

## Kurzfassung „Radiation Reloaded“

Dieser Report beruht auf umfangreichen wissenschaftlichen Forschungen der letzten fünf Jahre in den Fukushima-geschädigten Gebieten, die Licht in die aktuelle ökologische Situation nach dem Atomunfall vom Fukushima-Daiichi im März 2011 bringen sollen. Es ist ein Versuch, alle Informationen zu dokumentieren, die aktuell über die radioaktive Verseuchung der Wälder, Flüsse, Auen und Flussmündungen in der Präfektur Fukushima vorliegen. Angesichts der langen Halbwertszeiten einiger Radionuklide, die in der Präfektur Fukushima und großen Flächen Japans freigesetzt wurden, ist es grundlegend wichtig, die ökologischen Auswirkungen zu verstehen.

Zudem stützt sich der Report auf Studien der Wälder und aquatischen Ökosysteme, die bei den Nuklearkatastrophen von Kyschtym und Tschernobyl schwer verseucht wurden, um Erkenntnisse darüber zu liefern, was in den kommenden Jahren und Jahrzehnten in Japan zu erwarten ist.

### *Kontaminierung des Waldökosystems*

Zwar sind die Strahlenwerte seit der Katastrophe gesunken, doch man geht davon aus, dass sie im Laufe der fünf Jahre in den meisten Fällen einen gewissen Boden erreicht haben. Danach pendeln sich sowohl Wälder als auch aquatische Ökosysteme in einem relativ „stabilen“ Zustand dauerhafter Kontaminierung ein. Eine weitere graduelle Verringerung der Strahlung beruht im Wesentlichen auf dem Zerfall langlebiger Radionuklide.

Zu beachten ist indes, dass die Kyschtym- und Tschernobyl-Studien Beweise dafür liefern, dass die Konzentration radioaktiven Cäsiums in den oberirdischen Pflanzenstrukturen der verseuchten Waldsysteme innerhalb von fünf Jahren allmählich ansteigen können. Die Aufnahme über das Wurzelsystem übersteigt dabei die Rückgabe an den Boden durch Streu und Auswaschen, bis sich eine Art Gleichgewicht einstellt.

Der aktuelle Ansatz der japanischen Behörden bei der die Kontaminierung der Wälder beinhaltet die Beseitigung abgefallenen Laubs, von Erde sowie Unterholzpflanzen in 20 Meter breiten Streifen entlang der Straßen sowie rund um Wohnhäuser, die von Wald umgeben sind. In Bezug auf die großflächige Dekontaminierung Fukushimas ist dieser Ansatz nutzlos. Über 70 Prozent der Präfektur Fukushima besteht aus Wäldern, die nicht dekontaminiert werden können.

Drei der besorgniserregendsten Radionuklide, die durch die Fukushima-Katastrophe freigesetzt wurden, sind Cäsium 134 ( $^{134}\text{Cs}$ ), Cäsium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) und in kleinen Mengen Strontium 90 ( $^{90}\text{Sr}$ ) – sie verhalten sich in der Umwelt ähnlich wie die Grundelemente von Kalium und Kalzium. Es wurden sowohl Cäsium-haltige Partikel als auch verdampftes, wasserlösliches radioaktives Cäsium freigesetzt. Wasserlösliches Cäsium, das als nasse Disposition mit Niederschlägen und Nebel herabkommt, wird ohne weiteres über die Borke und Blätter ins innere Gewebe der Bäume aufgenommen. Radioaktive Partikel scheinen unter natürlichen Bedingungen Cäsium auszuwittern und freizusetzen. Überdies können radioaktives Cäsium und  $^{90}\text{Sr}$  über die Wurzelsysteme aufgenommen werden.

Sobald  $^{134}\text{Cs}$  und  $^{137}\text{Cs}$  ins innere Gewebe der Bäume aufgenommen worden sind, werden sie mit den Nährstoffflüssen weitertransportiert und konzentrieren sich in schnell wachsenden Geweben wie neuen Blattstrukturen, Blüten und Pollen. Die Pollen der Japanischen Zedern in den Wäldern Fukushimas scheinen hohe Konzentrationen radioaktiven Cäsiums aufzuweisen, obgleich die berechneten Dosen zeigen, dass die potentiellen Belastungen nach dem aktuellen Kenntnisstand relativ gering wären. Man weiß jedoch wenig über die Konzentrationen der am stärksten kontaminierten Wälder und die potentiellen Risiken durch die Exposition der Menschen in diesen Gebieten. Hohe Konzentrationen radioaktiven Cäsiums in Pollen wurden auch in den kontaminierten Wäldern der Sperrzone von

Tschernobyl, in München sowie in blühenden krautigen Arten Kroatiens gefunden – bei letzteren wurde das radioaktive Cäsium nicht nur in Pollen, sondern auch im Honig der Bienen nachgewiesen, die ihren Nektar aus den radioaktiven Blüten beziehen.

Außerhalb der Sperrzonen ist die Holzproduktion in der Präfektur Fukushima nach wie vor erlaubt. Man geht davon aus, dass mit den äußersten Schichten ein Großteil des radioaktiven Cäsiums entfernt wird. Dies scheint zurzeit der Fall zu sein. Doch Cäsium wird nicht nur vertikal (von den Wurzeln in die Baumkrone und umgekehrt), sondern auch horizontal übertragen, sodass auch Jahresringe kontaminiert werden, die lange vor der Freisetzung des radioaktiven Cäsiums entstanden sind. Tests mit Fukushima-verseuchten roten Pinien, Eichen und Japanischen Zedern belegen die Kontaminierung der Rinde sowie des Splint- und Kernholzes und deuten auf eine schnelle vertikale interne Verbreitung hin – wobei die höchsten Konzentrationen in der Rinde und im Splintholz gefunden wurden.

Wie das Cäsium ins Kernholz gelangt, ist noch nicht hinlänglich erschlossen, Forscher vermuten jedoch, dass Feuchtigkeit und Kaliumkonzentrationen die Ursache hierfür sein könnten. Mit anderen Worten: Erhöhte Feuchtigkeit kann zu höheren Kaliumkonzentrationen führen. Da Cäsium Kalium im Stoffkreislauf von Bäumen ersetzen kann, könnte das Gleiche auch für Cäsium gelten. Ein besonders besorgniserregendes Merkmal der Japanischen Zeder, der kommerziell wichtigsten Baumart Japans, besteht darin, dass sie – anders als rote Pinien und Eichen – Feuchtigkeit und Kalium in ihrem Kernholz konzentriert. Tatsächlich belegen Studien der durch überirdische Atombombentests hervorgerufenen Cäsiumkonzentrationen in der Japanischen Zeder, dass diese Baumart die höchste Cäsiumkonzentration im Kernholz aufweist. Cäsium wird weiterhin über die Wurzeln aufgenommen, und radioaktives Cäsium verschiebt sich weiterhin intern, folglich dürfte die Ernte dieser Baumart aus verseuchten Wäldern künftig stark belastet sein. Die Tatsache, dass es sich um die wichtigste Baumart handelt, verdeutlicht, wie wichtig die konsequente Überwachung von Holzprodukten aus der Präfektur in den kommenden Jahren und Jahrzehnten sein wird.

Japanische Tannen weisen bereits Mutationen, sprich: „morphologische Schäden“ durch die Strahlenbelastung von Fukushima auf. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Strahlenwerten und dem Auftreten von Wachstumsanomalien, bei denen der „Leittrieb“ fehlt. Gemeint ist der Neuaustrieb, der das gerade, vertikale Wachstum des Baums ermöglicht und später zum Baumstamm wird. Zwar muss man einräumen, dass auch andere Faktoren diese Anomalie auslösen können, Forscher belegten jedoch anhand von früheren Jahrestrieben, dass die Fälle von fehlenden Haupttrieben nach der Fukushima-Katastrophe zunahm. Auch an den vier Teststandorten kam es mit steigender Strahlung häufiger zu solchen Anomalien.

Das vertikale Eindringen von Cäsium in den Boden ist ein besonders kritischer Faktor, sowohl für die Bioverfügbarkeit als auch für die Risiken externer Exposition. Studien in den Wäldern von Fukushima zeigen, dass ein Großteil des Cäsiums in den oberen 0 bis 5 Zentimetern des Bodens bleibt, wo er besonders verfügbar für Pflanzen ist und ein besonders hohes Gefährdungspotenzial hat. Auch pilzartige Symbiosen mit Pflanzenwurzeln können die Aufnahme radioaktiven Cäsiums begünstigen, dies könnte auch die Freisetzung und den Transfer mineralisch gebundenen Cäsiums beinhalten. Aufgrund der Aufnahme in die Phytomasse wird es wohl in den kommenden Jahren und Jahrzehnten – ähnlich wie bei den verseuchten Wäldern von Tschernobyl und Kyschtym – in den Oberflächenschichten verbleiben.

Ganz offenbar hat die Strahlenkontamination auch negative Auswirkungen auf die natürlichen Zersetzer. Das führt zu einer signifikanten Anreicherung an Streu. In Tschernobyl schreibt man die steigende Häufigkeit und Intensität der Waldbrände dem strahlungsbedingten Streuaufbau zu. Die Brände – insbesondere Baumkronenfeuer – können dazu führen, dass radioaktive, derzeit im Pflanzenmaterial gebundene Elemente

wieder aufgewirbelt werden und in die Thermosphäre gelangen – in Feinstaubpartikeln, die klein genug sind, um eingeatmet zu werden, und zugleich über weite Entfernungen transportiert werden können.

Fukushima hat mehr Niederschläge als Tschernobyl, sodass das Brandrisiko wahrscheinlich niedriger ist, dennoch bringen Brandgefahren auch das Risiko der Aufwirbelung von Radionukliden mit sich. Laut einer Brandgefahrenanalyse besteht ein extrem hohes Risiko für die Nadelwälder in den Gebirgsausläufern der Präfektur – obgleich die räumliche Verteilung je nach den jeweiligen Bedingungen stark variieren kann. Die Website der Präfektur gibt an, dass Brände am wahrscheinlichsten während der Trockenzeit von März bis Mai auftreten. Die Internetseite verzeichnet zudem 43 aufeinanderfolgende Waldbrände für das Jahr 2014.

### *Auswirkungen auf die Tierwelt*

Auch wild lebende Tiere können kontaminiert werden, indem sie verseuchte Pflanzen oder verseuchte Pflanzenfresser zu sich nehmen – so gelangt das Cäsium in die Nahrungskette. Über ihre Exkremente tragen die Tiere zur Verteilung des radioaktiven Cäsiums bei.

Die IAEO hat erklärt, dass die Strahlung durch den Fukushima-Unfall höchstwahrscheinlich keine Auswirkungen auf die Tierwelt haben wird – gleichzeitig räumte sie ein, dass sich dies nicht auf Ökosysteme oder Populationen bezöge, man habe sich nur im engeren Sinne auf einzelne Tiere konzentriert. Überdies erklärte die Organisation, dass ihre Methodik auf den Vorschlägen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) basierte, deren Modelle sich weitgehend auf Studien mit einzelnen Tieren in Labors oder kontrollierten Umgebungen stützten.

In den letzten Jahren aber fand das Institut für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit (IRSN) der französischen Regierung in Studien über wild lebende Tiere der Sperrzone von Tschernobyl heraus, dass Tiere unter diesen natürlichen Bedingungen deutlich empfindlicher auf eine chronische Belastung mit niedrigen Dosen künstlicher Strahlen reagieren als bei Experimenten im Labor oder in kontrollierter Umgebung. Das Institut ging davon aus, dass dies auf eine Reihe von Faktoren zurückzuführen wäre, einschließlich, aber nicht begrenzt auf erhöhte Stressoren und höhere Expositionszeiten. Tatsächlich fand das IRSN heraus, dass wild lebende Tiere in kontaminierten natürlichen Ökosystemen bis zu **achtmal** empfindlicher reagierten.

Die Auswirkungen wären weitreichend. Es würde bedeuten, dass die traditionellen Methoden der Risikoeinschätzung für Wildtiere veraltet wären und auf äußerst fehlerhaften Annahmen basierten.

Tatsächlich wurden schon in mehreren Studien Auswirkungen auf wild lebende Tiere festgestellt, darunter Mutationen bei den Bläulingen, einer Schmetterlingsart, und den gallenerzeugende Blattläusen sowie DNA-Schädigungen bei Regenwürmern, die in Gebieten mit hoher Strahlendosis gesammelt wurden.

Darüber hinaus ergab eine vierjährige, zwischen 2011 und 2014 durchgeführte Studie an 57 Vogelarten der 50-Kilometer-Zone um den Reaktor Fukushima-Daiichi, dass sich das Artenreichtum mit zunehmender Strahlung verringerte. Zudem waren 90 Prozent der untersuchten Vögel Dosen ausgesetzt, die möglicherweise die Fruchtbarkeit beeinträchtigen.

Eine weitere Studie, die Rauchschwalben-Nestlinge untersuchte, ergab einen Rückgang der Jungtiere, was auf eine verringerte Fruchtbarkeit hindeutet – dies deckt sich mit den Ergebnissen der oben genannten Studie. Überdies ergaben Studien der Tschernobyl-geschädigten Gebiete verringerte Hirngröße bei Vögeln, vermehrte Kataraktbildung sowie eine größere Häufigkeit von Albinismus und Tumoren bei höheren Strahlungsdosen.

### *Radiologische Auswirkungen auf Gewässer*

Es ist allgemein bekannt, dass Laubbäume einen Großteil des atmosphärischen Fall-outs auffangen und dass die Waldökosysteme als riesige Radioaktivitätsspeicher fungieren. In der ersten Phase nach der Kontaminierung wird ein Teil des radioaktiven Fall-outs schnell durch Niederschläge in die Wassereinzugsgebiete gespült. Der Rest wird im Laubreservoir gespeichert, um sich dann allmählich und über einen langen Zeitraum zu verteilen.

Selbst bei geringen Durchflüssen aus den Wäldern in die Wassersysteme kann die Weiterverteilung des Cäsiums über die Wassereinzugsgebiete aufgrund des riesigen Umfangs kontaminierter Wälder und Böden signifikant sein. Fukushima und die umliegenden Präfekturen verfügen über eine Reihe größerer und kleinerer Flusssysteme, die aus den kontaminierten Hochlandwäldern in den Pazifik fließen. Diese Flusssysteme haben Einzugsgebiete von tausenden von Quadratkilometern.

Laut Prognosen über die Freisetzung radioaktiven Cäsiums zwischen 2011 und 2111 könnten die großen Flüsse, deren Einzugsgebiete sich primär in der Präfektur Fukushima befinden (die Flüsse Abukuma, Arakawa, Naka, Agano und Tadami), soviel Cäsium in den Pazifik abgeben, wie aus der Anlage Fukushima-Daiichi selbst austritt. Den Prognosen zufolge wird der Abukuma in den hundert Jahren nach der Katastrophe allein 111 TBq an <sup>137</sup>Cs und 44 TBq an <sup>134</sup>Cs abgeben, selbst, wenn die „Dekontaminierung“ so weiterläuft wie bisher.

Der Transport radioaktiven Cäsiums vom Land in die Süßwasser- und Meeresökosysteme ist von besonderer Bedeutung angesichts der potentiellen Verschiebung aus abiotischen Systemen (nichtlebendes Pflanzenmaterial, Mineralien etc.) in biotische Systeme (Wasser- und Meerespflanzen und -tiere – einschließlich der potentiellen Verseuchung von Arten, die von Menschen verzehrt werden).

### *Kontamination flussabwärts*

Die Topografie der Präfektur Fukushima ist geprägt durch steile Hänge, sanfte Gebirgsausläufer und flache Überschwemmungsgebiete im Küstenbereich. Wie bereits erwähnt, sind die höheren Regionen von dichten, ausgewachsenen Wäldern und Baumpflanzungen überzogen – mit eingestreuten Reisfeldern, Wohnhäusern und anderen landwirtschaftlichen Flächen. Das Klima wirkt dank der Taifune im Herbst und der Schneeschmelze im Frühling extrem erosiv. Während dieser signifikanten Niederschlagsereignisse können sich die Ablagerungen radioaktiven Cäsiums in den Wäldern, Berghängen und Auen lösen und flussabwärts gelegene Gebiete verseuchen – auch Regionen, die nicht vom Fall-out aus den radioaktiven Schadstoffwolken belastet waren oder die bereits dekontaminiert wurden.

Die Folgen der radioaktiven Kontamination für die Küsten- und Meeresökosysteme sind signifikant und werden es auch künftig sein, doch die Süßwasserökosysteme sind offensichtlich noch gefährdeter. Die Anreicherung radioaktiven Cäsiums in Fukushima-verseuchtem Süßwasserfisch ist etwa hundertmal so hoch wie die Konzentrationen in Seefischen.

Wie bei den Waldökosystemen, wird die Dauer, für die das radioaktive Cäsium in den Wassersystemen verbleibt, stark durch abiotische und biotische Prozesse beeinflusst. Die Fluktuation der Seen, die langsame, kontinuierliche Auswaschung aus den kontaminierten Wassereinzugsgebieten sowie Taifune und andere Prozesse können kontaminierte Sedimente und organische Substanzen aufwirbeln. Das heißt, das Cäsium wird nicht einfach unter den neuen Sedimentschichten begraben, sondern vermischt sich durch diese Prozesse auf mechanische Weise neu und erzeugt so eine Sekundärkontamination. Die

aufgewirbelten kontaminierten Partikel und organischen Substanzen, die durch die starken Regenfälle und Taifune aus den Wäldern und Feldern herabgespült werden, sorgen zudem dafür, dass die Seen und Küstenökosysteme in den kommenden Jahren und Jahrzehnten kontinuierlich mit radioaktivem Cäsium verseucht werden.

Bis zu fünf Jahre nach der Strahlenverseuchung durchlaufen die aquatischen Ökosysteme, ähnlich wie die Waldökosysteme, eine anfängliche Phase des Flusses. Danach hat der Rückgang der Konzentrationen meist einen gewissen Boden erreicht und bleibt relativ stabil – mit graduellen Verringerungen, die überwiegend auf den langsamen Zerfall der Radionuklide und die weitere Festsetzung des Cäsiums zurückzuführen sind. So ist fünf Jahre nach der Katastrophe damit zu rechnen, dass sich die anfänglichen Abnahmetendenzen nivellieren – und dass die Folgen für die aquatischen Ökosysteme, insbesondere in den stark verseuchten Regionen, während der kommenden Jahre und Jahrzehnte anhalten werden.

Hier sei anzumerken, dass die Dämme und Stauseen in den Fukushima-geschädigten Wassereinzugsgebieten Studien zufolge sowohl Senken als auch Quellen für radioaktives Cäsium sind. In einer Studie der küstennahen Einzugsgebiete der Flüsse Niida und Mano kam dem Mano eine wichtige Funktion bei der Verringerung von Sedimenten in den unteren Flussbereichen, die aus den Oberlaufgebieten stammten, zu. 47 Prozent der aus dem Niida entnommenen Küstensedimente konnten den Oberlaufgebieten zugeordnet werden, während es beim Mano 19 Prozent waren.

Um angesichts des Monsunklimas einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, müssen die Dämme jedoch von Zeit zu Zeit geöffnet werden. Obgleich den Dämmen und Reservoirs eine gewisse Bedeutung bei der Verlangsamung des Cäsiumtransports aus den stark kontaminierten bewaldeten Bergregionen zukommt, sie vorübergehend sogar als Auffangbecken der Radioaktivität fungieren, sollte man dies keinesfalls als Lösung betrachten. Während starker Regenfälle können sich die radioaktiven Konzentrationen hierdurch nämlich sogar erhöhen.

### *Flussmündungen*

Flussmündungen werden aufgrund ihrer hohen Produktivität und Biodiversität häufig als die „Kinderstuben der See“ bezeichnet. Dank der hohen Nährstoffeinträge aus Flüssen und ihrer geschützten Lage abseits der starken Küstenströmungen nutzen viele Fische, Schalen- und Meerestiere die Flussmündungen zur Futtersuche und als Brutgebiete. Tatsächlich verbringen die meisten kommerziell relevanten Fischarten einen gewissen Teil ihres Lebenszyklus in einer Flussmündung. Zudem nutzen Zugvögel Flussmündungen häufig als Rastplatz für ihren Durchzug, und viele Vogelarten sind bei der Futtersuche und für ihre Nistplätze auf diese einzigartigen und wichtigen Ökosysteme angewiesen.

Dieselben Systeme, die den vielfältigen Lebensformen dieser Ökosysteme reichhaltige Nährstoffe liefern, machen sie zugleich anfällig für Kontamination – die durch die Flusseinzugsgebiete transportiert wird, die sie ernähren. Radioaktive Kontamination ist hier keine Ausnahme.

Es ist sehr wichtig, zu verstehen, dass sich nur ein Teil der aufgewirbelten Cäsium-haltigen Partikel in den Sedimenten ablagert, sobald es eine Flussmündung erreicht. Obwohl Cäsium in den meisten Fällen eine nahezu irreversible Verbindung mit Lehmteilchen eingeht, ist die Desorption des Cäsiums aus aufgewirbelten Partikeln bei zunehmendem Salzgehalt ein gut dokumentiertes Phänomen. Radioaktives Cäsium, das an feine Partikel gebunden ist, ist biologisch nicht mehr verfügbar. Die feinen Partikel, an die sich das Cäsium vorzugsweise bindet, werden bei schweren Regenfällen am ehesten erodiert und gelangen am leichtesten von den Quellgebieten in kontaminierten Becken in den Pazifik. Aufgrund der Desorption wird ein Teil des Cäsiums genau in dem Moment biologisch verfügbar, in dem es in eines der

wichtigsten Ökosysteme für die Küsten-, Wander-, und Meerestiere gelangt. So wird es in das marine Nahrungsnetz aufgenommen.

Das hat nicht nur potentielle Folgen für die Gesundheit der Tiere, die auf Flussmündungen als Futter- und Brutgebiet angewiesen sind, es wirkt sich auch auf die Menschen aus, die die Fische oder anderen Meeresfrüchte konsumieren, welche sich einen Teil ihres Lebens dort aufhielten.