

10 ENDE GELÄNDE: WARUM TRITIUMHALTIGE WÄSSER AUS FUKUSHIMA IN DEN PAZIFIK EINGELEITET WERDEN UND WAS ES FÜR DEN OZEAN UND DIE MENSCHEN BEDEUTET

M.-O. Aust¹, P. Nogueira¹, S. A. K. Schmied²

¹ Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Fischereiökologie

Leitstelle für Fisch und Fischereierzeugnisse, Krustentiere, Schalentiere, Meereswasserpflanzen (Leitstelle G)

² Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie,

Leitstelle für Meerwasser, Meeresschwebstoff und -sediment (Leitstelle D)

Seit der Reaktorkatastrophe im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi sind 13 Jahre vergangen. Bereits im Jahr 2013 wurde klar, dass kontaminiertes Wasser aus den Reaktoren den Pazifik erreichen könnte, wenn es nicht auf dem Gelände des KKW zwischenlagert wird. Da der Platz auf dem Gelände immer knapper wird, wurde nach einer langen Diskussion im August 2023 mit dem Einleiten des Wassers in den Pazifik begonnen. Nachfolgend soll erläutert werden, was das nach gegenwärtigem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse für die Meeresumwelt bedeutet.

Der Unfall

Am 11.03.2011 löste ein Erdbeben der Stärke 9,0 auf der Momenten-Magnituden-Skala vor der Küste Japans einen Tsunami aus. Beide Ereignisse setzten die Kühlsysteme in vier Reaktoren des Kernkraftwerkes Fukushima Daiichi außer Funktion. Sämtliche Versuche der Wiederherstellung eines Kühlsystems scheiterten, so dass es in den Reaktoren 1 bis 3 zu Kernschmelzen und im Abklingbecken über Reaktor 4 zu einer Überhitzung der Brennelemente kam. In deren Folge ereigneten sich mehrere Wasserstoffexplosionen. Durch die strukturellen Schäden an den Reaktoren fiel bzw. fällt kontaminiertes Wasser einerseits bei der Kühlung der zerstörten Reaktorkerne, andererseits durch einen unkontrollierten Grundwasserzutritt zu den Reaktorgebäuden an.

Durch technische Maßnahmen konnte der unkontrollierte Zustrom des Wassers aus der Umgebung zwar deutlich reduziert werden, allerdings ist weiterhin eine Absenkung des umliegenden Grundwasserspiegels notwendig, um das Entweichen radioaktiver Stoffe in die Umwelt zu verhindern. Das abgepumpte Grund- und Kühlwasser enthält verschiedene Radionuklide in unterschiedlichen Konzentrationen. Zur besseren Handhabung wird es mit einem fortschrittlichen System zur Entfernung von in Flüssigkeiten gelöster Radionuklide (Advanced Liquid Processing System, kurz: ALPS) behandelt. Die Entfernung des Tritiums ist jedoch nicht möglich, weil dieses

als Isotop des Wasserstoffs in die Wassermoleküle eingebaut ist. Deshalb werden etwa 1,32 Millionen Tonnen tritiumhaltiges Wasser (Stand Januar 2023) in Tanks auf dem Reaktorgelände gelagert.

Allerdings gibt es mittlerweile Konkurrenz um die Nutzung der Flächen auf dem Gelände: Es ist beispielsweise der Rückbau der havarierten Anlage notwendig, um die Gefahr einer weiteren Kontamination der Umwelt zu verringern. Dafür werden große Flächen benötigt, um das Personal auf dem Gelände effektiv vor ionisierender Strahlung zu schützen. Erschwerend kommt hinzu, dass die vorhandenen Tanks für kontaminiertes Wasser nicht dauerhaft ausgelegt sind und regelmäßig überprüft bzw. ausgetauscht werden müssen. Daher wurde bereits im Jahr 2017 begonnen, ein Konzept für den Umgang mit dem kontaminierten Wasser zu erarbeiten.

Was ist eigentlich Tritium?

Bei Tritium handelt es sich um ein in der Natur in Spuren vorkommendes Isotop des Wasserstoffs; in der Antarktis wurden in Niederschlags- und Meerwasser beispielsweise Konzentrationen zwischen 1000 Bq m^{-3} und 4000 Bq m^{-3} ermittelt [38]. Im Gegensatz zum „normalen“ Wasserstoff, dessen Atomkern nur ein Proton besitzt, besteht der Tritium-Kern aus einem Proton und zwei Neutronen – Tritium wird deshalb auch als „überschwerer“ Wasserstoff bezeichnet. In der Natur werden jährlich $72 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$ Tritium in der oberen Atmosphäre neu gebildet. Das zugehörige globale „Gleichgewichts“-Inventar wird mit $1275 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$ bis $2200 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$ angegeben; dies entspricht Massen zwischen 3,6 kg und 6,2 kg Tritium ([38]; [39]). Etwa 99 % davon liegen in Wasser gebunden vor.

Das ist aber nur ein Aspekt: Tritium entsteht auch als Nebenprodukt der Kernspaltung in Siedewasserreaktoren, wie sie im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi verbaut wurden. Die Ableitung des entstehenden Tritiums mit dem Abwasser oder der Abluft einer kerntechnischen Anlage wird in

festgelegtem Umfang durch die jeweiligen Aufsichtsbehörden genehmigt. So werden allein die Ableitungen aller Wiederaufbereitungsanlagen bis zum Jahr 2010 auf $410 \cdot 10^{15}$ Bq geschätzt, von denen im Jahr 2010 noch $45 \cdot 10^{15}$ Bq in der Umwelt vorhanden waren [39].

Tritium – egal ob aus natürlichen oder anthropogenen Quellen – ist ein radioaktiver Stoff, der Beta-Strahlung (Elektronen) niedriger Energie aussendet. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren zu stabilem, also nicht radioaktivem, Helium-3. Der Dosiskoeffizient von Tritium ist mit $1,8 \cdot 10^{-11}$ Sv Bq⁻¹ etwa tausendfach niedriger als der der Cäsium-Isotope 134 und 137, die während der Reaktorkatastrophe in Fukushima ebenfalls freigesetzt wurden und ins Meer gelangten. Aufgrund dieses sehr niedrigen Dosiskoeffizienten darf es in engen Grenzen auch in sogenannten Consumer-Produkten (z. B. Leuchtziffern von Uhren, leuchtende Angelköder) eingesetzt werden. Der Dosiskoeffizient wird in Sv Bq⁻¹ (Sievert pro Becquerel) angegeben und ist ein Maß für die Wirkung eines radioaktiven Isotops auf den Körper einer Person, die den Stoff aufnimmt.

Wohin mit dem kontaminierten Wasser?

Für den langfristigen Umgang mit dem kontaminierten Wasser wurden fünf Vorgehensweisen vorgeschlagen und diskutiert: Verpressung im Untergrund, kontrollierte Freisetzung ins Meer, kontrolliertes Verdampfen, Wasserstofffreisetzung sowie Verfestigung mit untertägiger Endlagerung. Nach intensiver Abwägung der möglichen Risiken, der technischen Umsetzbarkeit und der zeitlichen Integration in die Rückbaumaßnahmen der Reaktoren fiel die Entscheidung für eine Einleitung ins Meer. Risiken für die Meeresumwelt werden als gering erachtet, da

- 1) die Abwässer, in denen die Radionuklidkonzentration die amtlichen Grenzwerte überschreiten, mittels ALPS-System gereinigt werden, so dass die Grenzwerte mit Ausnahme von Tritium anschließend unterschritten werden,
- 2) die Tritium-Konzentration im abgeleiteten Wasser durch Verdünnung auf 1500 Bq L⁻¹ reduziert wird,
- 3) das jährlich abgegebene Tritium-Inventar auf $22 \cdot 10^{12}$ Bq (entspricht einer Masse von 60 mg) begrenzt wird. Das entspricht der Menge an Ableitungen, die TEPCO vor dem Unfall für den Betrieb des Kernkraftwerks Fukushima genehmigt wurde.

Die Internationale Atomenergiebehörde hat den Bericht des ALPS-Komitees (SHALPS[40]) begutachtet und schließt sich dieser Meinung an, liefert aber auch zusätzliche Begründungen und Klarstellungen, die die Einleitung des kontaminierten Wassers ins Meer ([41], [42]) rechtfertigen. Insbesondere soll eine Kommunikationsstrategie erarbeitet und der Austausch mit Betroffenen und Verbänden intensiviert werden.

Wie verhält sich Tritium in Organismen?

Tritium wird in organisches Material eingebaut, weil es sich wie normaler Wasserstoff verhält. Im menschlichen Körper – und wahrscheinlich auch im Tier – wird Tritium schnell wieder ausgeschieden (Halbwertszeit ca. 10 Tage). Daher wird in der Fachliteratur eine Gesundheitsgefährdung durch Tritium für Mensch und Tier als gering eingeschätzt ([38], [39]). Allerdings ist es noch nicht wissenschaftlich gesichert, ob die Gefahr durch Fehler in der Erbsubstanz, die nach Einbau von Tritium in die DNS entstehen können, bislang unterschätzt wurde ([43], [44]).

Tritium wird nach Angaben der Internationalen Atomenergie-Organisation [35] nicht in Fisch angereichert, d. h. die Konzentrationen in Fisch und Wasser sind identisch. Im Gegensatz dazu wird Cäsium in Fisch hundertfach gegenüber der Konzentration im Wasser angereichert. Während Tritium in Fisch relativ schwer nachweisbar und auch kaum vom natürlichen Hintergrund zu unterscheiden ist, lässt sich die Konzentration von Tritium im Wasser vergleichsweise leicht ermitteln. Anders als bei Fisch kann beim Nachweisverfahren in Wasser eine nahezu beliebig große Wassermenge nach einer Anreicherung auf dessen Tritium-Aktivitätskonzentration analysiert werden. Durch die Anreicherung erhöht sich die Tritium-Aktivitätskonzentration im Messpräparat so, dass das Messgerät auch einen gültigen Messwert erzeugt bzw. der in der Probe enthaltene natürliche Hintergrund „ausgeblendet“ werden kann.

Im Zuge der Havarie im Kernkraftwerk Fukushima wurden etwa $1,6 \cdot 10^{15}$ Bq Tritium über einen kurzen Zeitraum in den Pazifik eingeleitet. Diese waren im Juni 2011 im Wasser in 40 km Entfernung zum Kernkraftwerk gut nachweisbar, obwohl die eingeleiteten Mengen deutlich geringer waren als beispielsweise die des globalen Kernwaffenfalls oder den Einleitungen von Wiederaufbereitungsanlagen für Kernbrennstoffe ([39]). Auf Basis der Modellierungen der Cäsium-Freisetzungen aus dem Kernkraftwerk Fukushima (z. B. [45]) wird erwartet, dass sich das jetzt eingeleitete Tritium aufgrund der geringen Konzentration und

der starken Strömungen im Pazifik höchstens in direkter Umgebung der Einleitstelle nachweisen lässt.

Begleitende Überwachungsmaßnahmen

Bereits im Zeitraum 1973 bis 2021 wurden über 10.000 Messungen der Aktivitätskonzentration von Meerwasser im Pazifik durchgeführt und in der MARIS-Datenbank der Internationalen Atomenergiebehörde abgelegt ([46]; Abbildung 10.1). Die Auswertung zeigt, dass es durch den Eintrag kontaminierten Abwassers aus dem havarierten Kernkraftwerk Fukushima Daiichi in den Jahren 2011 bis 2013 zwar erhöhte Maximalwerte im Bereich der Anlage selbst ergab, die Median-Werte aber mit dem Zeitraum vor dem Reaktorunfall vergleichbar waren (Tabelle 10.1). Für die aktuelle Bewertung liegt damit eine große Menge an frei zugänglichen Vergleichswerten vor. Um den Effekt der Einleitungen auf die Meeresumwelt zu untersuchen, soll die Überwachung in den betroffenen Gebieten ausgebaut werden. Die Betreiberfirma TEPCO ist dabei für Untersuchungen auf dem Gelände der Anlage zuständig, die staatliche Regulierungsbehörde NRA (National Regulation Authority) übernimmt die Bereiche Meerwasser

und Meeressediment und die japanische „Fisheries Agency“ die marinen Organismen.

TEPCO stellt alle Experimente und Messwerte zur Verfügung, die im Vorfeld bzw. während der Tritium-Freisetzung erhalten werden, unter:

<https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/index-e.html>.

Die Ergebnisse des Monitorings der NRA und der „Fisheries Agency“ werden – nach Themenbereichen sortiert – unter folgenden Internetseiten veröffentlicht:

<https://radioactivity.nra.go.jp/en/> und <https://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html>.

Um die Wirkung der Ableitungen auf die Meeresumwelt zu erfassen und mit den Prognosen abgleichen zu können, ist vorgesehen, in einer ersten Phase nur vergleichsweise kleine Abwassermengen in den Pazifik abzugeben. Erst wenn bestätigt werden kann, dass keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Meeresumwelt eintreten, wird die Ableitung der tritiumhaltigen Wässer fortgesetzt. Dabei muss sichergestellt werden, dass alle Radionuklide im eingeleiteten Wasser möglichst vollständig erfasst werden [47].

Tabelle 10.1

Ergebnisse von Tritium-Messungen im Meerwasser des Pazifiks an den Probenahmestellen aus Abbildung 1; die Zusammenstellung wurde IAEA (2024) [46] entnommen; N= Anzahl von Messungen; nn= Anzahl Messungen unter der Nachweisgrenze

Zeitraum	Probenanzahl		Aktivitätskonzentration (Bq m ⁻³)		
	N	nn	Min	Max	Median
1973 - 2007	5951	0	0,118	1704	89,7
2011 - 2021	5068	2427	0,118	68000	80,0

Fazit

Tritium ist ein Radionuklid, das in großen Mengen natürlich gebildet wird und dessen wesentlicher Anteil im Wasser gebunden vorliegt. Die jetzigen Ableitungen aus den Tanks des havarierten Kernkraftwerks Fukushima werden die Ableitungen, die für den Betrieb des intakten Kernkraft Fukushima genehmigt wurden, unterschreiten. Damit sind sie im Vergleich zur Menge natürlich vorkommenden Tritiums gering. Tritium wird, sofern es

von Meeresorganismen aufgenommen wird, schnell ausgeschieden; eine Anreicherung findet nicht statt.

Unter den oben genannten Randbedingungen ist es unwahrscheinlich, dass die Tritium-Einleitungen Auswirkungen auf Meeresorganismen haben werden. Ein Risiko für den Verbraucher wird aus Sicht des Strahlenschutzes ebenfalls als gering eingeschätzt.

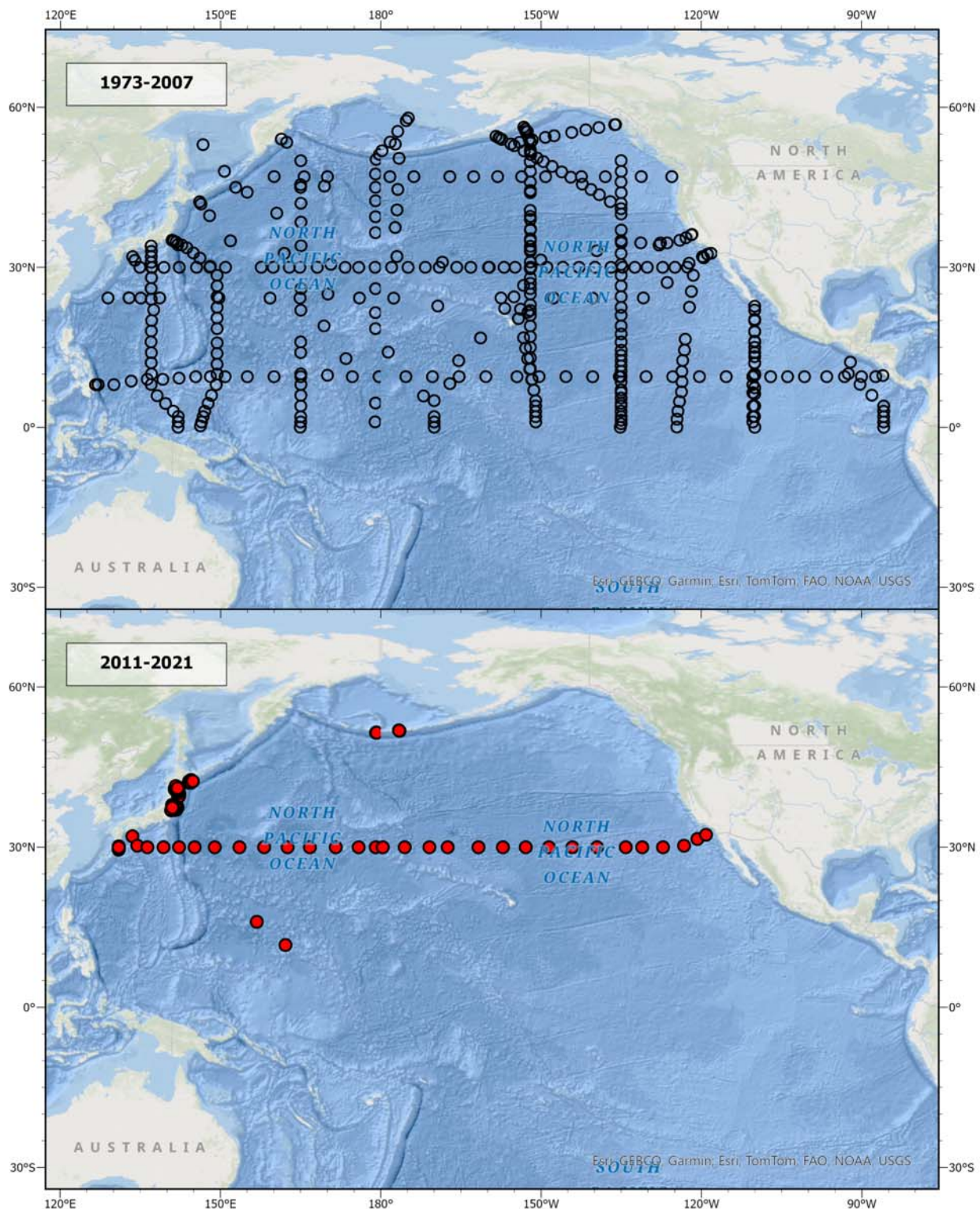


Abbildung 10.1
Probennahmepunkte von Tritium-Messungen im Meerwasser; die Zusammenstellung wurde IAEA (2024) [46] entnommen.