

# Überwachung von radioaktiven Abfällen mit Hilfe einer Flüssig-TPC zur Antineutrinoerkennung am Beispiel des Zwischenlagers Hanford

Bachelorarbeit in Physik

angefertigt im III. Physikalischen Institut B

vorgelegt der Fakultät für Mathematik, Informatik und  
Naturwissenschaften der RWTH Aachen

von

Hannah-Lea Tegtmeyer

Gutachter: Prof. Dr. Stefan Roth

Zweigutachter: Prof. Dr. Malte Göttsche

im August 2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Allgemein . . . . .	3
2.2	Detektor . . . . .	4
2.3	Statistik . . . . .	4
2.4	Hanford S/SX-Tank-Farm . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Zählraten</b>	<b>7</b>
3.1	Grundlage . . . . .	7
3.2	Simulationsgrundlage . . . . .	7
3.3	Analyse der Zählraten . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Detektions-Szenarien</b>	<b>10</b>
4.1	Abweichende Mengenangabe . . . . .	10
4.1.1	Vergleich . . . . .	12
4.2	Richtungsrekonstruktion . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Danksagung</b>	<b>24</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>25</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>26</b>

# 1 Einleitung

Seit Beginn der Produktion von atomaren Waffen und der Nutzung von Kernenergie stellt die Lagerung des dabei entstehenden radioaktiven Abfalls eine Herausforderung dar. Bei der Lagerung muss gewährleistet werden, dass zum Schutz der Umwelt kein Material austritt und die austretende Strahlung minimiert wird. Außerdem muss sichergestellt werden, dass kein Material entwendet wird. Dieses enthält zum Teil noch waffenfähiges Plutonium, welches zur Produktion illegaler Waffen verwendet werden kann. Darüber hinaus stellt die Überwachung eine Möglichkeit zur Verifikation der von Staaten deklarierten Menge radioaktiven Materials dar, da aus den vorhandenen Mengen Abfall Rückschlüsse auf die Menge an verwendetem radioaktiven Materials möglich sind. Eine Überwachung der Zwischen- oder Endlager ist also ein wichtiger Bestandteil der nuklearen Sicherheit.

In dieser Arbeit wird untersucht, wie sich Antineutrino-Detektoren zur Überwachung von Zwischenlagern für radioaktive Abfälle einsetzen lassen. Die Strahlung, die von diesen ausgeht, wird im Zeitraum von einigen hundert Jahren von  $\beta$ -Strahlung dominiert. Radioaktive Abfälle liefern also in der Theorie eine ausreichende Menge Antineutrinos, die zur Detektion verwendet werden können. Dazu wird als Beispiel ein Teil des US-amerikanischen Zwischenlagers in Hanford betrachtet. Besonderer Fokus liegt auf der Positionierung des Detektors und darauf, wie durch eine Richtungsrekonstruktion des Detektors die Sensitivität verbessert werden kann.

Hanford war eine der beiden Hauptproduktionsstellen für waffenfähiges Plutonium während des zweiten Weltkrieges. Die dabei entstandenen radioaktiven Abfälle wurden dort schon seit Beginn der Produktion zwischengelagert. Aufgrund der mangelnden Sicherheitsvorkehrungen zu Beginn der Lagerung, kam es seitdem zu einigen Zwischenfällen, bei denen es unter anderem zu Absickerungen von radioaktivem Material kam [1]. Außerdem wurden zu Beginn der Lagerung die gelagerten Mengen unzureichend dokumentiert. Deshalb müssen diese rückwirkend abgeschätzt werden und die aktuell deklarierten Mengenangaben sind mit großen Unsicherheiten behaftet. In diesem Lager ist also sowohl die Überwachung zur Kontrolle der Menge des vorhandenen Materials, als auch die Untersuchung der Nachweisbarkeit des abgesickerten Materials relevant. Dafür sind die Eigenschaften der in dieser Arbeit betrachteten "Time Projection Chamber"(TPC) mit organischer Flüssigkeit zur Antineutrino-Detektion besonders interessant, da die aktuell erhoffte Richtungsauflösung des Detektors vielversprechend für den genaueren Nachweis von Antineutrinos scheint [2]. Sowohl einmalige Messungen, um den aktuellen Bestand zu prüfen, als auch längerfristige Aufbauten, um dauerhaft auf solche Absickerungen mithilfe der Richtungsauflösung zu testen, sind mögliche Einsatzgebiete eines solchen Detektors.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Allgemein

Eine Möglichkeit, radioaktive Abfälle zu detektieren, ist es, sich die Detektion der beim Beta-Zerfall entstehenden Antineutrinos zunutze zu machen. Neutrinos interagieren kaum mit Materie, was Möglichkeiten für eine zusätzliche Überwachung außerhalb eines Zwischen- oder Endlagers aus sicherer Entfernung schafft, da sie weder abgeschirmt noch abgelenkt werden können. Um diese Neutrinos zu detektieren, kann man sich den inversen Beta-Zerfall (IBD, aus dem Englischen Inverse Beta Decay) zu nutze machen:



Das Antineutrino ist also nicht selber nachweisbar, aber die Endprodukte des IBDs. Das Positron annihiliert mit einem Elektron, wobei zwei charakteristischen 511 keV Photonen entstehen. Das Neutron wird in einem Kern eingefangen und es entsteht ebenfalls  $\gamma$ -Strahlung. Diese ist zu den Annihilationsphotonen zeitlich verzögert, da das Neutron für den Einfang erst durch Stöße verlangsamt werden muss um thermische Energie zu erreichen. Diese Photonen mit der charakteristischen Energie- und Zeitverzögerung können detektiert werden und führen so zu einer sehr eindeutigen Identifikation des Events und damit auch zu einer Abgrenzung zu Untergrund-Ereignissen.

Damit der IBD überhaupt ablaufen kann, muss das Antineutrino einen Energie-Schwellwert von 1,8 MeV überschreiten, um den Massenunterschied des IBDs überwinden zu können [3]. Aufgrund dessen gibt es Einschränkungen für die langfristige Detektion, da nicht bei allen  $\beta$ -Zerfällen Antineutrinos mit der benötigten Energien entstehen und viele  $\beta$ -Zerfälle mit höheren Energien sehr kurze Halbwertszeiten haben. Strontium-90 ist bei der Betrachtung von längeren Zeiträumen in radioaktiven Materialien die dominante Beta-Strahlungsquelle. Dies liegt zum einen an seiner langen Halbwertszeit ( $T_{1/2} = 28,78$  a) und zum anderen an der Häufigkeit mit der es in radioaktiven Zerfallsketten entsteht. Da der Q-Wert, die Energiebilanz eines Zerfalles, mit der Halbwertszeit skaliert, erreichen Zerfälle mit langen Halbwertszeiten wie der von Strontium-90 nicht die nötige Energie für den IBD. Strontium-90 zerfällt jedoch zu Yttrium-90, welches ebenfalls ein Betastrahler ist. Aufgrund seiner vergleichsweise niedrigen Halbwertszeit ( $T_{1/2} = 2,7$  d) entstehen beim zweiten Zerfall dann Antineutrinos mit der benötigten Schwellenergie von 1,8 MeV [3]. Damit lässt sich radioaktiver Abfall aufgrund des enthaltenen Strontium-90 mit Antineutrinodetektoren überwachen.

## 2.2 Detektor

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Detektor eine Liquid-Organic Time Projection Chamber betrachtet. Spurendriftkammern (TPCs) weisen Teilchen üblicherweise in einem mit E-Feld angelegten Driftgas nach, in dem die Teilchen des Driftgases ionisiert werden und die ionisierten Elektronen mit einer konstanten Geschwindigkeit zu der Anode driften. Damit können über die konstante Driftgeschwindigkeit, die Driftzeit und die zweidimensionale Auslese an der Anode die Teilchenspuren dreidimensional rekonstruiert werden. Die Energie der Teilchen kann durch die Menge der detektierten Elektronen bestimmt werden, da diese proportional zur Energiedeposition im Gas ist. Durch die örtliche Rekonstruktion der Teilchen erhofft man sich aktuell bessere Abgrenzung gegen Untergrundereignisse und eine insgesamt bessere Auflösung, da mit Hilfe dieser auch die Neutronenstöße und die Richtung des Positrons rekonstruiert werden können. Dadurch wird die Rekonstruktion der Antineutrinoichtung möglich [4].

Neutrinos haben einen sehr geringen Wirkungsquerschnitt. Deshalb liefert ein Driftgas nicht die nötige Dichte für einen effizienten Nachweis, da die Eventraten des IBDs sehr gering sind. Eine Alternative stellen organische Flüssigkeiten dar, welche eine ausreichende Menge Wasserstoff als Targetteilchen besitzen. Wie schon für andere Detektortypen gezeigt, bietet sich Tetra-Methyl-Silan (TMS) dank seiner geeigneten Drifteigenschaften an. TMS hat außerdem den Vorteil, dass es bei Normaldruck nur auf eine Temperatur von 26 °C gekühlt werden muss. Im Gegensatz dazu müssen zum Beispiel Liquid-Argon TPCs auf kryogenische Temperaturen gekühlt werden [2].

Dies vereinfacht den Bau des Detektors erheblich. Die dadurch erhöhte Flexibilität des Detektors ermöglicht es unter anderem auch Szenarien in Betracht zu ziehen, in denen der Detektor nicht dauerhaft auf einer Position aufgestellt, sondern stattdessen in regelmäßigen Abständen auf einer neuen Position platziert wird.

## 2.3 Statistik

In diesem Abschnitt soll nun die statistische Grundlage der Simulationen in dieser Arbeit erläutert werden.

Die Zählrate von radioaktiven Zerfällen folgt allgemein einer Binomialverteilung, da jedes Ereignis unabhängig voneinander stattfindet und es zwei möglichen Ergebnisse gibt: Zerfall findet statt oder Zerfall findet nicht statt. Für eine hohe Anzahl an Ereignissen mit geringer Ereigniswahrscheinlichkeiten, kann die Binomialverteilung als Poissonverteilung genähert werden. Da die Zählrate dementsprechen als poissonverteilt angenommen werden kann, folgt sie der Verteilung

$$P_{\lambda}(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}, \quad (2.2)$$

wobei sowohl der Erwartungswert als auch die Varianz durch  $\lambda$  gegeben ist. Hier wird  $\lambda$  durch die in Abschnitt 3.1 bestimmte Zählrate festgelegt. Damit ergibt sich als Standardabweichung der Zählrate  $\sigma_n = \sqrt{Var(X)} = \sqrt{\lambda}$ .

Für die Auswertung sollen Abweichungen der erwarteten Zählrate, die zum Beispiel durch abweichende Mengen des Materials entstehen können, auf ihre Signifikanz getestet werden. Es soll also getestet werden, ob es sich bei Abweichungen in der Zählrate einfach um statistische Fluktuationen handelt oder ob es sich um Ausreißer handeln kann, welche eine tatsächliche veränderte Zählrate durch Abweichungen der Menge des radioaktiven Materials anzeigt. Um die Differenz der erwarteten ( $n_{erwartet}$ ) und der gemessenen ( $n_{gemessen}$ ) Zählrate statistisch einordnen zu können, muss man sich die Streuintervalle um  $[\lambda - z \cdot \sigma, \lambda + z \cdot \sigma]$  anschauen, um feststellen zu können, in welchem Konfidenzniveau diese liegen. Dabei ist die Anzahl der Standardabweichungen  $z$  mittels Fehlerfortpflanzung gegeben durch

$$z = \frac{n_{erwartet} - n_{gemessen}}{\sqrt{n_{erwartet} + n_{gemessen}}}. \quad (2.3)$$

Die Poissonverteilung lässt sich ab einem Erwartungswert von  $\lambda = 15$  als Normalverteilung nähern [5], da unterhalb dieses Wertes die Asymmetrie der Poissonverteilung diese Näherung nicht mehr rechtfertigt. Wie in späteren Kapiteln noch beschrieben wird, werden bei einzelnen Tanks, die weiter als 30 m von einem Detektor entfernt sind, Anzahlen an Zerfällen gemessen, die in den jeweiligen Messzeiträumen kleiner als 15 sind. Für Überprüfungen von einzelnen Tanks in dieser Entfernung ist eine Näherung als Normalverteilung also nicht genau genug. Entsprechend werden in dieser Arbeit einzelne Tanks nur bei geringeren Entfernungen betrachtet, oder generell größere Tank-Aufbauten betrachtet, bei denen die Anzahl der Zerfälle nicht diesen Grenzwert unterschreitet.

Die Streuintervalle lassen sich in Konfidenzniveaus umschreiben. Die Wahrscheinlichkeit die Zufallsvariable (also  $n$ ) im  $[\lambda - z \cdot \sigma, \lambda + z \cdot \sigma]$ -Intervall anzutreffen ist gegeben durch

$$p(z) = 2 \cdot \Phi(z) - 1, \quad (2.4)$$

wobei  $\Phi(z)$  die Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung ist. Ein p-Wert von zum Beispiel 0.9 entspricht also dem 90 %-Konfidenzniveau und gibt an, das 90 % der Zufallsvariablen sich innerhalb des  $[\lambda - 1, 644854 \cdot \sigma, \lambda + 1, 644854 \cdot \sigma]$ -Intervalles befinden. In dieser Arbeit wird das 90 %-Konfidenzniveau als Indikator einer Materialabweichung gewertet.

Aber auch schon geringe Konfidenzniveaus können bei der Überwachungen eines Lagers als Anlass gewertet werden für weitere Messung mit dem Detektor. Es kann zum Beispiel die Messzeit verlängert werden oder die Position verändert werden, um genauere Aussagen über den Zustand des Materials treffen zu können.

## 2.4 Hanford S/SX-Tank-Farm

Für diese Arbeit wurde sich beispielhaft an der S/SX-Tank-Farm orientiert, welche hauptsächlich Abfälle aus einer chemischen Uran Aufbereitungsanlage, die bis 1962 tätig war, lagert [1]. Die Farm besteht aus 27 Tanks, zweier unterschiedlicher Arten. Die Platzierung der einzelnen Tanks in dem Lager sind in Abb. 2.1 zu sehen. Die Tanks unterscheiden sich

hauptsächlich durch ihr Volumen, von entweder  $100 \cdot 10^3$  Gal oder  $758 \cdot 10^3$  Gal. Beide sind zylinderförmig mit einem 23 m großen Durchmesser und besitzen eine Höhe von 11,4 m bzw. 13,4 m. Die Kuppel der Tanks befindet sich 1,8 m bis 2,46 m unterhalb der Oberfläche [6]. Der größere Tank ist also etwa 1,5 m tiefer im Erdreich platziert.

Das Volumen des Detektors wird in dieser Arbeit, wie in Abs. 3.2 näher beschrieben, auf  $80 \text{ m}^3$  festgelegt. Damit nimmt ein Tank eine signifikante Fläche unterhalb eines auf der Oberfläche platzierten Detektors ein und es wurde deshalb von der Annahme abgesehen, dass die Tanks Punktquellen darstellen. Vor allem für weiterführende Simulationen, die die Richtungsauflösung des Detektors berücksichtigen, ist es bei diesem Aufbau nicht sinnvoll die Dimensionen der Tanks zu vernachlässigen.

Neun der Tanks gelten als vermutlich undicht, und werden mit einem hohen Grundwasserbelastungsrisiko bewertet [7]. Dies liegt hauptsächlich am Alter und Verschleiß der Tanks. Hanford war nie dafür ausgelegt, als dauerhafte Lagerungsstelle zu dienen, wird aber, da in den USA noch kein Endlager festgelegt worden ist, weiter benutzt [8].

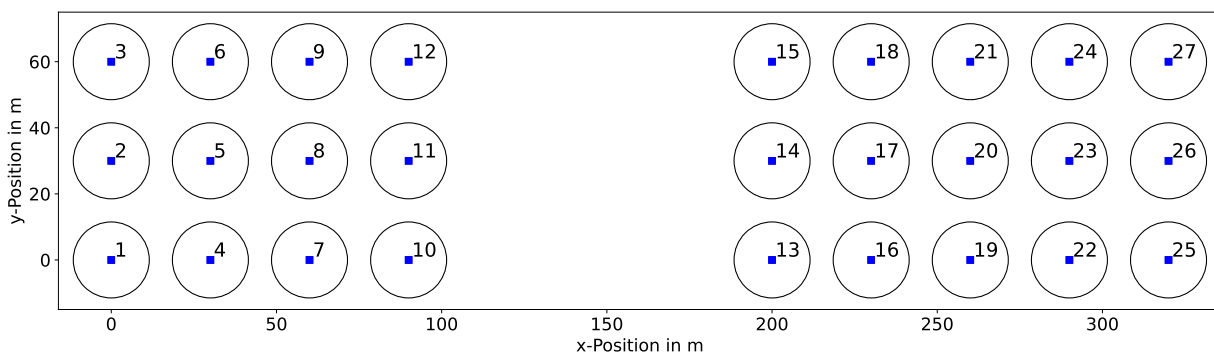


Abbildung 2.1: Positionen der einzelnen Tanks der S/SX-Tankfarm mit Nummerierung für spätere Referenz. Die blauen Quadrate stellen jeweils das Zentrum eines Tanks dar.

## 3 Zählraten

### 3.1 Grundlage

Der Großteil dieser Arbeit bezieht sich auf die Auswertung der simulierten Zählraten der Antineutrinos des Beta-Zerfalles. Da die Arbeit von Helge Haveresch [9] auf der selben Grundlage basiert, ist im Folgenden seine Ausführung zusammengefasst. Im Falle einer punktförmigen Strahlungsquelle ist die Zählrate  $n$  im Abstand  $R$  zwischen Strahlungsquelle und Detektor gegeben durch:

$$n = \frac{n_{emittiert}}{4\pi \cdot R^2} \cdot \sigma \cdot N_{Target}, \quad (3.1)$$

wobei hier  $n_{emittiert}$  die Emissionsrate des strahlenden Materials ist,  $\sigma$  der Wirkungsquerschnitt der Reaktion und  $N_{Target}$  die Anzahl der Targetteilchen. Der Detektor wird für die Entfernung zwischen Strahlungsquelle und Detektor als Punktförmig genähert.

Die Anzahl der Targetteilchen ergibt sich durch

$$N_{Target} = N_A \cdot \frac{\rho_{Target} \cdot V}{m_{mol,Target}} \cdot N_{Protonen} \quad (3.2)$$

und kann mithilfe der Eigenschaften des Targetmaterials TMS bestimmt werden. Die molare Masse beträgt  $m_{mol,Target} = 88,23 \frac{g}{mol}$ , die Dichte  $\rho_{Target} = 0,65 \frac{g}{cm^3}$  und die Anzahl freier Protonen  $N_{Protonen} = 12$ .

Der Wirkungsquerschnitt kann aus [10] angenähert werden durch

$$\sigma = 10^{-43} \text{cm}^2 \cdot p_e \cdot E_e \cdot E_\nu^{-0.07056+0.02018\log(E_\nu)-0.001953\log^3(E_\nu)}. \quad (3.3)$$

Die Neutrinoenergien aus radioaktiven Abfällen bewegen sich im Bereich von wenigen MeV, der Wirkungsquerschnitt liegt also in der Größenordnung von  $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-42} \text{cm}^2$ .

### 3.2 Simulationsgrundlage

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, ist nach einigen Jahren fast ausschließlich der Strontium-90 Zerfall im radioaktiven Abfall relevant für den Nachweis via IBD. Die Strontium-Gesamtaktivität ist mit  $12 \cdot 10^6 \text{ Ci}$  ( $4,44 \cdot 10^{17} \text{ Bq}$ ) und die Gesamtmenge an Müll ist mit  $7394 \text{ kGal}$  ( $27\,989 \text{ m}^3$ ) deklariert [7]. Diese Mengenangaben stellen die Referenzmengen für spätere Vergleiche dar. Es wurden im Vorfeld in dieser Arbeitsgruppe die Brennelemente eines Pressurized Water Reactors mit SERPENT 2 simuliert. Damit wurde das Antineutrino Energiespektrum von Brennelementen für verschiedene Zeitpunkte der Abkühlzeit simuliert [11]. Die Aktivität



eines 100 Jahre alten Brennstabes ist in den dabei durchgeführten Simulationen mit ungefähr  $182,57 \cdot 10^{12}$  Bq angegeben.

Um nun die Zählraten eines Hanford-Tanks zu simulieren, müssen die enthaltenen flüssigen radioaktiven Abfälle genähert werden. Da sich die Zusammensetzung der  $\beta$ -Strahler in diesen und den abgebrannten Brennstäben nicht wesentlich unterscheiden, lässt sich dasselbe Antineutrino Energiespektrum verwenden. Anhand der Strontium-90 Aktivität kann so eine bestimmte Anzahl Brennstäbe auf die in den Tanks vorhandene Menge radioaktiven Materials skaliert werden. Dafür sind zwei Annahmen getroffen worden. Es wurde zunächst angenommen, dass die Abfälle alle 100 Jahre alt sind. Außerdem wurde angenommen, dass die geschätzte Gesamtmenge des Abfalls gleichmäßig auf alle Tanks verteilt ist. Damit sind also alle Tanks auf die selbe Höhe befüllt. Dementsprechend ist in jedem Tank eine Aktivität des Strontium von  $1,64 \cdot 10^{16}$  Bq zu erwarten, was gerundet einer Anzahl von 90 Brennstäben pro Tank entspricht. Da die Brennstäbe als dimensionslos angenommen sind, wurden um die Dimensionen der Tanks ausgedehnt zu simulieren die 90 Brennstäbe gleichmäßig auf die Füllhöhe der einzelnen Tanks verteilt. Damit kann dann die Zählrate mithilfe von Gleichung 3.1 und dem simulierten Antineutrino Energiespektrum berechnet werden.

Ein weiterer Parameter, der in dieser Arbeit festgesetzt ist, ist das Detektorvolumen. Wie in Abschnitt 3.1 schon beschrieben, ist der Wirkungsquerschnitt für Neutrinointeraktionen in dem Energiebereich, der bei radioaktiven Abfällen erwartet wird, sehr klein. Um dennoch Zählraten zu erreichen, die groß genug für aussagekräftige Auswertungen sind, ist in dieser Arbeit das Volumen des Detektors auf  $80 \text{ m}^3$  festgelegt. Dies entspricht ungefähr der Größe eines Schiffscontainers und stellt einen guten Kompromiss zwischen Sensitivität und Transportfähigkeit des Detektors dar.

### 3.3 Analyse der Zählraten

Für einen ersten Überblick darüber, wie die Position des Detektors die Zählrate beeinflusst, wurde getestet, wie hoch die Zählraten sind, wenn das Detektorvolumen auf verschiedenen Positionen auf dem gesamten Hanford-Aufbau platziert wird.

Um also abschätzen zu können welchen Einfluss die Entfernung zwischen Detektor und einem Tank hat, wurden beispielhaft die Zählraten der einzelnen Tanks für die rechte Seite des Hanford-Aufbaus über 90 Tage simuliert, dargestellt in Abb. 3.1. Hier ist ein starker Unterschied in der Zählrate zu sehen, je nachdem ob der Detektor zentral über einem Tank platziert ist oder weiter von dem Tank entfernt liegt. Wie zu erwarten, trägt der Tank direkt unterhalb des Detektors mit 38,4% am stärksten zur aufsummierten, insgesamt detektierten Zählrate bei. Der nächstgelegenen Tank in 30 m Entfernung trägt nur noch 8,1% zur Gesamtzählrate bei, ein 60 m entfernter trägt noch 2,2% bei.

Es ist zu beobachten, dass die Zählraten bei gleicher Entfernung nicht identisch sind, sondern um bis zu 1,7 % abweichen. Diese Abweichung lässt sich auf die Simulation zurückführen, da die Ausdehnung der Tanks durch verteilte Punktquellen simuliert ist und diese geometrisch nicht gleich verteilt sind. Wie sich diese Zählratenabnahme auf die Sensitivität der Abweichungen zwischen gemessenem zu deklariertem Material auswirkt, ist im nächsten Abschnitt gezeigt.

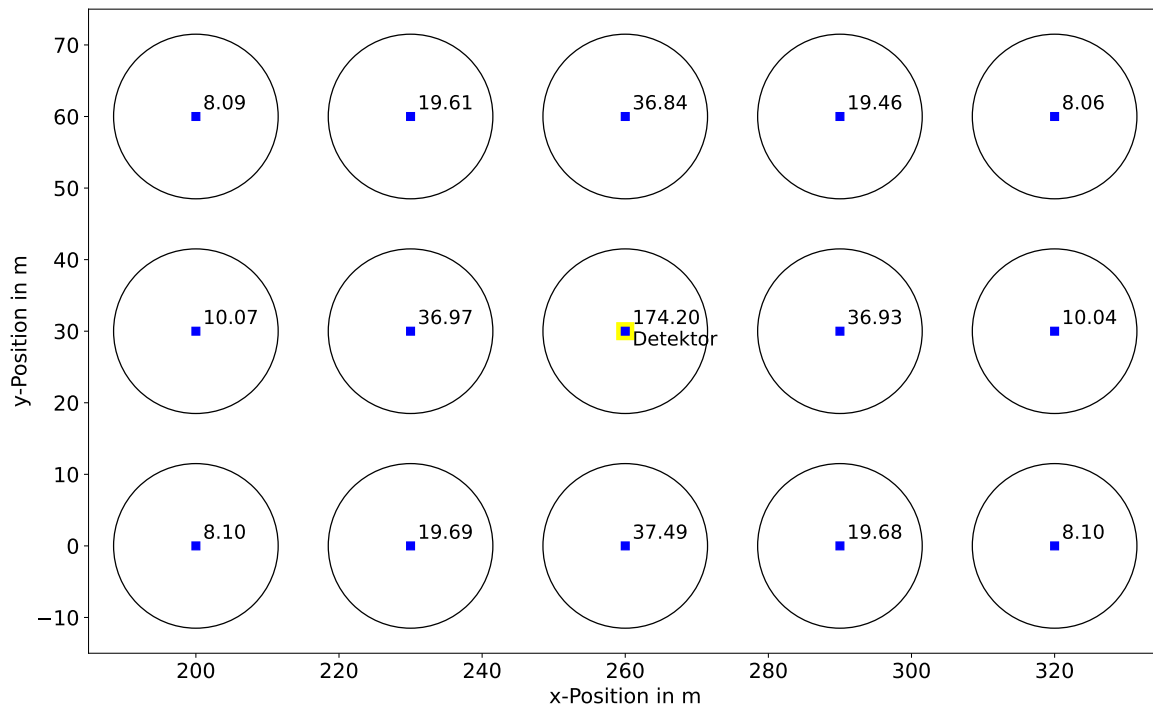


Abbildung 3.1: Zählraten der einzelnen Tanks nach 90 Tagen simuliert, wobei der Detektor auf der gelben Markierung positioniert ist.

## 4 Detektions-Szenarien

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Detektions-Szenarien vorgestellt. Dabei wird bewertet, welche Detektorkonstellation am effizientesten ist, um Abweichungen in allen Tanks nachweisen zu können. Außerdem wird bewertet welchen Einfluss eine Richtungsauflösung des Detektors auf die Sensitivität hat.

In einer vorangegangenen Arbeit [9] wurde bereits die Überwachung des Endlagers in Gorleben thematisiert. Dort konnte die Problematik gezeigt werden, dass es bei einer Platzierung eines einzelnen Detektors auf einer festen Position zu einer Verringerung der Sensitivität auf das Fehlen eines Tankes am Rande führt. Die Überwachung des Endlagers wurde in dem Fall von Gorleben mit einem Detektor 50 m oberhalb der Tankverteilung simuliert.

Zwischenlager haben im Gegensatz zu Endlagern geringere Lagerungsanforderungen, da sie für kürzere Zeiträume vorgesehen sind. So können sich hier, wie im Falle von Hanford, die Tanks nur wenige Meter unterhalb der Oberfläche befinden. Es ist also leichter einen Detektor nah an den einzelnen Tanks zu positionieren. Deshalb wird in diesem Kapitel getestet, ob für ein Zwischenlager ähnliche Sensitivitätsverluste mit der Entfernung auftreten und es werden Vorschläge gemacht, wie man solchen verringern kann.

### 4.1 Abweichende Mengenangabe

Die aktuell angenommen Mengenangaben des radioaktiven Materials in den Hanford-Tanks sind mit einer großen Unsicherheit versehen. Entsprechend soll im Folgenden getestet werden, wie verschiedene Detektorpositionen die Sensitivität auf Abweichungen der erwarteten Menge beeinflussen.

Für die Simulation einer Veränderung der Menge wurde die Anzahl der in den Tanks vorhandenen Brennstäbe angepasst. Mit dieser neuen Zählrate kann dann die Abweichung zu der erwarteten Zählrate bestimmt werden, welche sich durch die deklarierte Menge an Material in den Tanks ergibt, die in Abschnitt 3.2 beschrieben ist.

Abbildung 4.1 zeigt den in Abschnitt 2.3 beschriebenen p-Wert für einen Detektor direkt oberhalb eines Tanks in Abhängigkeit zur simulierten Messzeit und Menge an fehlendem oder hinzugefügtem Material. Simuliert wurden Szenarien mit Entnahme und Hinzufügung von bis zu 100 % Material aus dem unter dem Detektor befindlichen Tank. Die Linien zeigen die Konfidenzintervalle für 90 % und 95 %. Diese Abbildung liefert einen Überblick über die Sensitivität gegenüber Materialabweichungen des vollen Detektorvolumens.

Wie zu erkennen ist, gibt es einen Unterschied zwischen den beiden Simulationen. Eine Materialzunahme von 10 % lässt sich im 90 %-Konfidenzniveau innerhalb von 80 Tagen nachwei-

sen. Eine 10 % Materialabnahme hingegen lässt sich im 90 %-Konfidenzniveau innerhalb von 120 Tagen nachweisen. Der Unterschied kann durch die Verteilung der Brennstäbe erklärt werden. Zusätzliche Brennstäbe werden in der Simulation weiter oben im Tank platziert, um eine größere Füllhöhe zu simulieren, wohingegen bei der Entfernung von Brennstäben die Füllhöhe verringert wird. Dieser Unterschied in der Tiefe der einzelnen Brennstäbe sorgt, aufgrund der höheren Zählrate, für eine Verbesserung der Sensitivität des Detektors. Aber es lässt sich trotzdem sagen, dass die Sensitivität für Materialabweichungen des Tanks unterhalb des Detektors sehr hoch ist.

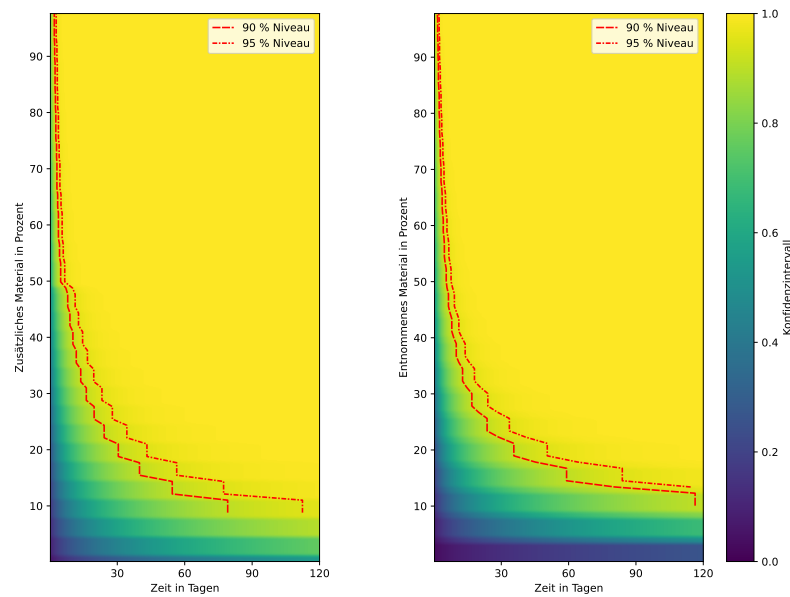


Abbildung 4.1: Hypothesentest für Simulation eines Tanks direkt unterhalb des Detektors über 90 Tage. Links: Der Tank enthält bis zu 100 % mehr Material. Rechts: Der Tank enthält bis zu 100 % weniger Material.

Um zu überprüfen, wie sich die Abnahme der Zählrate bei größeren Entfernungen auf die Sensitivität des Detektors auswirkt, ist in Abb. 4.2 der direkte Vergleich von einem Abweichungs-Szenario eines Tanks bei drei verschiedenen Entfernungen zum Detektor dargestellt. In dem Szenario das hier beispielhaft ausgewählt wurde, ist die Menge des radioaktiven Materials im Tank geringer als erwartet. Ein Detektor ist entweder 0 m, 30 m oder 60 m von einem Hanford-Tank entfernt und es wird simuliert, dass 0 bis 100 Prozent an Material fehlen und wie signifikant diese Abweichungen in 120 Tagen messbar sind.

Wie man gut erkennen kann, ist die Sensitivität, wenn der Detektor direkt über dem Tank platziert ist, hoch. Alle Abweichungen bis hin zu 10 % weniger Material als angegeben, können innerhalb von knapp 120 Tagen im 90 %-Konfidenzniveau nachgewiesen werden.

Bei 30 Metern Entfernung vom Tank nimmt die Sensitivität schon deutlich ab. Es lassen sich im 90 %-Konfidenzniveau in 120 Tagen nur eine Entnahme bis zu knapp unter 30 % nachweisen. Bei 60 Metern Entfernung sind es sogar nur bis zu 55 % die nachweisbar sind.

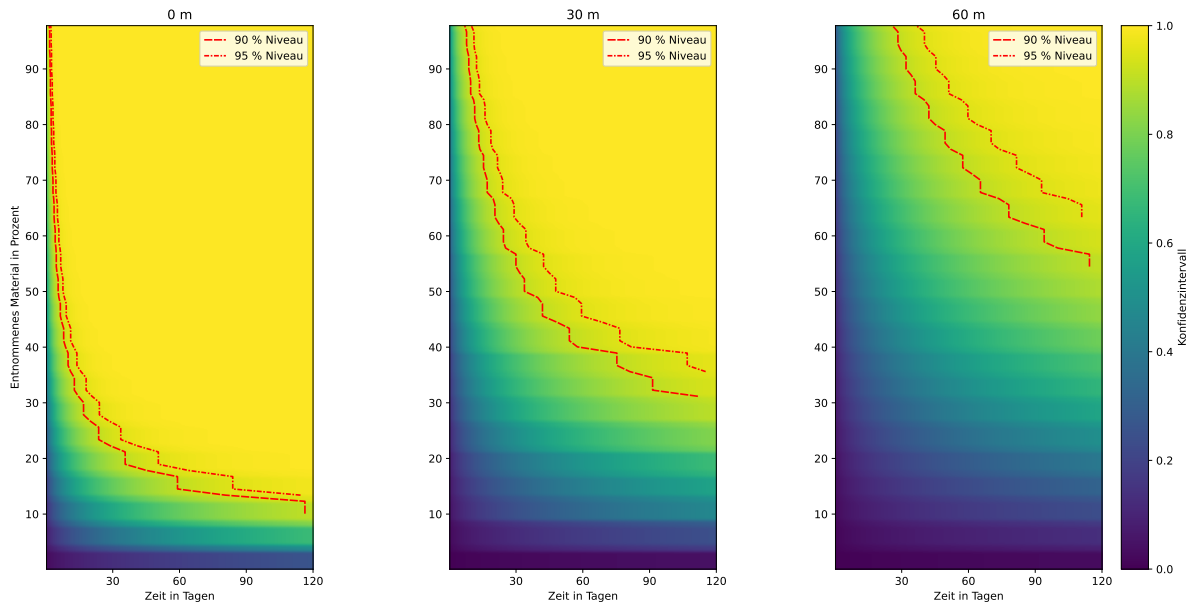


Abbildung 4.2: Hypothesentests eines Entnahmeszenario, für das ein einzelner Hanford-Tanks bei 0m (links), 30m (Mitte) und 60m (rechts) Entfernung zum Detektor positioniert ist.

Um diese Abnahme der Sensitivität auf Abweichungen der Materialmenge zu umgehen, wird hier als Alternative zu feststehenden Detektoren die Idee diskutiert, den Detektor in gewissen zeitlichen Abständen auf eine neue Position zu versetzen. Da diese Abweichung, wenn der Detektor direkt oberhalb eines Tanks platziert ist, schon bei der Entfernung von 30 m zu den vier nächst gelegenen Tanks deutlich ist, wird eine Positionierung vorgeschlagen, bei der diese 30 m die maximale Entfernung zwischen Detektor und Tank sind. Die naheliegendste Variante ist es den Detektor jeweils zentral auf die Tanks der mittleren Reihe des Aufbaues zu platzieren (Positionen 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23 und 26, siehe Abbildung 2.1). So könnte trotz kürzerer Messzeit bei den einzelnen Positionen die Sensitivität für alle Tanks erhöht werden.

#### 4.1.1 Vergleich

Für einen direkten Vergleich der Szenarien mit unbewegtem und bewegtem Detektor für das Hanford-Lager wurde angenommen, dass die Menge des Materials falsch deklariert worden ist und sich im gesamten Aufbau beispielhaft 25 % mehr Material als ursprünglich angenommen befindet. Es wurde, anstelle der kompletten Abweichung von 0 bis 100 Prozent, nur mit 25 % gearbeitet, um die einzelnen Messungen besser vergleichen zu können. Mit Hilfe dieses Vergleiches kann gezeigt werden, inwieweit die kürzeren Messzeiten des bewegten Szenarios sich auf die Sensitivität für Abweichungen auswirkt. Außerdem wird nochmal anhand eines Beispiels gezeigt, inwiefern in beiden Szenarien Aussagen über die weiter entfernten Tanks getroffen werden können.

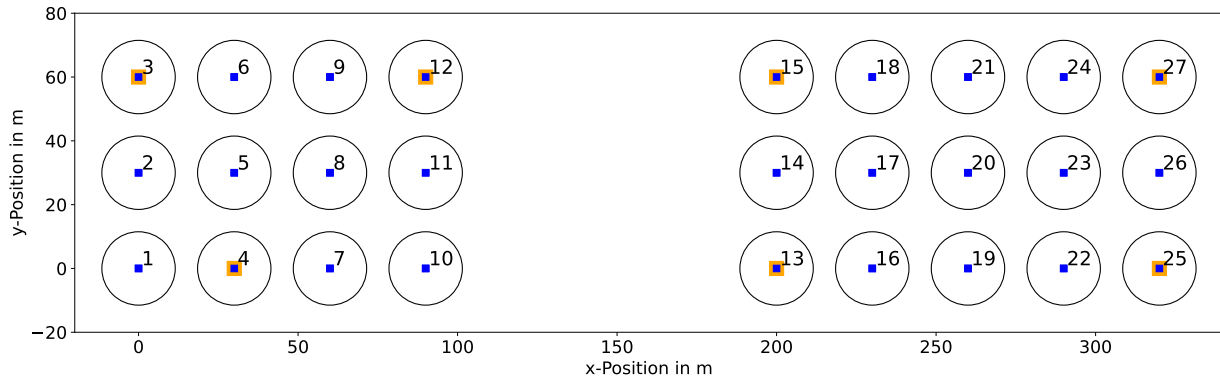


Abbildung 4.3: Auswahl der Tanks mit doppeltem Material, jeweils in Orange markiert.

Bei dem Vergleich der beiden Detektor-Szenarien wird noch einmal zwischen zwei verschiedenen Materialabweichungs-Szenarien unterschieden. Szenario 1 befasst sich mit dem Fall, dass insgesamt die Menge des Materials um 25 % falsch abgeschätzt wurde. Für die Simulation ist die Menge der Brennstäbe auf 112 pro Tank erhöht worden.

Szenario 2 zielt darauf ab, zu testen wie sensitiv die beiden Detektor-Szenarien auf Materialabweichungen in weiter entfernten Tanks sind. Dafür wurden sieben Tanks ausgewählt, die Positionen sind in Abb. 4.3 dargestellt. Diese Auswahl wurde getroffen, indem abgewogen wurde, welche Tanks am weitesten von beiden Detektorpositionen entfernt sind. In diesen Tanks sind dann für die Simulation die darin enthaltenen Brennstab-Einheiten auf 180 verdoppelt, um so auch insgesamt auf ungefähr 25 % mehr Material zu kommen.

Bei dem unbewegten Szenario wurde sich für eine feste Detektorkonstellation entschieden, bei dem das Detektorvolumen von  $80 \text{ m}^3$  gleichmäßig auf zwei Detektoren aufgeteilt ist, da der gesamte in dieser Arbeit simulierte Aufbau in Hanford aus zwei Teilen mit einer 110 m großen Lücke besteht. Um hier die höchste Zählrate zu erhalten, bei der man auf die höchste Sensitivität schließen kann, sind alle möglichen Konstellationen der beiden Detektoren getestet worden.

Die Konstellation Position 8 und Position 20 (siehe Abb. 2.1) weist hier die höchsten Zählrate auf für den Fall, dass sich jeweils ein Detektor auf jeder Seite des Aufbaus befindet. Deshalb ist diese Positionierung für die weiteren Simulationen gewählt worden.

In Abb. 4.4 ist die Simulation von 25 % an zusätzlichem, gleichmäßig verteiltem Material zu sehen. Wie man anhand der 90 %-Linie erkennen kann, lassen sich hier schon nach knapp über 15 Tagen die Abweichungen in dem 90 %-Konfidenzniveau nachweisen. Diese Messung

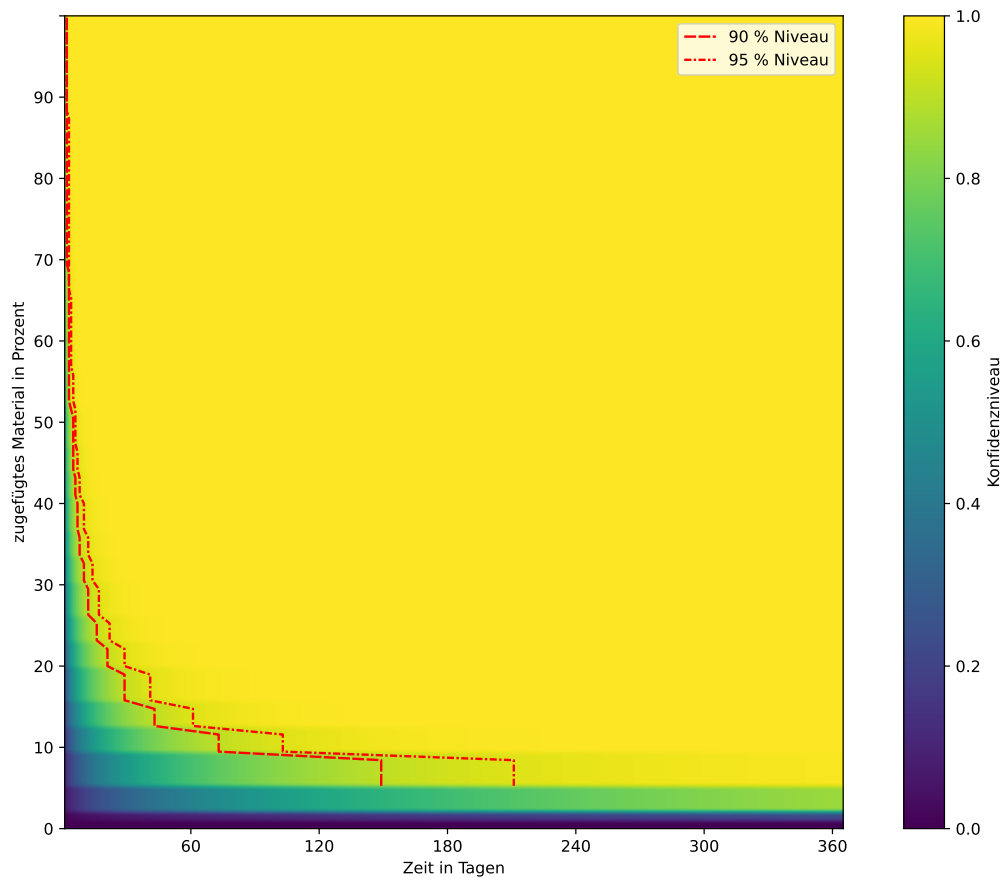


Abbildung 4.4: Hypothesentest für das Szenario, dass alle Tanks gleichmäßig 25 % mehr Material enthalten und der Detektor ist unbewegt über Tank-Position 8 und 20 positioniert. Die Messzeit beträgt 365 Tage.

liefert also sehr schnell einen Indikator für eine Materialabweichung.

Wenn man Abb. 4.4 mit Abb. 4.1 vergleicht, ist zu erkennen, dass der Detektor bei dem gesamten Tankaufbau im Verhältnis zu einem einzelnen Tank nur minimal sensitiver ist. Dieser geringe Unterschied lässt sich wieder auf die starke Zählratenabnahme mit der Entfernung zurückführen.

Abbildung 4.5 zeigt die Ergebnisse der Simulationen des Szenarios 2. Der unbewegte Detektor weist im Verhältnis zu Szenario 1 eine deutliche Verringerung der Sensitivität auf. Die 25 % Abweichung lässt sich erst nach 115 Tagen im 90 %-Konfidenzniveau nachweisen, was einer Erhöhung der Messzeit von 100 Tagen entspricht. Außerdem ermöglicht diese Messung es nicht zu unterscheiden, ob zum Beispiel in dem Tank unterhalb des Detektors eine geringe Materialabweichung vorliegt, oder wie im simulierten Fall eine große Abweichung in weiter entfernten Tanks.

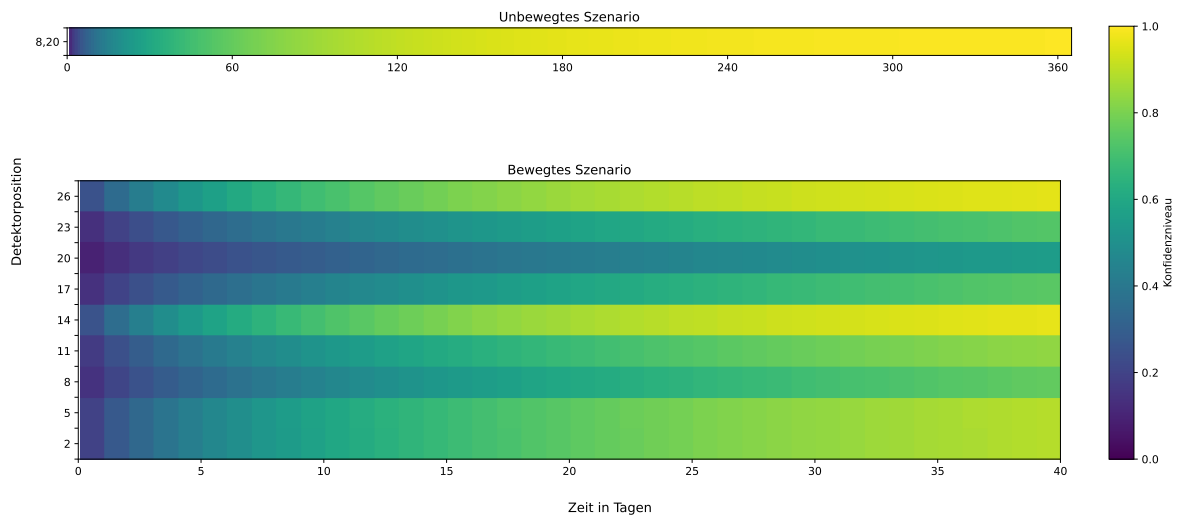


Abbildung 4.5: Hypothesentest für das Szenario, die in Abb. 2.1) markierten Tanks haben doppelt so viel Material wie ursprünglich deklariert. Oben: Unbewegtes Detektorszenario mit einer Messzeit von 365 Tagen. Unten: Bewegtes Detektorszenario, bei jeder Position werden 40 Tage gemessen.

Für das bewegte Detektorszenario, wurde wie bereits in Abschnitt 4.1 vorgeschlagen, der Detektor zentral oberhalb der neun Tanks der mittleren Reihe des Hanford-Aufbaues positioniert. Dort wurde auf jeder Position eine Messzeit von 40 Tagen simuliert. Somit kommt man insgesamt auf eine Messdauer von 360 Tagen, diese Messzeit wurde auch für den Vergleich bei dem unbewegten Szenario simuliert.

Die Simulation des Szenario 1 mit 25 % zusätzlichem Material, dargestellt in Abb. 4.6, sieht ähnlich zum unbewegten Szenario aus. Die Abweichungen lassen sich auch hier nach 12 bis 14 Tagen in dem 90 %-Konfidenzniveau nachweisen. Hier fällt jedoch sofort auf, dass für alle Detektorpositionen die Simulation sehr ähnlich aussieht. Die einzigen Unterschiede der benötigten Messzeit sind bei Position 2, 11, 14 und 26 zu sehen. Diese lassen sich durch den Tankaufbau erklären, da bei den Positionen jeweils eine Reihe aus drei Tanks weniger vorhanden ist. Dadurch ist die Zählrate niedriger und die Abweichung benötigt eine etwas längere Messzeit um statistisch auffällig zu sein. Da sich die Unterschiede durch den Tankaufbau erklären lassen, liegt es nahe, dass für alle Tanks eine ähnliche Abweichung vorliegt. Man kommt also damit zu einem Ergebnis mit einer höheren Aussagekraft.

Das Szenario 2, ebenfalls in Abb. 4.5 dargestellt, zeigt wie erwartet auch für das bewegte Detektorszenario eine geringere Sensitivität. Der Detektor kann bei Position 14 und 26 die Zählratenabweichung nach 26 (Position 14) oder 27 (Position 26) Tagen im 90 %-Konfidenzniveau nachweisen. Bei diesen beiden Positionen enthalten zwei 30 m entfernte Tanks doppelt so viel Material. Bei Position 2 und 5, mit nur einem 30 m entfernten Tank mit zusätzlichem Material, wird nach den 40 Tagen das 89 %-Niveau nachgewiesen. Hier korrespondieren die Unterschiede im Konfidenzniveau der einzelnen Messungen deutlich mit



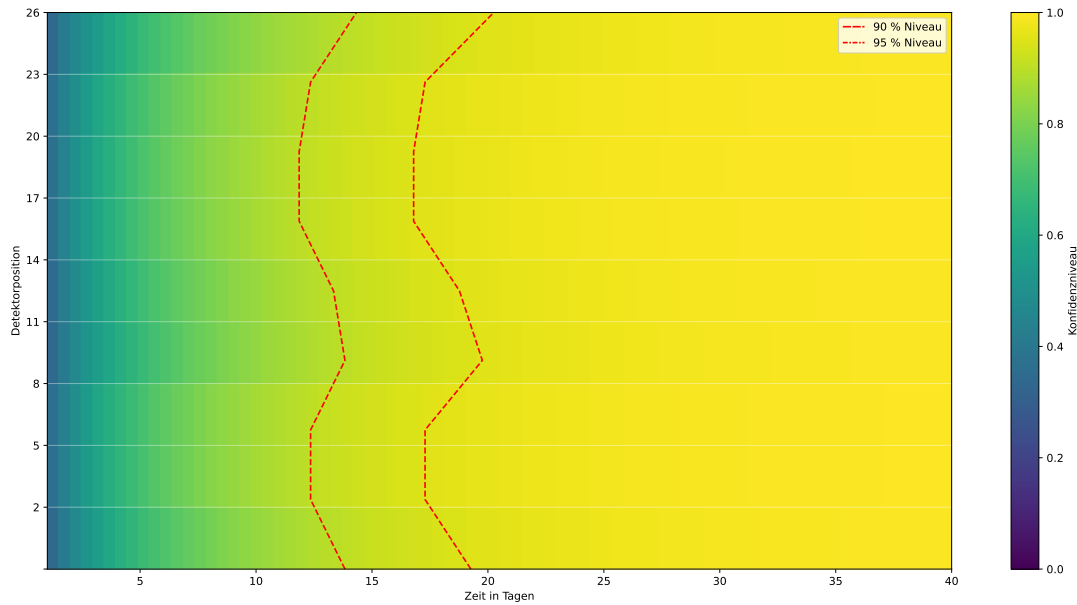


Abbildung 4.6: Hypothesentest für das Szenario, dass alle Tanks gleichmäßig 25 % mehr Material als deklariert enthalten. Der Detektor wird über die auf der y-Achse angegebenen Tankpositionen, analog zu Abb. 2.1, für jeweils 40 Tage positioniert

der Verteilung der mit mehr Material versehenen Tanks. Die Messung bei Position 14 und 26 sind damit aussagekräftig genug um einen Indikator für eine Abweichung darzustellen, da sie im 90 %-Niveau liegen. Bei den Positionen 2 und 5 ist die Abweichung der Zählrate nur knapp unterhalb des 90 %-Niveaus, damit würde eine Verlängerung der Messzeit um wenige Tage ausreichen, um dieses zu erreichen und ebenfalls einen Indikator für die Abweichung zu liefern.

Schwieriger einzuordnen ist die Messung an Position 11. Hier wird nach den 40 Tagen ein Konfidenzniveau von 84 % erreicht. Die Messung bei Position 8 liefert keinen Indikator für hohe Abweichungen, die auch noch die Messung auf Position 11 beeinflussen könnte. Außerdem befindet sich Position 11 am Rande der linken Seite des Hanford Aufbaues, wo die geringeren Zählraten die Sensitivität des Detektors beeinflussen. Damit liefern Position und umliegende Messungen Anlass, für eine genauere Aussage, die Messzeit an dieser Stelle zu erhöhen. Die Abweichungen der Messungen auf Position 17 und 23 lassen sich durch Materialabweichungen, die der Detektor auf Position 14 und 26 detektiert, erklären und liefern dadurch keinen weiteren Anlass für längere Messzeiten. Damit liefert ein bewegter Detektor eine deutlich höhere Aussagekraft über den Zustand der einzelnen Tanks als der unbewegte Detektor. Bei gleicher Messzeit können schon einzelne Bereiche, in denen Abweichungen vorliegen könnten, identifiziert werden und es kann ein genauerer Plan für weitere Messungen aufgestellt werden.

In beiden Abweichungsszenarien kann die Richtungsauflösung eine Lokalisierung der Tanks in denen eine Abweichung vorliegt bedeuten. Diese Identifikation des Tanks würde bedingen, dass genauere Überprüfungen stattfinden können. Statt, wie bei der Messung auf Position 2 die Messzeit zu erhöhen, kann damit direkt der Detektor über den auffälligen Tank platziert werden und so schneller ein genaueres Ergebnis liefern.

Für das unbewegte Detektorszenario beträgt der minimale Winkelabstand der beiden nächstgelegenen Tankränder von dem Detektor aus betrachtet, ungefähr  $10^\circ$ . Aber bei den weiter entfernten Tanks ist für eine eindeutige Unterscheidung zwischen einem 30 und einem 60 Meter entfernten Tank schon eine Auflösung von  $2^\circ$  notwendig. Da die einzelnen Zerfälle gleichmäßig auf das Tankvolumen verteilt sind, lässt sich zwar hier davon ausgehen, dass man bereits mit einer geringeren Auflösung zwischen verschiedenen Tanks unterscheiden kann, aber im Verhältnis zum bewegten Detektorszenario, bei dem der Detektor mittig oberhalb von einer Reihe aus drei Tanks positioniert ist, entspricht der minimale Winkelabstand zweier Tankränder von dem Detektor aus betrachtet, ebenfalls ungefähr  $10^\circ$ . Hier ist es jedoch nicht nötig weiter entfernte Tanks zu betrachten. Die benötigte Auflösung für eine zweifelsfreie Differenzierung der Tanks ist also  $10^\circ$ . Mit der Identifizierung des Tanks bei dem eine Abweichung vorliegt, ist dann auch die Entfernung zwischen dem Tank und dem Detektor bekannt. Dadurch besteht die Möglichkeit, mithilfe der detektierten Zählrate und deren Abweichung zur erwarteten Zählrate, Aussage über die tatsächliche Menge des in dem Tank enthaltenen radioaktiven Materials zu machen.

Es zeigt sich, dass das unbewegte Detektorszenario die simulierten Abweichungen zwar ebenfalls detektieren kann, aber keine Vorteile zum bewegten Detektorszenario liefert. Die kürzeren Messzeiten des bewegten Szenarios haben zwar Einfluss auf die Sensitivität, sind aber nicht so relevant wie die Entfernung zwischen Detektor und Tank, deren negativer Einfluss in diesem Simulationsszenario verringert werden konnte. Diese Entfernung sorgt genau wie beim Endlagerszenario für einen großen Sensitivitätsverlust, welcher sich aber durch den flexibleren Detektor ausgleichen ließe. Außerdem ist in dem bewegten Detektorszenario die Richtungsauflösung von deutlich größerem Nutzen.

## 4.2 Richtungsrekonstruktion

Eine weitere wichtige Eigenschaft des LOr-TPCs, dessen Potential schon vorher in der Arbeit erwähnt wurde, ist die Richtungsrekonstruktion. In [4] wurde eine erste Richtungsrekonstruktion des Neutrinos vorgeschlagen. Bei dem IBD werden zur Detektion eines Antineutrinos Positron und Neutron nachgewiesen. Das Neutron erfährt verschiedene elastische Stöße, primär mit Protonen und es hat sich gezeigt, dass der Informationsgehalt zur Rekonstruktion bei dem ersten Protonenstoß am höchsten ist. Da der Winkel zwischen Antineutrino und Neutron für das bei radioaktiven Abfällen auftretende Energiespektrum, auf einen Bereich zwischen  $0^\circ$  und  $21^\circ$  beschränkt ist, lässt sich mit Hilfe der Neutronenrichtung die Richtung des Antineutrinos rekonstruieren.

Zunächst ist es sinnvoll generell zu testen, welchen Einfluss eine Richtungsrekonstruktion auf die Sensitivität hat, indem die Auflösung als ideal angenommen wird. Da hier der Fokus auf der Richtungsauflösung liegt, wird ein weiterer Aufbau für die Positionierung des Detektors vorgeschlagen. Der Detektor wird mittig oberhalb von vier Tanks positioniert. So liegt zwischen den nächstgelegenen Tanks der größtmögliche Winkelabstand. Die restlichen Tanks werden vernachlässigt. Bei idealer Auflösung kann sich dann einer der Tanks genau von den anderen differenzieren lassen. Um den Unterschied den die Richtungsrekonstruktion hier macht zu zeigen, wurden einmal alle vier Tanks simuliert, wobei bei einem eine Materialabweichung vorliegt, dargestellt in Abb. 4.7. Für den Vergleich wurde dann noch ein einzelner der vier Tanks mit Abweichung simuliert, dargestellt in Abb. 4.8. In Abb. 4.7 ist zu erkennen, dass sich bei einer Messzeit von 90 Tagen eine Materialabweichung von knapp 65 % im 90 %-Konfidenzniveau nachweisen lässt. Bei dem einzelnen Tank lässt sich in 90 Tagen eine Abweichung von 23 % im 90 %-Niveau nachweisen. Bei gleicher Messzeit ist also die Sensitivität um 42 % erhöht.

Die Richtungsrekonstruktion kann auch für die Detektion von Versickerungen des Materials durch beschädigte Tanks genutzt werden. Bei Versickerungen treten meist geringere Mengen aus und es besteht die Chance, dass das ausgelaufene Material nicht weit genug vom Tank entfernt ist um signifikante Abweichungen in der Zählrate zu erhalten. In Hanford selbst konnte solche Versickerungen aufgrund von undichten Tanks schon nachgewiesen werden. Die radioaktiven Materialien, die dort versickert sind und die aktuell mit einem hohen Grundwasserrisiko bewertet wurden, enthalten kaum Strontium und sind dementsprechend nicht mit der LOr-TPC nachweisbar. Da diese Vorfälle aber dennoch zeigen, dass Material austritt und nicht ausgeschlossen werden kann, dass dieses kein Strontium enthält, wird im Folgenden getestet, wie gut eine LOr-TPC dafür geeignet ist.

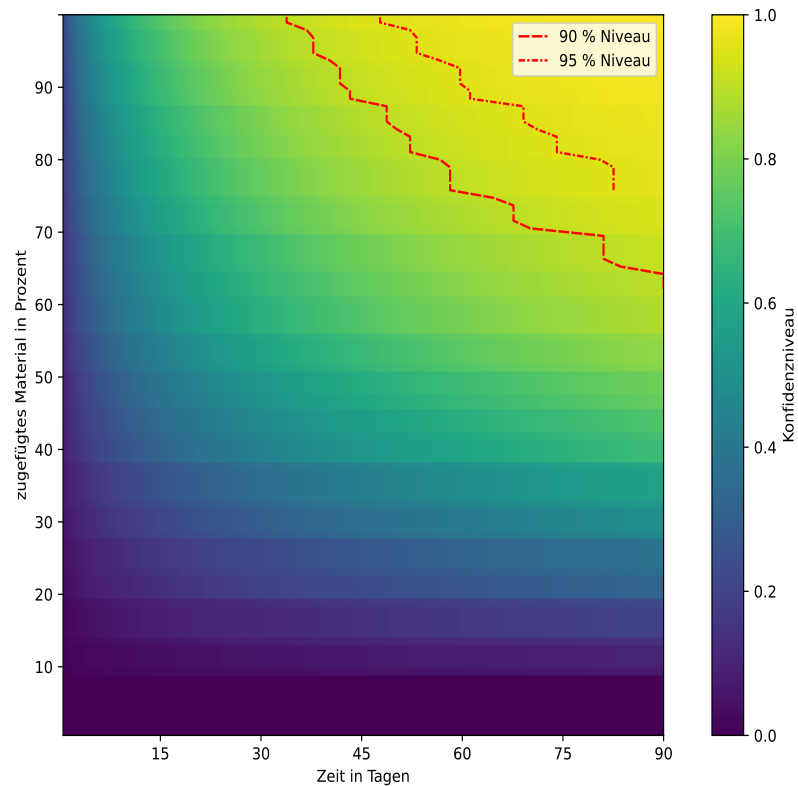


Abbildung 4.7: Hypothesentest für Entnahme-Szenario bei dem der Detektor oberhalb von vier Hanford-Tanks platziert ist, die jeweils 30 m voneinander entfernt sind. Nur einer der Tanks hat weniger Material.

Dieses Szenario ist in Abb. 4.9 dargestellt. Hierbei wurde angenommen, dass sich das ausgetretene Material eines Tanks zehn Meter unterhalb von diesem auf eine Punktquelle konzentriert. Um die Richtungsauflösung möglichst effizient auszunutzen, wurde wieder die am Anfang des Abschnittes beschriebene Detektorposition simuliert und angenommen, dass sich das versickerte Material eindeutig von dem darüber liegenden Tank unterscheiden lasse. In einer Messzeit von 85 Tagen lassen sich im 90 %-Konfidenzniveau etwa 15 % ausgetretenes Material nachweisen. Bei idealer Richtungsrekonstruktion kann die Messung also schon einen Indikator für geringe Versickerungen liefern.

Die Richtungsrekonstruktion bringt also eine merkliche Erhöhung der Sensitivität des Detektors mit sich und ermöglicht einen Indikator für Versickerungen zu liefern.

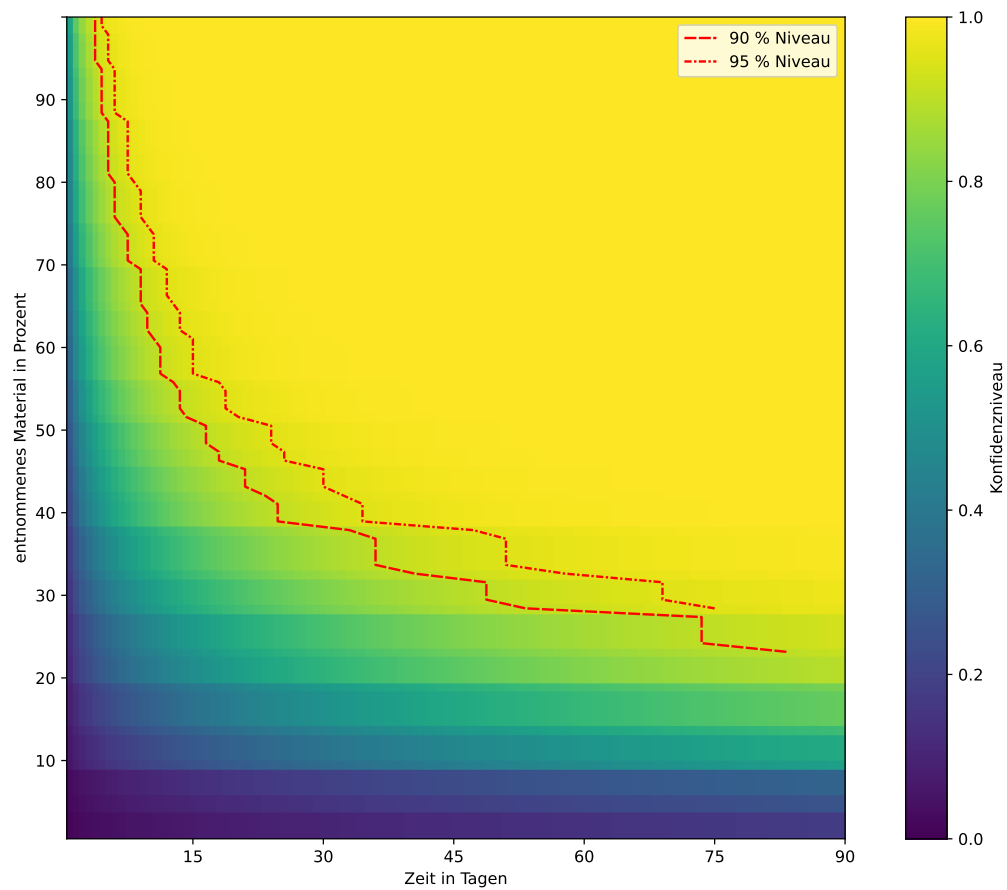


Abbildung 4.8: Hypothesentest für Entnahme-Szenario eines einzelnen Tanks, der Detektor ist 21,2 m von dem Tank entfernt.

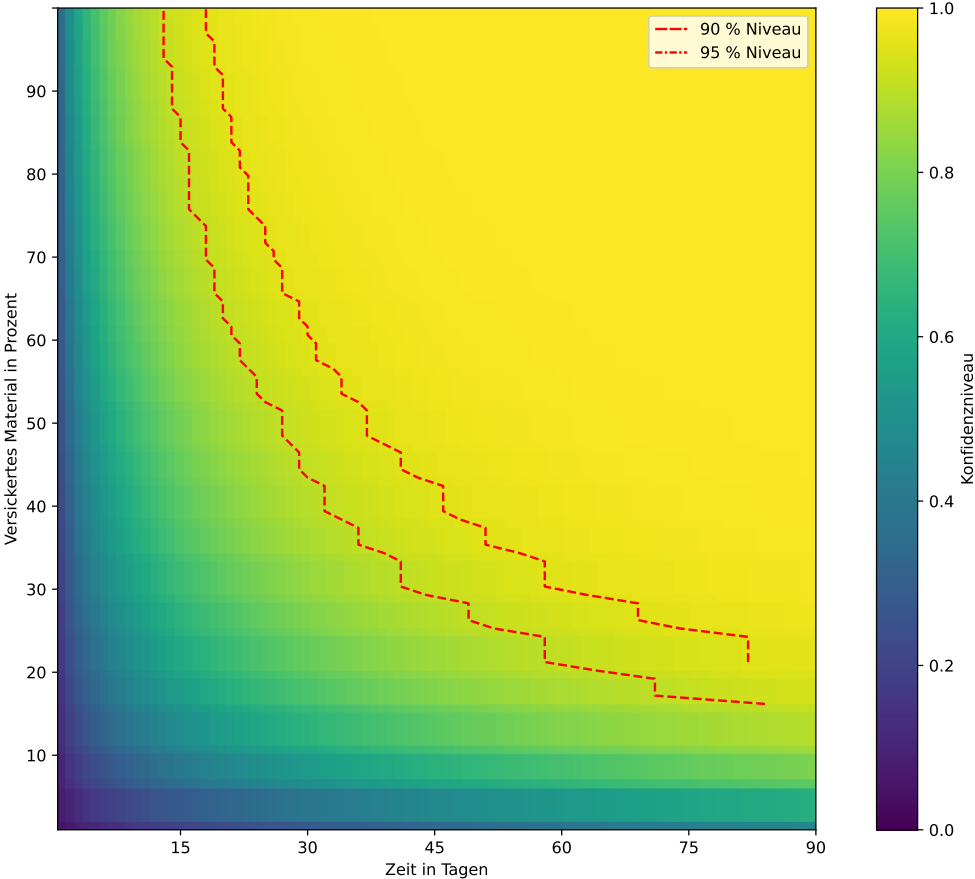


Abbildung 4.9: Hypothesentest für das Versickerungs-Szenario. Anteile eines Tanks befinden sich auf einem Punkt mittig 10 m unterhalb des Tankbodens konzentriert.

## 5 Fazit und Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen zeigen, welche Möglichkeiten eine LOr-TPC zur Überwachung eines Zwischenlagers liefert. Der Fokus lag darauf, welchen Einfluss die Position des Detektors und die aktuell erhoffte Richtungsrekonstruktion auf die Sensitivität hat.

Es konnte gezeigt werden, dass die Entfernung zwischen Detektor und den Tanks auch in einem Zwischenlager, bei dem der Detektor nur wenige Meter oberhalb der Tanks platziert werden kann, einen großen Einfluss auf die gemessene Zählrate und dementsprechend auch auf die Sensitivität hat. Der Vergleich zwischen einem unbewegten und bewegten Detektor hat gezeigt, dass der unbewegte Detektor in allen betrachteten Szenarien eine sichere Indikation für eine Abweichung der deklarierten Menge liefern konnte. Im Gegensatz zum bewegten Detektor kann mit nur einer Messung keine genauere Aussage darüber getroffen werden, wo sich Tanks mit abweichenden Materialmengen befinden und wie hoch diese Abweichungen sind. Obwohl die kürzeren Messzeiten an den einzelnen Positionen einen negativen Einfluss auf die Sensitivität haben, bietet der bewegte Detektor einen klaren Vorteil. Durch die Messungen an mehreren Positionen wird der Überblick über das gesamte Lager erhöht, da die maximale Entfernung zwischen Detektor und Tank auf 30 m beschränkt wird. Es kann außerdem der Bereich, in dem sich ein abweichender Tank befinden kann, auf maximal drei Tanks beschränkt werden, was eine schnellere und genauere Zuordnung ermöglicht. Dies kann somit direkt Anlass für weitere Messungen liefern, um so selbst ohne Richtungsauflösung, den Tank zu identifizieren, bei dem Abweichungen vorliegen.

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Richtungsrekonstruktion auf die Sensitivität betrachtet. Die vorliegenden Untersuchungen zeigten, dass diese für eine ideale Auflösung eine deutliche Verbesserung der Sensitivität mit sich bringt. Außerdem ermöglicht sie auch die Detektierung von versickertem Material unterhalb der Tanks. Aber auch im vorgeschlagenen bewegten Szenario bedeutet eine Richtungsauflösung, selbst bei einer geringen Genauigkeit, eine schnellere Identifizierung eines Tanks mit Abweichungen. Sie ist also ein wichtiger Faktor für die Sensitivität einer LOr-TPC.

In dieser Arbeit wurde mit einigen Annahmen für die Verteilung des radioaktiven Abfalls in den Tanks gearbeitet. Für eine genauere Auswertung der Überwachung von Zwischenlagern mittels einer LOr-TPC müssen diese Idealisierungen mehr auf reale Szenarien zugeschnitten werden. Es muss untersucht werden, welchen Einfluss das Alter des radioaktiven Mülls in einem Tank auf die Sensitivität hat, vor allem in Fällen wo das Alter nicht einheitlich ist und inwiefern dieses die Aussagekraft einer solchen Überwachung beeinflusst. Ein weiteres interessantes Szenario ist es, eine unbekannte Verteilung des Abfalls in den Tanks anzunehmen und hier ebenfalls den Einfluss auf die Überwachung mittels LOr-TPCs zu untersuchen.

---

Eine weitere wichtige Frage, die es in Anknüpfung an diese Arbeit noch zu beantworten gilt ist, wie weitreichend die Verbesserung der Sensitivität durch die Richtungsauflösung bei der aktuell prognostizierten Auflösung tatsächlich ist. Dafür muss mit der Verteilung des Winkels zwischen Neutron und Antineutrinos der Winkel des Antineutrinos rekonstruiert werden und mithilfe dieser weitere Hypothesentest zur Bewertung durchgeführt werden.



## 6 Danksagung

Abschließend möchte ich mich noch bei Stefan Roth dafür bedanken, dass ich mich im Rahmen dieser Arbeit unter seiner Betreuung mit diesem interessanten Thema auseinandersetzen konnte. Besonders möchte ich mich auch bei Thomas Rademacher bedanken, für die geduldige und ausführliche Betreuung in den letzten drei Monaten. Die Meetings mit ihrer angenehmen Atmosphäre und lehrreichen Diskussionen mit Malte Göttsche und der restlichen Gruppe, haben diese Bachelorarbeit zu einer guten Erfahrung gemacht.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Positionen der einzelnen Tanks der S/SX-Tankfarm mit Nummerierung für spätere Referenz. Die blauen Quader stellen jeweils das Zentrum eines Tanks dar. . . . .	6
3.1	Zählraten der einzelnen Tanks nach 90 Tagen simuliert, wobei der Detektor auf der gelben Markierung positioniert ist. . . . .	9
4.1	Hypothesentest für Simulation eines Tanks direkt unterhalb des Detektors über 90 Tage. Links: Der Tank enthält bis zu 100 % mehr Material. Rechts: Der Tank enthält bis zu 100 % weniger Material. . . . .	11
4.2	Hypothesentests eines Entnahmeszenario, für das ein einzelner Hanford-Tanks bei 0m (links), 30m (Mitte) und 60m (rechts) Entfernung zum Detektor positioniert ist. . . . .	12
4.3	Auswahl der Tanks mit doppeltem Material, jeweils in Orange markiert. . . .	13
4.4	Hypothesentest für das Szenario, dass alle Tanks gleichmäßig 25 % mehr Material enthalten und der Detektor ist unbewegt über Tank-Position 8 und 20 positioniert. Die Messzeit beträgt 365 Tage. . . . .	14
4.5	Hypothesentest für das Szenario, die in Abb. 2.1) markierten Tanks haben doppelt so viel Material wie ursprünglich deklariert. Oben: Unbewegtes Detektorszenario mit einer Messzeit von 365 Tagen. Unten: Bewegtes Detektorszenario, bei jeder Position werden 40 Tage gemessen. . . . .	15
4.6	Hypothesentest für das Szenario, dass alle Tanks gleichmäßig 25 % mehr Material als deklariert enthalten. Der Detektor wird über die auf der y-Achse angegeben Tankpositionen, analog zu Abb. 2.1, für jeweils 40 Tage positioniert	16
4.7	Hypothesentest für Entnahme-Szenario bei dem der Detektor oberhalb von vier Hanford-Tanks platziert ist, die jeweils 30 m voneinander entfernt sind. Nur einer der Tanks hat weniger Material. . . . .	19
4.8	Hypothesentest für Entnahme-Szenario eines einzelnen Tanks, der Detektor ist 21,2 m von dem Tank entfernt. . . . .	20
4.9	Hypothesentest für das Versickerungs-Szenario. Anteile eines Tanks befinden sich auf einem Punkt mittig 10 m unterhalb des Tankbodens konzentriert. . .	21

## Literaturverzeichnis

- [1] M. S. Gerber. History of Hanford Site Defense Production (Brief). 02 2001.
- [2] Thomas Radermacher, Johannes Bosse, Sarah Friedrich, Malte Götttsche, Stefan Roth, and Georg Schwefer. Liquid-organic time projection chamber for detecting low energy antineutrinos, 2022.
- [3] Vedran Brdar, Patrick Huber, and Joachim Kopp. Antineutrino Monitoring of Spent Nuclear Fuel. *Phys. Rev. Applied*, 8:054050, Nov 2017.
- [4] Sarah Friedrich. Studium der Richtungsauflösung für die Neutrinodetektion mit einer TPC mit organischer Flüssigkeit, 2021.
- [5] *Poisson Distribution*, chapter 4, pages 156–207. John Wiley Sons, Ltd, 2005.
- [6] Michael Rinker, Siva Pilli, Naveen Karri, John Deibler, K.I. Johnson, James Holbery, O Mullen, and David Hurley. Structural Integrity of Single Shell Tanks at Hanford - 9491. 01 2009.
- [7] Consortium for Risk Evaluation with Stakeholder Participation CRESP. Hanford Site-Wide Risk Review Project - Final Report Appendix E, August 2018.
- [8] ROBERT ALVAREZ. Reducing the risks of high-level radioactive wastes at hanford. *Science & Global Security*, 13(1-2):43–86, 2005.
- [9] Helge Haveresch. Endlagerüberwachung mit Hilfe von Antineutrino-Messungen durch LOr-TPCs, 2021.
- [10] Alessandro Strumia and Francesco Vissani. Precise quasielastic neutrino/nucleon cross-section. *Physics Letters B*, 564(1-2):42–54, jul 2003.
- [11] Madalina Wittel and Malte Götttsche. Antineutrino Detection Techniques for Monitoring Long-Term Geological Repositories. *ESARDA : European Safeguards Research and Development Association*, 60:20–27, 2020.