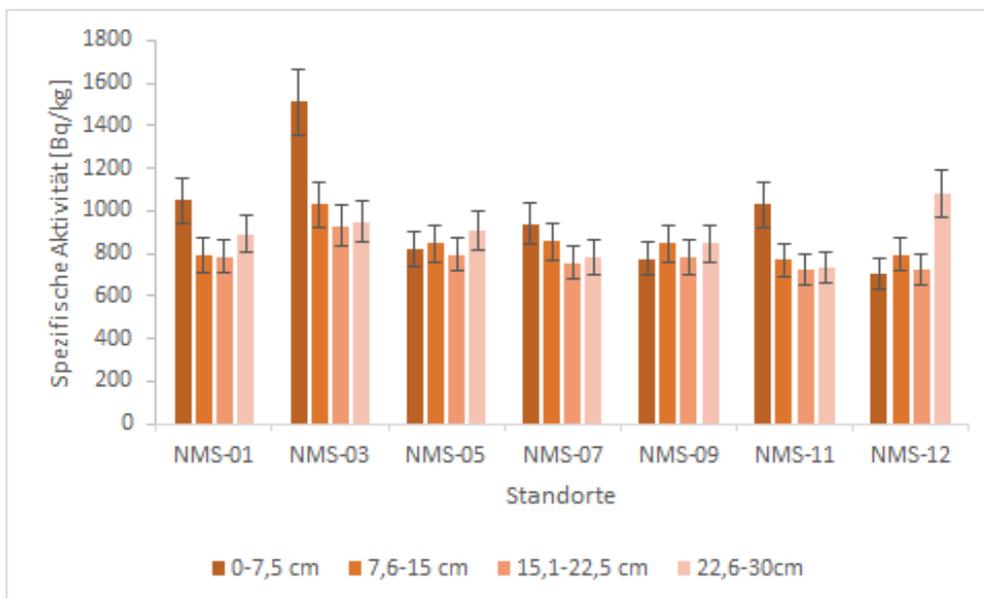


Abbildung 12: Graphische Darstellung der spezifischen Aktivität von K-40 in den Bodenproben von den jeweiligen Standorten für die Tiefenprofile.

### 5.3 Cs-137

In Abbildung 13 sind die Messwerte für die spezifische Aktivität von Cs-137 grafisch dargestellt. Der höchste Wert der Cs-137-Aktivität in den gemessenen Bodenproben wurde in der obersten Schicht (0-7,5 cm) am Standort NMS-03 gemessen, welcher  $(32,2 \pm 3,2)$  Bq/kg beträgt.

Eine deutliche Abnahme ab der dritten zur vierten Tiefenschicht von den Standorten NMS-01, NMS-05 und NMS-07 ist zunächst auffallend. Der Standort NMS-11 besitzt im Durchschnitt, mit einem Wert von  $(1,3 \pm 0,2)$  Bq/kg, die geringste spezifische Aktivität. Zwischen den zwei Standorten NMS-09 und NMS-11 nimmt die spezifische Aktivität von Cs-137 signifikant ab. Von NMS-11 zu NMS-12 steigt sie wieder deutlich. Beim Standort NMS-12 ist außerdem eine Zunahme der spezifischen Aktivität ab einer Tiefenschicht von 15,1 cm zu beobachten.

Der Mittelwert der Cs-137-Aktivität über alle Standorte beträgt  $(9 \pm 0,9)$  Bq/kg. Als Vergleichswert wird der Mittelwert der Cs-137-Konzentration aus dem Jahr 2019 für Böden aus Niedersachsen bei einer Beprobungstiefe von 30 cm hinzugezogen. Dieser beträgt 6,7 Bq/kg bei einem Maximalwert von 13,8 Bq/kg und 25 Messwerten [Pet+20]. Die Messergebnisse dieser Arbeit lassen sich dieser Größenordnung zuordnen.

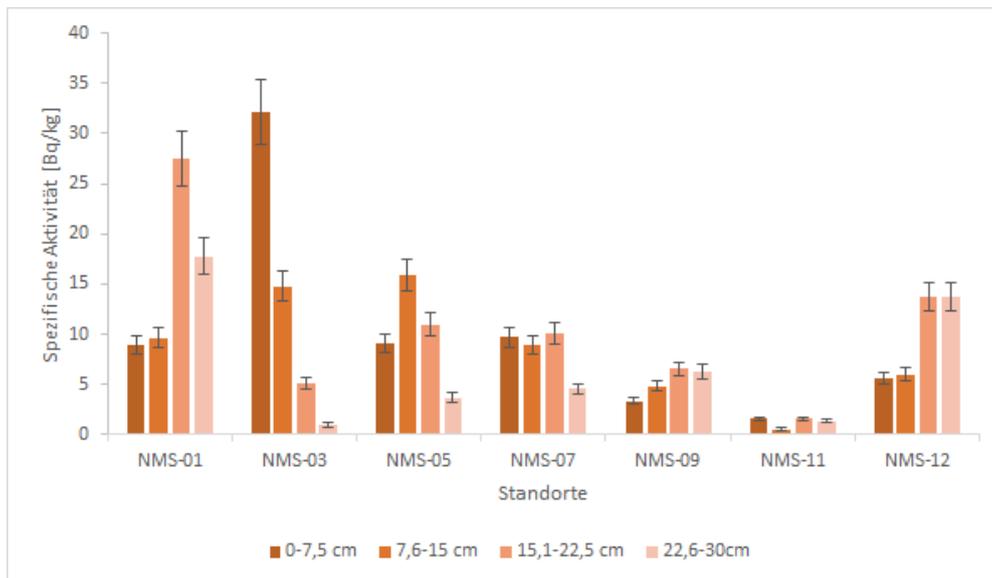


Abbildung 13: Graphische Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in den Bodenproben von den jeweiligen Standorten für die Tiefenprofile von den kombinierten Bohrkernen NMS-01+03. Die Messdaten können aus Tabelle 8 im Anhang entnommen werden.

### 5.3.1 Datierung von Cs-137

Im Folgenden wird eine Datierung für den kombinierten Bohrkern NMS-01 und NMS-03 vorgestellt. Im Weiteren wird die Cs-137-Aktivität gegen das Alter des Sediments aufgetragen, wobei die Alterswerte in der Pb-210-Methode von [Sch23] berechnet wurden.

Zunächst wird eine Datierung von den kombinierten Bohrkernen NMS-01 und NMS-03 durchgeführt, da durch die Kombination in ein größeres Bodenprofil betrachtet werden kann. Der Bohrkern am Standort NMS-03 wurde tiefer als Bohrkern NMS-01 genommen, welches zuvor auch bei der Bestimmung der effektiven Höhe aufgefallen ist (siehe Tabelle 3 im Anhang). Des Weiteren wurde ein Gestaltungskonzept der Salzwiese vom LuFI zur Verfügung gestellt, woraus die Höhendaten für die jeweiligen Standorte entnommen wurden (siehe Abbildung 23 im Anhang). Die Standorte NMS-01 und NMS-03 liegen dicht beieinander. Somit kann davon ausgegangen werden, dass NMS-01 und NMS-03 vergleichbare Anfangsbedingungen vor der Renaturierungsmaßnahmen haben. Aus der Abbildung 23 ist zu entnehmen, dass NMS-01 ( $20 \pm 4$ ) cm höher als NMS-03 liegt. Dies ist auf das Abtragen vom Boden zurückzuführen. Außerdem wird angenommen, dass die drei untersten Bodenschichten von NMS-03 genau wie NMS-01 unbeeinflusste Messpunkte sind. Demnach werden NMS-01 und NMS-03 als ein Bohrkern betrachtet. Hierzu wird die oberste Tiefenschicht, NMS-03-04, vernachlässigt, da diese von Bodenbearbeitungen stark beeinflusst wurde. Ergänzend lässt sich noch sagen, dass hinsichtlich der Korngrößenverteilung eine Ähnlichkeit von NMS-01 und NMS-03 auftritt (siehe Abbildung 11).

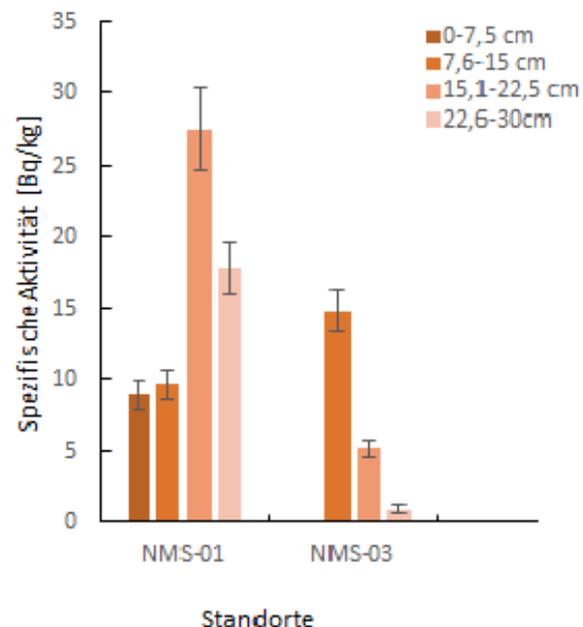


Abbildung 14: Graphische Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 für den kombinierten Bohrkern NMS-01+03, wobei NMS-03-04 vernachlässigt wurde.

Abbildung 14 stellt das Zusammenfügen der zwei Standorte dar. Anhand der Kombination kann ein tieferes Bodenprofil als 30 cm untersucht werden.

Für die folgende Datierung werden drei signifikante Punkte ausgewählt, um eine 3-Punkt-Kalibrierung durchzuführen. Der erste Zeitpunkt NMS-01-04 mit einer Tiefe von 3,75 cm ist die Probenahme mit der Jahreszahl  $(2022 \pm 1)$ , da diese am 02.12.2022 stattgefunden hat. Der zweite Zeitpunkt NMS-01-02 mit einer Tiefe von 18,75 cm ist der Unfall von Tschernobyl, welcher im April 1986 geschah, mit  $(1988 \pm 2)$  Jahren. Bei diesem bekannten Ereignis wurde eine erhebliche Menge an Cs-137 freigesetzt. Die Zeitauswahl basiert auf die Verteilung und Ablagerung von Cs-137 nach dem Unfall, da die Transferzeit des Fallout über die Stratosphäre hinzukommt. Dieser ausgewählte Zeitpunkt entspricht dem Maximum aus Abbildung 14. Der dritte ausgewählte Zeitpunkt NMS-03-01 mit einer Tiefe von 46,25 cm umfasst das prä nukleare Zeitalter mit einer gewählten Jahreszahl von  $(1930 \pm 2)$ . Die Zeit vor dem Einsatz der technischen Kernspaltung wird prä nukleare Zeit genannt. Dies kann als Referenzpunkt dienen, da es den natürlichen Hintergrundgehalt von Cs-137 berücksichtigt, bevor anthropogene Quellen vorhanden waren.

Mittels einer linearen Regression werden die Werte für die Steigung und für den Schnittpunkt mit der Y-Achse bestimmt (siehe Abbildung 15). Die Regressions-Statistik kann aus Tabelle 7 im Anhang entnommen werden.

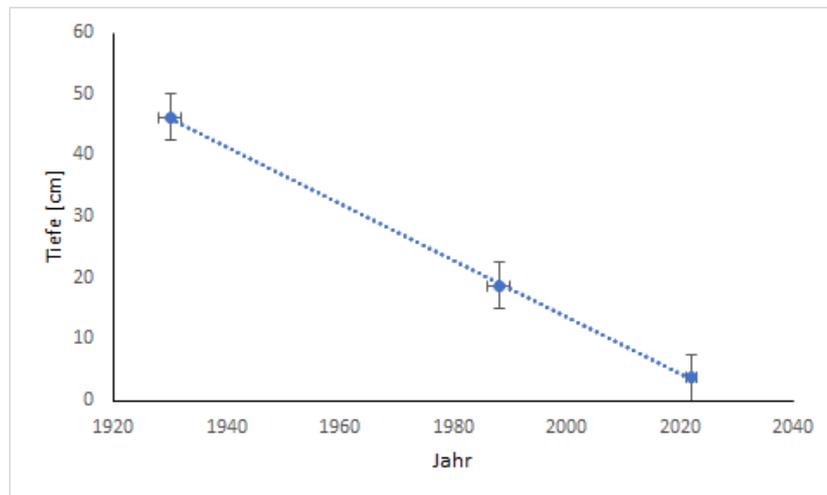


Abbildung 15: Darstellung der Tiefe in Abhängigkeit zu den drei ausgewählten signifikanten Punkten NMS-01-01, NMS-01-04 und NMS-03-01. Der lineare Fit  $y = a + b \cdot x$  liefert für  $a$  einen Wert von  $(940,18 \pm 17,17)$  cm und für  $b$   $(-0,46 \pm 0,009) \frac{\text{cm}}{\text{a}}$ .

Der Fit liefert eine Sedimentationsrate von  $0,46 \frac{cm}{a}$ . Diese Sedimentationsrate wird durch die Pb-Datierung von [Sch23] mit einer ermittelten Sedimentationsrate von  $(0,52 \pm 0,04) \frac{cm}{a}$  unterstützt. Seit  $(1930 \pm 2)$  bis zum Jahr  $(2022 \pm 1)$  haben sich etwa 0,5 cm Sediment pro Jahr für den Bereich NMS-01+NMS-03 akkumuliert, welches der natürlichen Entwicklung einer Salzwiese nahe liegt. Dennoch sind die vorherrschenden geologischen und klimatischen Bedingungen der Salzwiese zu berücksichtigen, da diese Faktoren die Sedimentationsrate beeinflussen können.

Ferner werden die in [Sch23] bestimmten Alters-Werte der Bodenschichten verwendet, um auftretende Maxima sowie Minima in der Cs-137-Verteilung von den Standorten zuordnen zu können. Wie in der ersten Datierungstechnik werden die Standorte NMS-01 und NMS-03 als ein Bohrkern betrachtet. Auch hier wird die oberste Schicht NMS-03-04 vernachlässigt. Abbildung 16 stellt einen linearen Zusammenhang zwischen der Tiefe des Bodens und dem Alter des Segments nach der Pb-210-Methode dar, welches aus der Arbeit von [Sch23] entnommen wurde.

Nun wird Wert für das Alter der Bodenschicht gegen die spezifische Aktivität von Cs-137 des jeweiligen Messpunktes aufgetragen (siehe Abbildung 17). Die Werte können aus Tabelle 9 im Anhang entnommen werden.

Aus Abbildung 17 ist zu entnehmen, dass sich bei der untersten Bodenschicht (NMS-03-01) ein Alter von 74 Jahren, mit einer hohen Unsicherheit von 10 Jahren, ergibt. Daraufhin folgt ein Anstieg bis zu der Bodenschicht NMS-01-02, wobei das Alter hier  $(32 \pm 6)$  Jahren entspricht. Ab NMS-01-03 nimmt die Konzentration schnell ab und bleibt seit etwas mehr als 10 Jahren bei einem gleich bleibenden Niveau, welches auch als *Cs-Background* bezeichnet werden kann.

Das Maximum von NMS-01-02 ist auf den Eintrag aus dem Reaktorunfall in Tschernobly im Jahr 1986 zurückzuführen. Für das Alter von NMS-01-04 wird ein definierter Wert von Null gesetzt und erstreckt sich über die gesamte oberste Schicht.

Insgesamt lassen die Cs-137-Verteilungen eine grobe Datierung zu, sodass die auffälligen Peaks in den Verteilungen von Cs-137 historischen Ereignissen zugeordnet werden können. Des Weiteren wird anhand der Datierung mit den Cs-137-Werten bestätigt, dass die sieben Messwerte im Einklang zueinander stehen, was auch mit Pb-210-Datierung nachgewiesen wurde (siehe Abbildung 16).

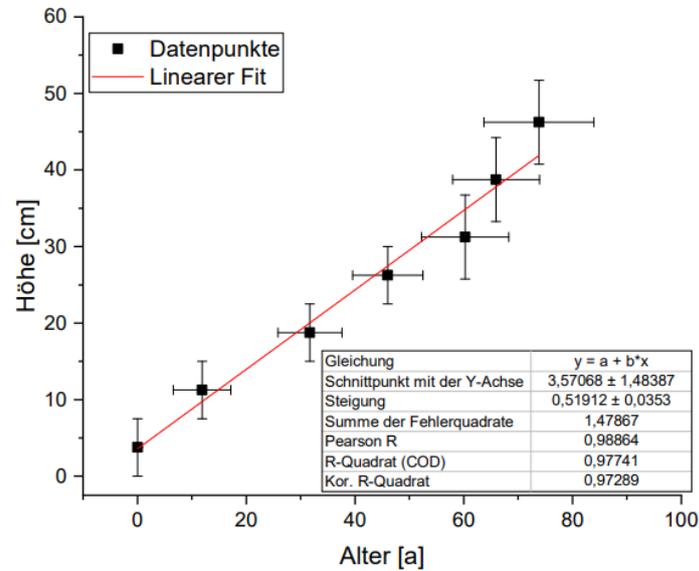


Abbildung 16: Abbildung wurde übernommen aus [Sch23]. Darstellung der Tiefe in Abhängigkeit zum berechneten Alter von dem kombinierten Bohrkern NMS-01+03. Hierzu wurde ein linearer Fit angewendet. Die Steigung beschreibt die Sedimentationsrate und liegt bei  $0,52 \frac{cm}{a}$ . Die genauen Messwerte befinden sich in Tabelle 9 im Anhang.

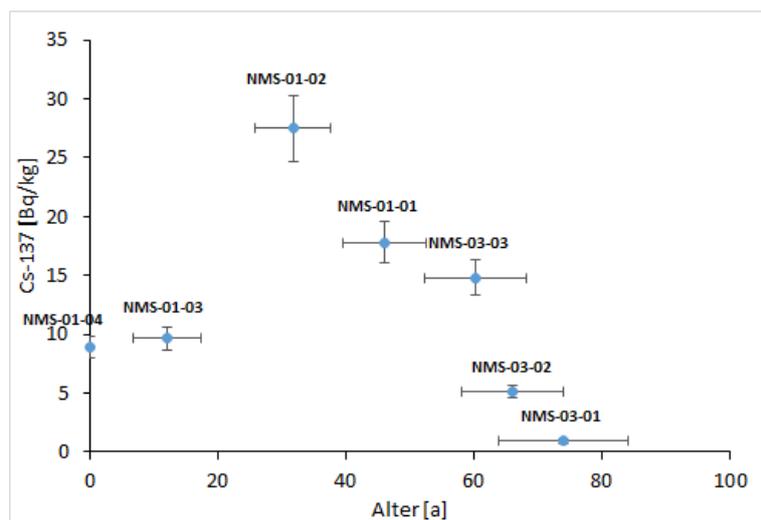


Abbildung 17: Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für die kombinierten Bohrkern NMS-01+03. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen und befinden sich in Tabelle 9 im Anhang.

Im Folgenden wird eine Datierung am Standort NMS-05 angewendet. Dieser Bereich gehört zu der Kategorie der beeinflussten Messpunkte, da hier der Oberboden abgetragen wurde. Hierzu wurde angenommen, dass die oberste Bodenschicht aufgrund der Bodenbearbeitungen sowie Bodenbewegungen stärker als die tieferen Bodenschichten beeinflusst wurde. Somit wird NMS-05-04 vernachlässigt. In Abbildung 18 ist eine Datierung von Cs-137 abgebildet, wobei sich die Messwerte in Tabelle 10 im Anhang befinden.

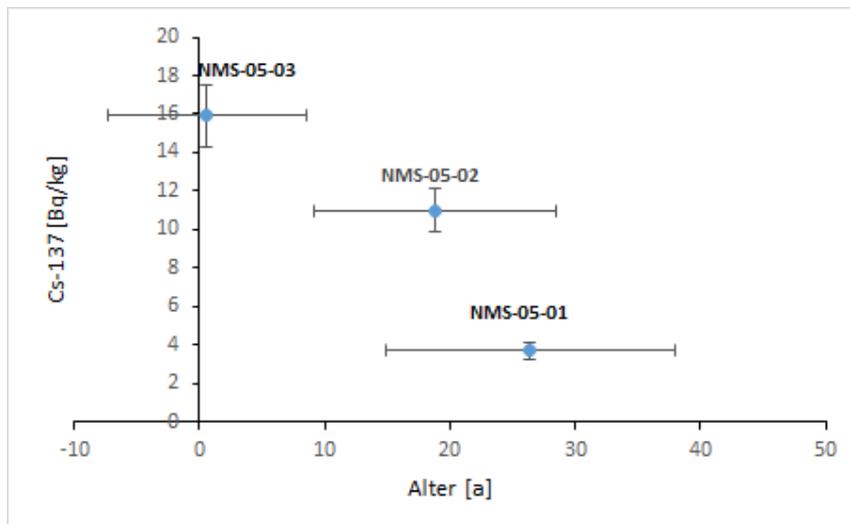


Abbildung 18: Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für den Standort NMS-05. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen.

An dem Standort NMS-05 ist zu beobachten, dass mit zunehmender Tiefe das Alter zunimmt und zugleich die Cs-137-Aktivität abnimmt. Hierbei liegt NMS-05-01 ( $26 \pm 12$ ) Jahre zurück, wohingegen NMS-05-03 ( $1 \pm 8$ ) Jahre zurückliegt.

Laut der Abbildung 18 nimmt die Cs-137-Aktivität mit zunehmenden Alter deutlich ab, was auch in der Pb-210-Datierung [Sch23] festgestellt wurde. Dem steht entgegen, dass, die Aktivität von Cs-137 mit zunehmender Tiefe eher steigen sollte. Aufgrund des Unfalls von Tschernobyl, welches 37 Jahre zurückliegt, sollte ein Peak mit zunehmender Tiefe nachweisbar sein. Dies ist in der Abbildung 18 nicht zu sein, da NMS-05-01 eine Cs-137-Minimum annimmt und eine niedrige Aktivität von ( $3,7 \pm 0,4$ ) Bq/kg besitzt. Daraus folgt, dass es sich um das Resultat eines anthropogenen Eingriffs handelt. Für diesen Standort liegen keine Ergebnisse für die Korngrößenanalyse vor, sodass bodenkundliche Interpretation nicht gemacht werden können. Außerdem ist der grafische Verlauf mit Vorsicht zu betrachten, da die Jahreszahlen fragwürdig sind. In der Arbeit von [Sch23] wurde bereits erwähnt, dass die Jahreszahlen für NMS-05 unpassend sind. Für Pb-210 ist allerdings die Steigung von großer Bedeutung, da mit zunehmender Tiefe die Konzentration von Pb-210 abnimmt, da es tendenziell an der Oberfläche bleibt [Sch23].

NMS-07 ist ein weiterer Standort, der von der Renaturierung betroffen, da insbesondere auf dieser Fläche der Boden abgetragen wurde. In der Abbildung 19 ist die angewandte Datierung zu sehen. Die Messwerte können aus der Tabelle 11 im Anhang entnommen werden. Auch zu diesem Standort liegen keine Informationen über die Korngrößen des Bodens vor.

NMS-07-04, die oberste Schicht, kann auch hier vernachlässigt werden, da eine neue und vor allem junge Bodenschicht hinzugekommen ist. Die zweite und dritte Tiefenschicht, NMS-07-02 und NMS-07-03, liegen dicht beieinander, sodass sie etwa einem gleichen Alter entsprechen. Ein großer Altersunterschied zwischen der obersten Schicht und NMS-07-03 ist auffallend. Des Weiteren ist ein Minimum an NMS-07-01 zu beobachten.

In der Arbeit von [Sch23] wurde bereits erläutert, dass die Altersdatierung an diesem Standort eine Herausforderung stellt, was auch hier der Fall ist. Es ist zu beachten, dass die dargestellten Messwerte für das Alter in der Realität älter sein müssten.

Aufgrund der Cs-137-Verteilung an diesem Standort kann angenommen werden, dass sich Cs-137 nicht wie bei Entstehung der Bodenschicht angereichert hat. Ergänzend lässt sich noch sagen, dass NMS-07-02 und NMS-07-03, die in den oberen Schichten zusammengeschoben sind, eine kleine Migrationsgeschwindigkeit vertreten.

Wie am Standort NMS-05 ist ein Tschernobyl-Peak bei etwa 37 Jahren zu erwarten. Hier liegt NMS-07-01 jedoch ( $29 \pm 12$ ) Jahre zurück und aufgrund der hohen Unsicherheit und der geringen Cs-137-Aktivität erscheint ein Einordnen in den Unfall von Tschernobyl nicht sinnvoll.

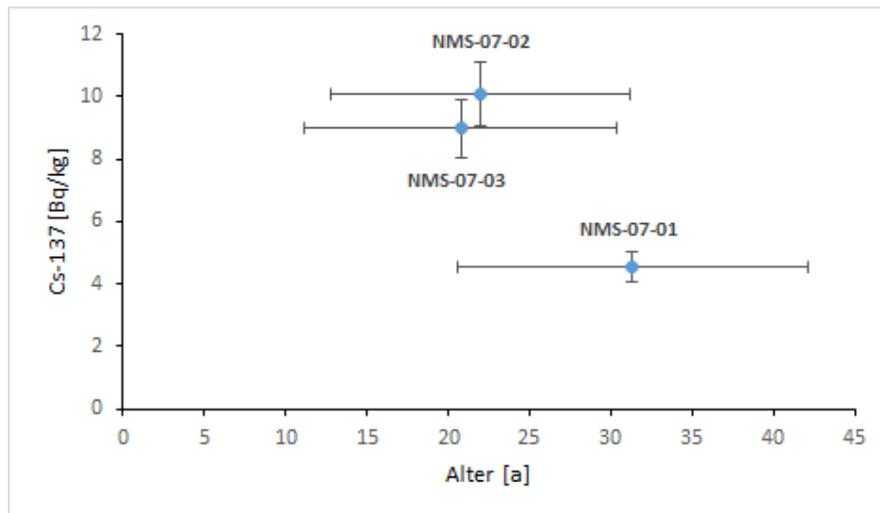


Abbildung 19: Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für den Standort NMS-07. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen.

Eine weitere Herausforderung stellt der Standort NMS-09 dar, der zu den beeinflussten Messpunkten gehört. Die zuvor verwendeten Datierungstechniken können hier nur fraglich angewendet werden. Aus Abbildung 20 ist zu entnehmen, dass die Bohrkerne auffallend große Unsicherheiten besitzen. Insbesondere NMS-09-02 mit  $(0,05 \pm 6,5)$  Jahren. Des Weiteren ist aus der Abbildung 20 zu entnehmen, dass die drei untersten Schichten kontinuierlich auf einer Aktivität trotz steigendem Alter bleiben.

Auch an diesem Standort wurde die Bodenstruktur durch menschliche Aktivitäten stark verändert, vor allem durch das Abtragen des Oberbodens [Zer19]. Solch Baumaßnahmen führen zu Verschiebungen, Verlagerungen oder Zerstörungen von Bodenschichten. Dies führt zu Schwierigkeiten bei der Interpretation der Tiefenschichten, was die Datierung erschwert. Abbildung 20 veranschaulicht dies.

Des Weiteren kann auch eine Bodenerosion eine starke Veränderung der Bodenstruktur bewirken, in dem sie Sedimente entfernt oder Ablagerungen hinzufügt [Sta+08]. Dies kann dann zu fehlerhaften Datierungen führen, da nicht klar zwischen den Bodenschichten unterschieden werden kann.

Der Probenahmepunkt NMS-09 wurde somit am meisten gegenüber NMS-03, NMS-05 und NMS-07 von den Maßnahmen belastet. Eine Anwendung mit den verwendeten Datierungstechniken in den obersten 30 cm kann hier nicht angewendet werden, da keine typische Sedimententwicklung bzw. -struktur nachweisbar ist. In Folge kann an diesem Standort kein Bezug zu einem Tschernobyl-Peak gemacht werden.

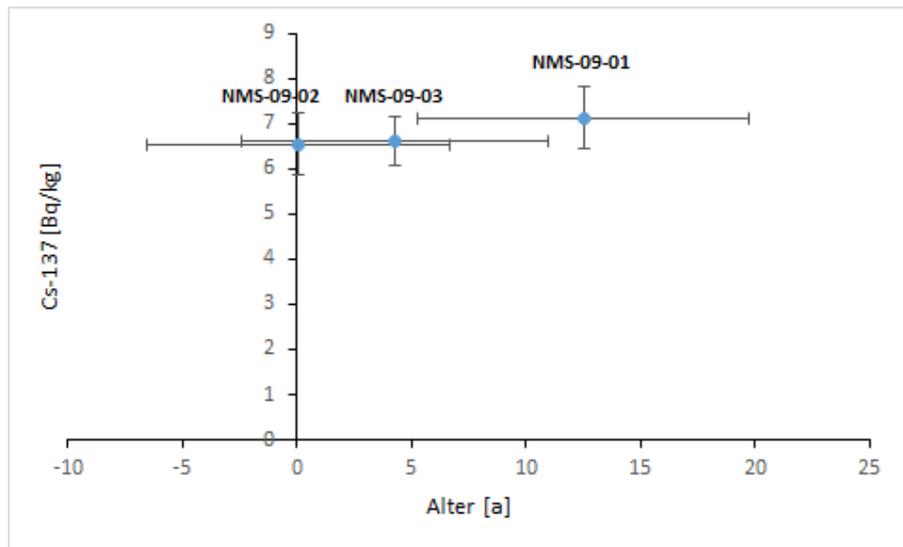


Abbildung 20: Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für den Standort NMS-09. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen.

NMS-11 gehört zu den unbeeinflussten Messpunkten. Auch hier wird zunächst eine Datierung angewendet (siehe Abbildung 21). Dort ist bei der untersten Tiefenschicht ein Alter von  $(17 \pm 9)$  Jahren zu beobachten, wobei hier die hohe Alters-Unsicherheit von neun Jahren auffällig ist. Des Weiteren sind die geringen Alter der Segmente nicht zu übersehen. Das Cs-137-Minimum liegt bei NMS-11-03 mit einem Alter von  $(5 \pm 9)$  a. Die Aktivität von Cs-137 verändert sich ab NMS-11-02 nur um 0,2 Bq/kg.

In der Pb-210-Methode konnte ein steigendes Alter mit zunehmender Tiefe nachgewiesen werden [Sch23]. Des Weiteren ist ein Einordnen in ein historisches Ereignis wie der Unfall von Tschernobly nicht möglich. Aufgrund der relativ hohen Unsicherheiten der Alters-Werte, sind diese mit Vorsicht zu verwenden. Aus Abbildung 13 wurde bereits nachgewiesen, dass dieser Standort im Durchschnitt die geringste spezifische Cs-137-Aktivität im Vergleich zu den anderen Standorten besitzt. Mit den Ergebnissen der Korngrößenanalyse kann eine Interpretation der Cs-137-Verteilung gemacht werden. Da sich dieser Standort an der seeseitigen Salzwiesenkante befindet, werden deshalb die Strömungen oft von Sedimenttransport begleitet [Sta+08]. Die Sedimentationsrate an diesem Standort wäre folglich hoch, welches durch die in [Sch23] bestimmte Sedimentationsrate bestätigt wird. Außerdem weist dieser Standort im Gegensatz zu den anderen Standorten einen sehr hohen Anteil an Sand auf (siehe Abbildung 11). Das Angebot an Tonmineralien, die die Radionuklide binden können, ist bei sandigen Böden gering [Lan04]. Da an der Nordsee wechselhafte und stürmische Wetterbedingungen herrschen, werden Partikel im Wind mitgeweht. Hierbei bleibt der Sand überwiegend liegen, wohingegen Ton und Schluff weitergeweht werden.

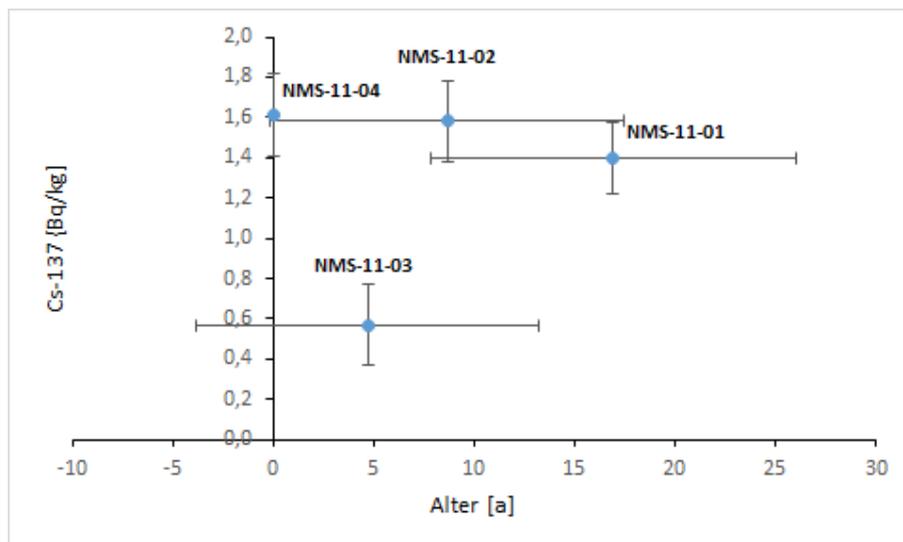


Abbildung 21: Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für den Standort NMS-11. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen.

Am letzten Standort NMS-12, der sich direkt im Watt befindet, scheint eine Altersbestimmung nicht sinnvoll zu sein. Ein Charakteristikum des Wattenmeeres ist die Dynamik der Sedimente, die von den gezeiten- und windinduzierten Wasserströmungen bewegt werden [Zer19]. Dadurch können Schichten durchmischt oder sogar vollständig entfernt werden, was die Altersbestimmung erschwert. Das Watt ist auch von einer Vielzahl von Lebewesen besiedelt, die den Boden ständig durchgraben. Dadurch können ebenfalls Sedimentschichten gestört und vermischt werden. Eine klare chronologische Abfolge wäre somit schwierig zu bestimmen.

Insgesamt sind Wattgebiete dynamische Umgebungen, die Herausforderungen für die Altersbestimmung mit sich bringen. Die berechneten Alterswerte in der Pb-210-Methode bestätigen diese Aussage. Die Werte können aus Tabelle 14 im Anhang entnommen werden.

## 6 Fazit

In dieser Arbeit wurden Bodenproben von sieben Standorten, für vier Tiefenprofile, einer renaturierten Salzwiese untersucht. Anhand von Sedimentkernen wurden Entwicklungen in den Sedimentationsraten der vergangenen Jahrzehnte analysiert. Neben dem anthropogenen Radionuklid Cs-137 aus dem Tschernobyl-Fallout war auch das natürliche Radionuklid K-40 von Interesse.

Die spezifische Aktivität des K-40 verteilt sich über die jeweiligen Standorte relativ konstant. Für die Aktivität von Cs-137 wurden auffallende Unterschiede in den Bodenproben nachgewiesen. Insbesondere an den Standorten, die sich direkt in der renaturierten Fläche der Salzwiese befinden, wurden signifikante Werte beobachtet. NMS-11 und NMS-12, die sich näher zur Nordsee befinden, wurden keine bedeutsamen Werte entdeckt.

Die Kombination von den Standorten NMS-01 und NMS-03 ermöglichte eine Betrachtung in ein größeres Bodenprofil. NMS-01 war von der Renaturierung nicht betroffen, wohingegen NMS-03 direkt in der Renaturierungszone lag. Die Datierung lieferte einen Wert für die Sedimentationsrate, die der Sedimentationsrate von [Sch23] stark ähnelte. Eine genaue Bewertung, ob eine Sedimentationsrate von 0,5 cm pro Jahr in einer renaturierten Salzwiese als hoch eingestuft werden kann, erfordert Berücksichtigung der spezifischen Ziele des Renaturierungsprojektes und der Vergleich mit anderen Küstengebieten.

In einer weiteren Datierungsmethode konnte der auftretende Maximalwert am kombinierten Bohrkern NMS-01+03 dem Reaktorunfall von Tschernobyl in 1986 zugeordnet werden.

An den Standorte NMS-05, NMS-07 und NMS-09 stieß die Datierung auf Hindernisse, da sie direkt in der renaturierten Fläche der Salzwiese lagen. Das Einordnen in ein Tschernobyl-Peak erschien an diesen Standorten nicht sinnvoll. Des Weiteren konnte kein Trend in der Sedimententwicklung nachgewiesen werden, da diese Messpunkte von den Kompensationsmaßnahmen zu stark beeinflusst waren. Der Standort NMS-11 befand sich im Küstenraum und die Anwendung der Datierung stieß auch hier auf Hindernisse. Hierzu wurde für die Interpretation der Cs-137-Verteilung die Ergebnisse der Korngrößenanalyse hinzugezogen. Die Watt-Probe, NMS-12, ließ ebenfalls keine Datierung zu, da dieser Boden von natürlichen Prozessen wie Ebbe und Flut zu stark beeinflusst wird.

Für eine genauere Untersuchung zur Tiefenverlagerung von Cs-137 und für eine Datierung mit niedrigeren Unsicherheiten wäre eine Untersuchung von weiteren Bodenprofilen erforderlich.

## A Tabellen

Tabelle 1: Zum Kalibrieren verwendete Radionuklide des Präparats QCY13 von Detektor 4. p ist die Emissionswahrscheinlichkeit und  $T_{1/2}$  die Halbwertszeit.

Nuklid	Energie [keV]	p [%]	$T_{1/2}$ [d]	$u(T_{1/2})$ [d]	Datum
Am-241	60	36	157850,0925	241,065	01.02.2019
Cd-109	88	3,63	462,6	0,7	01.02.2019
Co-57	122	85,6	271,79	0,09	01.02.2019
Ce-139	166	79,9	137,64	0,023	01.02.2019
Hg-203	279	81,5	46,595	0,013	01.02.2019
Sn-113	392	64,9	115,09	0,04	01.02.2019
Sr-85	514	98,4	64,849	0,004	01.02.2019
Cs-137	662	85,1	11019,5925	58,44	01.02.2019
Y-88	898	94	106,63	0,025	01.02.2019
Co-60	1173	99,86	1925,598	0,36525	01.02.2019
Co-60	1333	99,98	1925,598	0,36525	01.02.2019
Y-88	1836	99,4	106,63	0,025	01.02.2019

Tabelle 2: Zum Kalibrieren verwendete Radionuklide des Präparats QCY14 von Detektor 6. p ist die Emissionswahrscheinlichkeit und  $T_{1/2}$  die Halbwertszeit.

Nuklid	Energie [keV]	p [%]	$T_{1/2}$ [d]	$u(T_{1/2})$ [d]	Datum
Am-241	60	36	157850,0925	241,065	01.05.2021
Cd-109	88	3,63	462,6	0,7	01.05.2021
Co-57	122	85,6	271,79	0,09	01.05.2021
Ce-139	166	79,9	137,64	0,023	01.05.2021
Hg-203	279	81,5	46,595	0,013	01.05.2021
Sn-113	392	64,9	115,09	0,04	01.05.2021
Sr-85	514	98,4	64,849	0,004	01.05.2021
Cs-137	662	85,1	11019,5925	58,44	01.05.2021
Y-88	898	94	106,63	0,025	01.05.2021
Co-60	1173	99,86	1925,598	0,36525	01.05.2021
Co-60	1333	99,98	1925,598	0,36525	01.05.2021
Y-88	1836	99,4	106,63	0,025	01.05.2021

Tabelle 3: Bestimmung der effektiven Höhe vom 05.12.2022.

Probe	Höhe [cm]
GK-1-1	19,6
GK-1-2	22
GK-1-3	23,2
GK-2-1	20,5
GK-2-2	18
GK-2-3	18,6
GK-3-1	20,2
GK-3-2	17,5
GK-3-3	21,3
GK-4-1	20,8
GK-4-2	18,7
GK-4-3	20
GK-5-1	24,1
GK-5-2	23,8
GK-5-3	25,1
GK-6-1	21,2
GK-6-2	21,1
GK-6-3	17,6
GK-7-1	17,6
GK-7-2	19
GK-7-3	26

Tabelle 4: Trockenmasse der Proben, die für die Berechnung der spezifischen Aktivität verwendet wurden.

Probe	Probenmasse [g] getrocknet
NMS-01-01	73,68
NMS-01-02	73,4
NMS-01-03	71,13
NMS-01-04	52,36
NMS-03-01	79,73
NMS-03-02	78,53
NMS-03-03	78,76
NMS-03-04	77,85
NMS-05-01	79,17
NMS-05-02	74,84
NMS-05-03	72,68
NMS-05-04	75,26
NMS-07-01	81,36
NMS-07-02	76,75
NMS-07-03	79,4
NMS-07-04	71,58
NMS-09-01	77,29
NMS-09-02	74,44
NMS-09-03	81,78
NMS-09-04	83,88
NMS-11-01	95,07
NMS-11-02	86,25
NMS-11-03	86,22
NMS-11-04	89,47
NMS-12-01	64,33
NMS-12-02	59,28
NMS-12-03	75,83
NMS-12-04	79,62

Tabelle 5: Ergebnisse der Korngrößenanalyse für sechs Proben aus drei Standorten. Die Ergebnisse wurden von einer Mitarbeiterin vom IRS zur Verfügung gestellt.

	NMS-11-01	NMS-11-04	NMS-01-04	NMS-01-01	NMS-03-04	NMS-03-01
Ton [%]	11,33	7,03	8,19	39,44	40,47	29,77
Schluff [%]	33,59	35,25	85,59	54,47	52,01	50,44
Sand [%]	55,08	57,73	6,22	6,09	7,51	19,79

Tabelle 6: Ergebnisse der Bodenproben der sieben Standorte aus der Salzwiese für K-40. Die spezifische Aktivität A ist für die vier Tiefenprofile aufgetragen. Die Werte stammen aus der Arbeit von [Sch23].

Standorte	Tiefe							
	0-7,5 cm		7,6-15 cm		15,1-22,5 cm		22,6-30cm	
	A [Bq/kg]	u(A) [Bq/kg]	A [Bq/kg]	u(A) [Bq/kg]	A [Bq/kg]	u(A) [Bq/kg]	A [Bq/kg]	u(A) [Bq/kg]
NMS-01	1050	106	792	80	785	79	892	89
NMS-03	1510	152	1030	104	930	93	949	96
NMS-05	821	83	847	85	795	80	911	92
NMS-07	938	95	856	86	756	76	783	79
NMS-09	776	78	845	85	783	79	846	85
NMS-11	1030	104	771	78	728	73	732	74
NMS-12	705	71	796	80	721	72	1080	110

Tabelle 7: Regressions-Statistik für den linearen Fit des kombinierten Bohrkerns NMS-01+03 (Abbildung 15).

Gleichung	$y=a+b \cdot x$
Schnittpunkt mit der y-Achse	$(940,176 \pm 17,172)$
Steigung	$(-0,46362 \pm 0,00867)$
Summe der Fehlerquadrate	3,254
R-Quadrat (COD)	0,9965
Standardabweichung	5,7044

Tabelle 8: Ergebnisse der Bodenproben der sieben Standorte aus der Salzwiese für Cs-137. Die spezifische Aktivität A ist für die vier Tiefenprofile aufgetragen.

Standorte	Tiefe							
	0-7,5 cm		7,6-15 cm		15,1-22,5 cm		22,6-30cm	
	A [Bq/kg]	u(A)	A [Bq/kg]	u(A)	A [Bq/kg]	u(A)	A [Bq/kg]	u(A)
NMS-01	8,9	0,9	9,7	1	27,5	2,8	17,8	1,8
NMS-03	32,2	3,2	14,8	1,5	5,2	0,5	0,9	0,2
NMS-05	9,1	0,9	15,9	1,6	11	1	3,7	0,4
NMS-07	9,7	1	9	0,9	10,1	1	4,6	0,5
NMS-09	3,4	0,4	4,9	0,5	6,6	0,7	6,3	0,7
NMS-11	1,6	0,2	0,6	0,2	1,6	0,2	1,4	0,2
NMS-12	5,6	0,6	6	0,6	13,7	1,4	13,7	1,4

Tabelle 9: Messdaten vom Bohrkern NMS-01+03. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen.

	Bohrkern [cm]	Pb-210 [Bq/kg]	u(Pb-210) [Bq/kg]	Alter [a]	u(Alter) [a]	Cs-137 [Bq/kg]	u(Cs-137) [Bq/kg]
NMS-01-04	3,75	174	19	0	0	8,9	0,9
NMS-01-03	11,25	120	14	11,88	5,3	9,7	1,0
NMS-01-02	18,75	65	9	31,7	5,9	27,5	2,8
NMS-01-01	26,25	42	7	46,0	6,5	17,8	1,8
NMS-03-03	11,25	27	6	60,2	8	14,8	1,5
NMS-03-02	18,75	22	5	65,9	8	5,2	0,5
NMS-03-01	26,25	17	5	73,8	10,1	0,9	0,22

Tabelle 10: Messdaten vom Bohrkern NMS-05. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen.

	Bohrkern [cm]	Pb-210 [Bq/kg]	u(Pb-210) [Bq/kg]	Alter [a]	u(Alter) [a]	Cs-137 [Bq/kg]	u(Cs-137) [Bq/kg]
NMS-05-04	3,75	34	6	0	0	9,1	0,9
NMS-05-03	11,25	33	6	0,62	7,94	15,9	1,6
NMS-05-02	18,75	19	5	18,81	9,68	11	1
NMS-05-01	26,25	15	5	26,43	11,52	3,7	0,4

Tabelle 11: Messdaten vom Bohrkern NMS-07. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen.

	Bohrkern [cm]	Pb-210 [Bq/kg]	u(Pb-210) [Bq/kg]	Alter [a]	u(Alter) [a]	Cs-137 [Bq/kg]	u(Cs-137) [Bq/kg]
NMS-07-04	3,75	42	7	0	0	9,7	1
NMS-07-03	11,25	22	5	20,77	9,6	9	0,9
NMS-07-02	18,75	21	5	21,98	9,24	10,1	1
NMS-07-01	26,25	16	4	31,33	10,73	4,6	0,5

Tabelle 12: Messdaten vom Bohrkern NMS-09. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen.

	Bohrkern [cm]	Pb-210 [Bq/kg]	u(Pb-210) [Bq/kg]	Alter [a]	u(Alter) [a]	Cs-137 [Bq/kg]	u(Cs-137) [Bq/kg]
NMS-09-04	3,75	56	8	0	0	3,4	0,4
NMS-09-03	11,25	49	8	4,3	6,6	4,9	0,5
NMS-09-02	18,75	56	8	0,05	6,54	6,6	0,7
NMS-09-01	26,25	38	7	12,52	7,12	6,3	0,7

Tabelle 13: Messdaten vom Bohrkern NMS-11. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen.

	Bohrkern [cm]	Pb-210 [Bq/kg]	u(Pb-210) [Bq/kg]	Alter [a]	u(Alter) [a]	Cs-137 [Bq/kg]	u(Cs-137) [Bq/kg]
NMS-11-04	3,75	40	8	0	0	1,6	0,2
NMS-11-03	11,25	36	6	4,71	8,54	0,6	0,2
NMS-11-02	18,75	30	6	8,67	8,8	1,6	0,2
NMS-11-01	26,25	24	5	16,9	9,1	1,4	0,2

Tabelle 14: Messdaten vom Bohrkern NMS-12. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen.

	Bohrkern [cm]	Pb-210 [Bq/kg]	u(Pb-210) [Bq/kg]	Alter [a]	u(Alter) [a]	Cs-137 [Bq/kg]	u(Cs-137) [Bq/kg]
NMS-12-04	3,75	29	6	0	0	1,6	0,2
NMS-12-03	11,25	36	6		-7,08	8,48	0,2
NMS-12-02	18,75	50	8	-17,33	8,48	1,6	0,2
NMS-12-01	26,25	35	8	-5,88	9,79	1,4	0,2

## B Abbildungen

Detektor		Detektor + Folienstandard	Detektor + Flächenstandard (unten/down) + Probe	Detektor + Flächenstandard (oben/top) + Probe	Detektor + Probe
	Messzeit	> 1 d	1800 s	1800 s	> 1 d

Abbildung 22: Selbst erstellte schematische Darstellung der für die Folienmethode notwendigen Messungen.

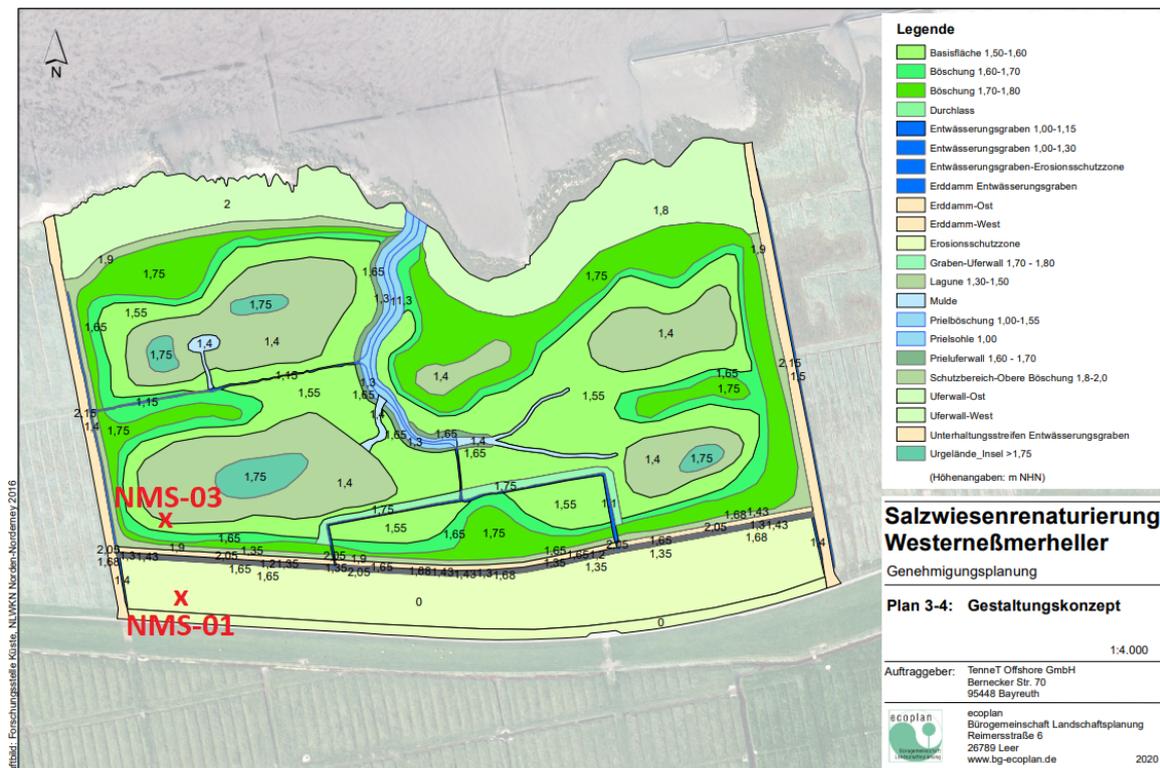


Abbildung 23: Gestaltungskonzept der Salzwiesenrenaturierung. Die Höhenprofile können für die markierten Standorte NMS-01 und NMS-03 entnommen werden [Ten22].

## **C PDF-Dokumente**

**Bestimmung der Nachweis- und Erkennungsgrenze für Detektor 4****Wähle die inaktivste Probe aus: **Probe 03-01****

Nuklid		Cs-137
Energie [keV]		661,34
Peakcenter	$\vartheta_g$	5383
Halbwertsbreite [keV]	$h$	1,33
Anzahl der Kanäle im Bereich B	$t_g$	16
Anzahl der Kanäle im Bereich A <sub>1</sub>	$t_1$	8
Anzahl der Kanäle im Bereich A <sub>2</sub>	$t_2$	8
Anzahl der Kanäle in den Bereichen A <sub>1</sub> und A <sub>2</sub>	$t_0$	16
Anzahl der Impulse in B	$n_g$	943
Anzahl der Impulse in A <sub>1</sub>	$n_1$	330
Anzahl der Impulse in A <sub>2</sub>	$n_2$	323
Anzahl der Untergrundimpulse	$n_0$	653
Verhältnis: Kanalanzahlen	$c_0$	1
Untergrundbeitrag zur Linie	$z_0$	653
Messdauer der Probe [s]	$t_m$	158.028,16
Masse der Probe [g]	$m$	79,73
Emissionswahrscheinlichkeit	$p$	0,851
Nachweiswahrscheinlichkeit [ $s^{-1}Bq^{-1}$ ]	$\epsilon$	0,002
Efficiency	<b>Eff</b>	0,018
2,5*h		3,325
untere Energie		659,6775
obere Energie		663,0025
relative Standardunsicherheit des Kalibrierfaktors	$u_{rel(w)}$	0,111694224
Kalibrierfaktor	$w$	818,7968641
<b>Erkennungsgrenze</b>		<b>0,561738954</b>
<b>Nachweisgrenze</b>		<b>0,953197229</b>
iterative Berechnung		0,934450944

**Messzeit der Probe:** 158.028,16**Probenmasse trocken [g]:** 79,73**Vorgaben aus [DIN18]****Vorgewählte Parameter:**

$\alpha$	0
$\beta$	0,05
$\gamma$	0,05

**Berechnete Parameter:**

k1- $\alpha$	3
k1- $\beta$	1,65
k1- $\gamma/2$	1,96

**Bestimmung der Nachweis- und Erkennungsgrenze für Detektor 6****Wähle die inaktivste Probe aus: Probe 07-01**

Nuklid		Cs-137
Energie [keV]		662,32
Peakcenter	$\theta_g$	5693
Halbswertsbreite [keV]	$h$	1,58
Anzahl der Kanäle im Bereich B	$t_g$	36
Anzahl der Kanäle im Bereich A <sub>1</sub>	$t_1$	18
Anzahl der Kanäle im Bereich A <sub>2</sub>	$t_2$	18
Anzahl der Kanäle in den Bereichen A <sub>1</sub> und A <sub>2</sub>	$t_0$	36
Anzahl der Impulse in B	$n_g$	3767
Anzahl der Impulse in A <sub>1</sub>	$n_1$	759
Anzahl der Impulse in A <sub>2</sub>	$n_2$	876
Anzahl der Untergrundimpulse	$n_0$	1635
Verhältnis: Kanalanzahlen	$c_0$	1
Untergrundbeitrag zur Linie	$z_0$	1636
Messdauer der Probe [s]	$t_m$	324.057,36
Masse der Probe [g]	$m$	81,36
Emissionswahrscheinlichkeit	$p$	0,851
Nachweiswahrscheinlichkeit [ $s^{-1}Bq^{-1}$ ]	$\epsilon$	
Efficiency	<b>Eff</b>	0,023884698
2,5*h		3,95
untere Energie		660,345
obere Energie		664,295
relative Standardunsicherheit des Kalibrierfaktors	$u_{rel(w)}$	0,111682974
Kalibrierfaktor	$w$	604,6996975
<b>Erkennungsgrenze</b>		<b>0,32012014</b>
<b>Nachweisgrenze</b>		<b>0,538935078</b>
iterative Berechnung		0,902062868
<b>Messzeit der Probe:</b>		324.057,36
<b>Probenmasse trocken [g]:</b>		81,36

**Vorgaben aus [DIN18]****Vorgewählte Parameter:**

$\alpha$	0
$\beta$	0,05
$\gamma$	0,05

**Berechnete Parameter:**

k1- $\alpha$	3
k1- $\beta$	1,65
k1- $\gamma/2$	1,96

**Labortagebuch: Schritt 3****19.12.2022 - 19.01.2023**

Zerkleinern der Proben → Entfernen von Skelett- sowie Wurzelanteilen → Mörsern → Sieben

Zum Schluss: die gesiebte Masse in die Petrischalen füllen.

<b>Probe</b>		<b>Beobachtung</b>
NMS-01	NMS-01-01	Harter Boden; kleine braune Erdstückchen; sehr wenig Skelett
	NMS-01-02	Kleine braune Erdstückchen; kleine schwarze Steinchen; wenig Skelett; harter Boden
	NMS-01-03	Harter Boden; wenig Skelett
	NMS-01-04	Viel grobes Skelett
NMS-03	NMS-03-01	Kleine braune Erdstückchen; sehr wenig Skelett
	NMS-03-02	Wenig Skelett
	NMS-03-03	Etwas Skelett
	NMS-03-04	Etwas Skelett; kleine braune Erdstückchen
NMS-05	NMS-05-01	Sehr wenig Skelett
	NMS-05-02	Sehr wenig Skelett
	NMS-05-03	Kleine braune Erdstückchen; etwas mehr Skelett
	NMS-05-04	Etwas Skelett
NMS-07	NMS-07-01	Sehr wenig Skelett; kleine braune Erdstückchen
	NMS-07-02	Wenig Skelett; kleine braune Erdstückchen
	NMS-07-03	Etwas Skelett; Muschelstück; kleine braune Erdstückchen
	NMS-07-04	Kleine braune Erdstückchen; etwas Skelett
NMS-09	NMS-09-01	Sehr wenig Skelett; kleine braune Erdstückchen
	NMS-09-02	Wenig Skelett
	NMS-09-03	Wenig Skelett; Schnecke
	NMS-09-04	Wenig Skelett
NMS-11	NMS-11-01	Sehr sandig; viel Skelett
	NMS-11-02	Viel Skelett; sandig
	NMS-11-03	Sehr viel Skelett; Schnecken; kleine Skelettanteile vorhanden
	NMS-11-04	Viel Skelett
NMS-12	NMS-12-01	Kleine braune Erdstückchen; sehr wenig Skelett
	NMS-12-02	Wenig Skelett; kleine braune Erdstückchen
	NMS-12-03	Kleine braune Erdstückchen; etwas Skelett
	NMS-12-04	Kleine braune Erdstückchen; etwas mehr Skelett

**Probenahme – Projekt *Gute Küste***  
**Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS) in Kooperation mit**  
**Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau und Ästuar- und Küsteningenieurwesen (LUFI)**

**Datum:** 02.02.2022

**Ort:** Neßmersiel, Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer, Salzwiese

**Personen:** Dr. Stefan Biester, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IRS, Sebastian Büchner, Mitarbeiter am IRS, Beriwan Öner, Bacherlorkandidatin am IRS, Jan Schimansky, Bacherlorkandidat am IRS, Janne Hillberg, FWJ am IRS sowie Dr. Dorothea Bunzel, Wissenschaftliche Mitarbeiterin am LUFI

- Abfahrt: 06:40 Uhr  
Ankunft: ca. 10:00 Uh
- Probengefäß: Länge: 30 cm
- 7 Messstellen → jeweils 3 Proben

zur Notation:

GK-X-X = GuteKüste-Messtelle-Probennummer

Datenerfassungen:

Uhrzeit	Proben Nr.	GPS Koordinaten		Bemerkungen
		Nördliche Breite	Östliche Breite	
10:25 Uhr	GK-1-1	53° 40' 54.8112" N	7° 20' 38.292" E	Weiches Sediment, 2°C
	GK-1-2	<b>NMS-03</b>		
	GK-1-3			
10:58 Uhr	GK-2-1	53° 40' 57.4392" N	7° 20' 37.3308" E	Härteres Sediment
	GK-2-2	<b>NMS-05</b>		
	GK-2-3			
11:18 Uhr	GK-3-1	53° 41' 00.0132" N	7° 20' 36.2868" E	Extrem weiches Sediment, feucht, schlammiger als GK-1 und GK-2
	GK-3-2	<b>NMS-07</b>		
	GK-3-3			
11:34 Uhr	GK-4-1	53° 41' 02.0364" N	7° 20' 35.646" E	Härteres Sediment
	GK-4-2	<b>NMS-09</b>		
	GK-4-3			
11:50 Uhr	GK-5-1	53° 41' 03.858" N	7° 20' 34.8468" E	Dickes Gras, Strandquecken, relativ sandig
	GK-5-2	<b>NMS-11</b>		
	GK-5-3			
12:04 Uhr	GK-6-1	53° 41' 04.7364" N	7° 20' 34.6956" E	Weiches Sediment, schlammig, „anoxisch“?
	GK-6-2	<b>NMS-12</b>		
	GK-6-3			
12:32 Uhr	GK-7-1	53° 40' 52.392" N	7° 20' 39.0804" E	
	GK-7-2	<b>NMS-01</b>		
	GK-7-3			

## Abbildungsverzeichnis

1	Anzahl von oberirdischen und unterirdischen Atomwaffentests [Eff+00]. . . . .	2
2	<i>Linear Attenuation Coefficient</i> (linearer Dämpfungskoeffizient) drückt aus wie stark die $\gamma$ -Strahlung beim Durchgang durch Germanium (Ge) abgeschwächt wird. Der Photoeffekt dominiert als Wechselwirkung bei niedrigeren Energien, bis etwa 160 keV, und der Comptoneffekt ab 160 keV bis 8.600 keV. Der Paarbildungseffekt dominiert ab einer Energie von 8.600 keV [Gil08]. . . . .	5
3	Schematischer Aufbau eines Halbleiterdetektors, entnommen aus [Arn+18]. . . . .	6
4	Vergleich zwischen Mess- und Referenzwert der Probe <i>IAEA-TEL-2012-03</i> des für die Arbeit verwendeten Detektors. . . . .	10
5	Standort des untersuchten Gebietes [Goo23]. . . . .	11
6	Aufnahme der Salzwiese von oben mit den sieben Probenahmepunkten (siehe schwarze Rechtecke) [Ten22]. . . . .	12
7	Ausschnitt aus Abb. 7 für die Standorte NMS-11 und NMS-12. . . . .	12
8	Ausschnitt aus Abb. 7 für den Standort NMS-01. . . . .	12
9	Ausschnitt aus Abb. 6 für die Standorte NMS-03, NMS-05, NMS-07 und NMS-09. . . . .	13
10	Die zerkleinerten Bodenproben, die sich in den Keramikschaalen befinden, wurden in den Ofen gelegt und für mindestens 24 Stunden bei 105 Grad Celsius getrocknet. Die weißen Keramikschaalen, ohne Aluminium, waren Versuchsproben für das Zersägen und Zerkleinern. . . . .	15
11	Graphische Darstellung der Ergebnisse der Korngrößenverteilung. Die Tabelle hierzu befindet sich im Anhang, Tabelle 5. . . . .	17
12	Graphische Darstellung der spezifischen Aktivität von K-40 in den Bodenproben von den jeweiligen Standorten für die Tiefenprofile. . . . .	18
13	Graphische Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in den Bodenproben von den jeweiligen Standorten für die Tiefenprofile von den kombinierten Bohrkern NMS-01+03. Die Messdaten können aus Tabelle 8 im Anhang entnommen werden. . . . .	19
14	Graphische Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 für den kombinierten Bohrkern NMS-01+03, wobei NMS-03-04 vernachlässigt wurde. . . . .	20
15	Darstellung der Tiefe in Abhängigkeit zu den drei ausgewählten signifikanten Punkten NMS-01-01, NMS-01-04 und NMS-03-01. Der lineare Fit $y = a + b \cdot x$ liefert für a einen Wert von $(940,18 \pm 17,17)$ cm und für b $(-0,46 \pm 0,009) \frac{cm}{a}$ . . . . .	21
16	Abbildung wurde übernommen aus [Sch23]. Darstellung der Tiefe in Abhängigkeit zum berechneten Alter von dem kombinierten Bohrkern NMS-01+03. Hierzu wurde ein linearer Fit angewendet. Die Steigung beschreibt die Sedimentationsrate und liegt bei $0,52 \frac{cm}{a}$ . Die genauen Messwerte befinden sich in Tabelle 9 im Anhang. . . . .	23
17	Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für die kombinierten Bohrkern NMS-01+03. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen und befinden sich in Tabelle 9 im Anhang. . . . .	23
18	Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für den Standort NMS-05. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen. . . . .	24

19	Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für den Standort NMS-07. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen. . .	25
20	Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für den Standort NMS-09. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen. . .	26
21	Darstellung der spezifischen Aktivität von Cs-137 in einem zeitlichen Verlauf für den Standort NMS-11. Die Messdaten für das Alter wurden aus [Sch23] entnommen. . .	27
22	Selbst erstellte schematische Darstellung der für die Folienmethode notwendigen Messungen. . . . .	36
23	Gestaltungskonzept der Salzwiesenrenaturierung. Die Höhenprofile können für die markierten Standorte NMS-01 und NMS-03 entnommen werden [Ten22]. . . . .	36

## Tabellenverzeichnis

1	Zum Kalibrieren verwendete Radionuklide des Präparats QCY13 von Detektor 4. $p$ ist die Emissionswahrscheinlichkeit und $T_{1/2}$ die Halbwertszeit. . . . .	30
2	Zum Kalibrieren verwendete Radionuklide des Präparats QCY14 von Detektor 6. $p$ ist die Emissionswahrscheinlichkeit und $T_{1/2}$ die Halbwertszeit. . . . .	30
3	Bestimmung der effektiven Höhe vom 05.12.2022. . . . .	31
4	Trockenmasse der Proben, die für die Berechnung der spezifischen Aktivität verwendet wurden. . . . .	32
5	Ergebnisse der Korngrößenanalyse für sechs Proben aus drei Standorten. Die Ergebnisse wurden von einer Mitarbeiterin vom IRS zur Verfügung gestellt. . . . .	32
6	Ergebnisse der Bodenproben der sieben Standorte aus der Salzwiese für K-40. Die spezifische Aktivität $A$ ist für die vier Tiefenprofile aufgetragen. Die Werte stammen aus der Arbeit von [Sch23]. . . . .	33
7	Regressions-Statistik für den linearen Fit des kombinierten Bohrkerns NMS-01+03 (Abbildung 15). . . . .	33
8	Ergebnisse der Bodenproben der sieben Standorte aus der Salzwiese für Cs-137. Die spezifische Aktivität $A$ ist für die vier Tiefenprofile aufgetragen. . . . .	33
9	Messdaten vom Bohrkern NMS-01+03. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen. . . . .	34
10	Messdaten vom Bohrkern NMS-05. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen. . . . .	34
11	Messdaten vom Bohrkern NMS-07. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen. . . . .	34
12	Messdaten vom Bohrkern NMS-09. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen. . . . .	35
13	Messdaten vom Bohrkern NMS-11. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen. . . . .	35
14	Messdaten vom Bohrkern NMS-12. Datenbasis für das Alter wurden von [Sch23] entnommen und für die Datierung von Cs-137 hinzugezogen. . . . .	35

## Literatur

- [Arn+18] D. Arnold u. a. „Grundlagen der Gammaskpektrometrie mit Halbleiterdetektoren“. In: *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2018)*.
- [Bir09] J.H. Birkhan. „Gammaskpektrometrie an Bodenproben von als Grünland genutzten Auenflächen der Zwickauer und Vereinigten Mulde“. Diplomarbeit. 2009.
- [Brü92] Axel Brückmann. *Radioaktives Cäsium nach dem Tschernobyl-Reaktorunfall in Waldökosystemen: Transfer Boden-Pflanze-Boden; Verhalten im Boden und in Pflanzen*. Forschungszentrum Waldökosysteme, 1992.
- [Bük13] Harald Bükler. *Theorie und Praxis der Halbleiterdetektoren für Kernstrahlung*. Bd. 17. Springer-Verlag, 2013.
- [DIN11] DIN11929. *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung Grundlagen und Anwendungen*. 2011. URL: [www.beuth.de](http://www.beuth.de).
- [Eff+00] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation u. a. *Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000 Report, Volume I: Report to the General Assembly, with Scientific Annexes-Sources*. United Nations, 2000.
- [FL91] Mauro Frignani und Leonardo Langone. „Accumulation rates and <sup>137</sup>Cs distribution in sediments off the Po River delta and the Emilia-Romagna coast (northwestern Adriatic Sea, Italy)“. In: *Continental Shelf Research* 11.6 (1991), S. 525–542.
- [Gil08] Gordon Gilmore. *Practical gamma-ray spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2008.
- [Goo23] Google. *Salzwiese Neßmersiel, Dornum*. 2023. URL: <https://www.google.com/maps>.
- [Lan04] Friederike Lang. „Blei“. In: *Bodengefährdende Stoffe: Bewertung-Stoffdaten-Ökotoxikologie-Sanierung* (2004), S. 1–16.
- [LHM20] HW. Linders, U. Hackmack und U. Meyer-Spethmann. „Genehmigungsplan - Salzwiesenrenaturierung Westerneßmerheller“. In: *ecoplan - Bürogemeinschaft Landschaftsplanung* (2020).
- [Lie80] K. H. Lieser. *Einführung in die Kernchemie. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage*. Verlag Chemie, 1980.
- [Mus95] G. Musiol. *Kern- und Elementarteilchenphysik, 2. Aufl.* Harri Deutsch, Frankfurt/M., 1995.
- [Nuc23] Nucleonica. *Nuclear Science Networking and Applications Portal, European Commission's Joint Research Centre*. 2023. URL: [www.nucleonica.net](http://www.nucleonica.net).
- [Pet+05] Josef Peter u. a. „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung - Jahresbericht 2003“. In: *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2005)*.
- [Pet+20] Josef Peter u. a. „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung - Jahresbericht 2019“. In: *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020)*.

- [Sch23] J. Schimansky. „Radiometrische Untersuchung von Umweltproben einer Salzwiese“. Bachelorarbeit. 2023.
- [Sta+08] K. Stahr u. a. *Bodenkunde und Standortlehre - Grundwissen Bachelor*. Ulmer, 2008.
- [Ten22] Linders Bürogemeinschaft Landschaftsplanung;im Auftrag von TenneT Offshore GmbH. „ecoplan“. In: (2022).
- [Völ17] Hansruedi Völkle. „Probeartikel - Natürliche Radionuklide im menschlichen Körper“. In: (2017).
- [Wic04] J. Wicke. „Untersuchung zur internen Strahlungsexposition durch Cäsium-137 in der nördlichen Ukraine“. In: (2004).
- [Zer19] Stefan Zerbe. „Renaturierung von Ökosystemen im Spannungsfeld von Mensch und Umwelt“. In: *Deutschland: Springer Spektrum*. doi 10 (2019), S. 978–3.