

# 11 TRÜBE AUSSICHTEN FÜR FISCH? MODELLIERUNG DER STRAHLUNGSEFFEKTE AUF FISCHAUGEN MITTELS MONTE-CARLO-SIMULATION

**P. Nogueira, M.-O. Aust**

Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Fischereiökologie

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

## Einführung

Für das Überleben der meisten Wildtierarten spielt ein gutes Sehvermögen die zentrale Rolle. Daher ist zu erwarten, dass mit dem Auftreten von Augenkrankheiten wie Grauer Star, bei denen das Sehvermögen abnimmt, auch die Fähigkeit Nahrung zu finden verloren geht [47].

Der strahleninduzierte Graue Star beim Menschen ist seit langem als eine wichtige Augenerkrankung dokumentiert [46]. Die Augenlinse gilt als eines der strahlenempfindlichsten menschlichen Gewebe. Mehrere epidemiologische Studien deuten darauf hin, dass die Schwelle für die Kataraktinduktion sehr niedrig sein kann oder es überhaupt keine Schwelle gibt [26,43]. Diese neuen Erkenntnisse motivierten die jüngsten Entwicklungen zu neuen Augenlinsenmodellen und Dosimeter für das menschliche Auge [27,49,43].

Erst in den vergangenen zehn Jahren wurden Studien zur Analyse des Zusammenhangs zwischen strahleninduziertem Grauen Star und der Belastung durch ionisierende Strahlung bei Wildtieren durchgeführt. Mousseau und Møller [41] untersuchten das Auftreten von Katarakten bei Vögeln aus der Sperrzone von Tschernobyl und fanden nicht nur eine erhöhte Häufigkeit von Katarakten, sondern auch einen starken Zusammenhang zwischen Organismenanzahl, Hintergrundstrahlung und Auftreten von Katarakten. Die Ergebnisse deuten auch darauf hin, dass ionisierende Strahlung durch die Erhöhung der Häufigkeit von Katarakten und anderen Strahlenexpositionseffekten die Organismenanzahl in den Regionen mit höheren Hintergrundstrahlungswerten verringert. In ähnlicher Weise fanden Lehmann et al. [40] auch ein erhöhtes Auftreten von Katarakten in den Augen von Rötelmäusen (*Myodes glareolus*), die von der ansässigen Bevölkerung in der Tschernobyl-Sperrzone gesammelt wurden.

Die Beta-Strahlung ist für die Augenlinse die gefährlichste Art ionisierender Strahlung, da sie in Luft eine Reichweite bis zu mehreren Metern aufweist und auf Grund ihrer lokalen Energiedeposition hohe lokale Dosen erzeugt. In der Luft wird sie leicht abgeschwächt, so dass ein Beta-Teilchen

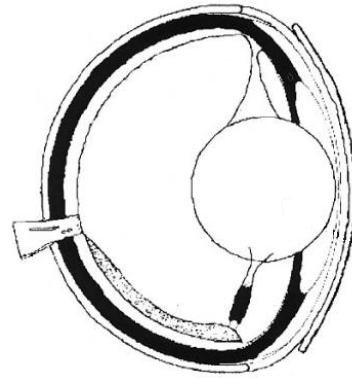
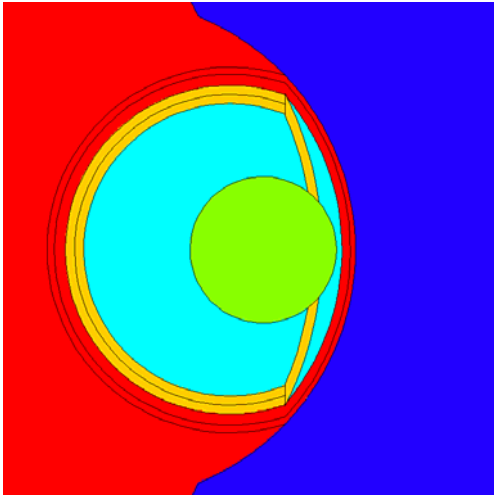
des  $^{90}\text{Sr}$  mit seiner Energie von 0,546 MeV eine typische Reichweite von 180 cm hat. Im Wasser würde die typische Reichweite desselben Beta-Teilchens aber auf Grund des großen Wirkungsquerschnitts des Mediums auf 0,195 cm verringert.

Bereits im Jahr 1990 wurde in der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) die Annahme aus ICRP 26 [34] revidiert, dass durch einen ausreichenden Schutz des Menschen auch alle anderen Lebewesen geschützt sind. Dieses führte zur Einführung eines eigenen Strahlenschutzsystems für die Umwelt, um Arten individuell schützen zu können (ICRP 108, 2008b [36]). Zu diesem Zweck wurden Referenztiere und -pflanzen (RAPs) definiert. Diese waren Hirsch, Ratte, Ente, Biene, Regenwurm, Kiefer und Gras für die terrestrische sowie Forelle, Plattfisch, Krebs, Frosch und Seegras für die aquatische Umwelt. Alle Modelle wurden zur Berechnung der absorbierten Dosis und der entsprechenden Dosis-Konversionskoeffizienten für 75 Radionuklide verwendet. In den 1970er Jahren wurden aus einfachen ellipsoidischen Körpern die ersten anthropomorphen Modelle entwickelt. In ähnlicher Weise wurden auch die RAPS-Modelle mit diesen einfachen Formen entwickelt. Dieser vereinfachende Ansatz ist hinsichtlich der Einsparung von Rechenzeit und Arbeitszeit sehr effektiv, verringert jedoch die anatomische Genauigkeit der dosimetrischen Berechnungen. Nach Strahlenexposition kann dies im Falle einer Unterschätzung der erhaltenen Strahlendosis zu einem unzureichenden Schutz von Wildtieren führen. Bei einer Überschätzung der Dosis würden dagegen hohe monetäre Kosten für eine Sanierung der Umwelt anfallen, die nicht nur unnötig, sondern für die Wildtiere auch schädlicher sein kann als die Strahlung selbst.

Durch die zunehmende Leistung moderner Arbeitsplatzcomputer sind solche Beschränkungen aber nicht mehr notwendig, so dass auch einzelne Organe im Tiermodell simuliert werden können. Nachfolgend wird ein mathematisches Modell für ein Fischauge beschrieben und dieses in das Forellen-Modell der ICRP (siehe dazu ICRP 108 [36]) integriert. Mit diesem mathematischen Modell

des Fischeauges wurde die absorbierte Dosis in der Fischeaugenlinse in einem externen Expositionsszenario einer Elektronenstrahlungsquelle berechnet, die homogen im umgebenden Wasser ver-

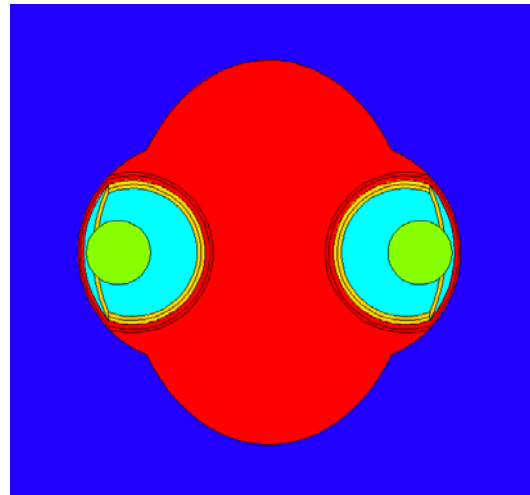
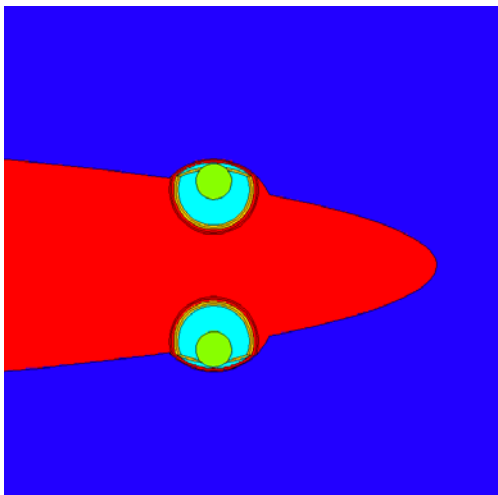
teilt ist, wobei drei verschiedene Wasserzusammensetzungen verwendet wurden. Weiterführende Details sind zu finden in Nogueira et al. [44].



Quelle: Johann Heinrich von Thünen-Institut

**Abbildung 11.1**

Modell eines für die Simulation mittels MCNPX entwickelten Fischeauges (links) im Vergleich zu einem allgemeinen Schema eines Fischeauges (rechts), Hornhaut - rot; Vorderkammer - hellblau; Augenlinse - grün; Glaskörper - hellblau; Netzhaut und Aderhaut - orange; Sklera - rot; Haut - rot; Wasser - dunkelblau



Quelle: Johann Heinrich von Thünen-Institut

**Abbildung 11.2**

Koronschnitt (links) und Querschnitt (rechts) eines MCNPX-Geometrieplots des in dieser Arbeit entwickelten Fischeugenmodells, integriert in das Referenzforellenmodell der ICRP (2008). Hornhaut - rot; Vorderkammer - hellblau; Augenlinse - grün; Glaskörper - hellblau; Netzhaut und Aderhaut - orange; Sklera - rot; Haut - rot; Wasser - dunkelblau

## Materialien und Methoden

### Geometrie und Elementzusammensetzung

Die Geometrie des Modells basiert auf einem Fischaugen-Schema [31]. Mit Hilfe der allometrischen Beziehung von Devlin et al. [30] wurde der laterale Augendurchmesser für die ICRP-Referenzforelle mit einer Körperlänge von 50 cm ermittelt. Der Coho-Lachs-Augendurchmesser wurde auf Grund der begrenzten verfügbaren Informationen als Referenz für Forellen gewählt. Um die Abschwächung der Strahlung durch den Körper der Forelle zu simulieren, wurde das ICRP-Forellenmodell in MCNPX [45] implementiert und das Augenmodell auf beiden Seiten der approximierten Position des Forellenauges darin integriert.

Es wurden drei verschiedene Wasserzusammensetzungen verwendet:

1. reines Wasser
2. die mittlere Zusammensetzung des Salzwassers nach Castro und Huber [28] und

3. die mittlere Zusammensetzung des Flusswassers in Europa nach Holland [32].

In allen drei Fällen wurde eine Dichte des Wassers von  $1 \text{ kg/dm}^3$  verwendet.

### Monte-Carlo-Simulationen

Die Monte-Carlo-Simulationen wurden mit dem Monte-Carlo-Partikeltransportcode MCNPX, Version 2.6 [45] durchgeführt. Es wurden sowohl Elektronen als auch Photonen simuliert, um die mögliche Erzeugung von Photonen aus Bremsstrahlung (Photonen, die durch die Abbremsung infolge Wechselwirkung mit Materie oder Richtungsänderung eines Elektrons entstehen) zu berücksichtigen. Um die Berechnungszeit zu begrenzen, wurde ein Energiegrenzwert von 10 keV für Elektronen und 1 keV für Photonen verwendet. Angesichts seiner Präzision und Genauigkeit [29,37] wurde der Elektronenenergie-Indizierungsalgorithmus im Integrated-Tiger-Series-Stil genutzt. Außerdem wurden die Standard MCNPX Querschnittsbibliotheken MCPLIB04 für Photonen und EL03 für Elektronen verwendet (Abbildungen 11.1 und 11.2).

**Tabelle 4.1**

**Absorbierte Dosis für die Augenlinse, berechnet für 3 verschiedene Zusammensetzungen des umgebenden Wassers und die jeweilige statistische Unsicherheit der modellierten Werte (ausgedrückt als eine geschätzte Standardabweichung, geteilt durch den geschätzten Mittelwert)**

| Dosis pro Liter pro Elektron ( $\text{pGy/l-Partikel}^{-1}$ ) |                      |                  |                      |                  |                      |                  |
|---|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
| Energie (MeV)   | reines Wasser        | Unsicherheit (%) | Flusswasser          | Unsicherheit (%) | Meerwasser           | Unsicherheit (%) |
| 0,1   | $4,99 \cdot 10^{-6}$ | 15,73            | $3,65 \cdot 10^{-6}$ | 18,21            | $2,83 \cdot 10^{-6}$ | 20,37            |
| 0,2   | $1,44 \cdot 10^{-5}$ | 9,15             | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | 8,78             | $1,45 \cdot 10^{-5}$ | 9,31             |
| 0,4   | $5,95 \cdot 10^{-5}$ | 4,94             | $6,27 \cdot 10^{-5}$ | 4,83             | $5,41 \cdot 10^{-5}$ | 5,20             |
| 0,5   | $9,38 \cdot 10^{-5}$ | 4,71             | $1,02 \cdot 10^{-4}$ | 4,51             | $9,37 \cdot 10^{-5}$ | 4,57             |
| 0,7   | $4,66 \cdot 10^{-4}$ | 4,25             | $4,46 \cdot 10^{-4}$ | 4,35             | $4,51 \cdot 10^{-4}$ | 5,96             |
| 1,0   | $3,02 \cdot 10^{-3}$ | 2,41             | $2,97 \cdot 10^{-3}$ | 2,43             | $2,90 \cdot 10^{-3}$ | 3,85             |
| 1,5   | $1,72 \cdot 10^{-2}$ | 1,29             | $1,72 \cdot 10^{-2}$ | 1,29             | $1,66 \cdot 10^{-2}$ | 2,36             |
| 2,0   | $4,93 \cdot 10^{-2}$ | 0,88             | $4,89 \cdot 10^{-2}$ | 0,88             | $4,82 \cdot 10^{-2}$ | 1,79             |
| 4,0   | $2,78 \cdot 10^{-1}$ | 0,63             | $2,74 \cdot 10^{-1}$ | 0,63             | $2,73 \cdot 10^{-1}$ | 1,02             |

## Ergebnisse und Diskussion

Um den Einfluss des umgebenden Wassers zu bewerten, wurde die Energiedosis, die auf die Fischaugenlinse wirkt, für Reinst-, Fluss- und Meerwasser in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Diese werden nachfolgend hinsichtlich ihrer relativen Unterschiede verglichen.

Beim Vergleich der adsorbierten Augenlinsendosis in Reinst- und Flusswasser wurden relative Unterschiede von 26% bzw. 10% für 0,1 MeV bzw. 0,2 MeV Elektronenenergie gefunden. Für 0,4 MeV und 0,5 MeV liegen die relativen Unterschiede unter 10% und für alle Energien über 0,5 MeV bei kleiner als 4%. In allen Fällen war der relative Unterschied kleiner als die statistische

Unsicherheitsfortpflanzung der Messwerte von zwei Sigma und nur in zwei Fällen war sie höher als die Unsicherheit von einem Sigma. Eine relative Abweichung zwischen reinem Wasser und Meerwasser von 43% bzw. 10% wurde für 0,1 MeV bzw. 0,4 MeV gefunden. Bei allen anderen Energien lag die relative Abweichung unter 4%. Mit Ausnahme von 0,1 MeV liegen alle relativen Abweichungen unter der Ein-Sigma-Unsicherheit.

Weiterhin wurde die von der Augenlinse absorbierte Dosis in Fluss- und Meerwasser verglichen. Für Teilchenenergien von 0,1 MeV und 0,4 MeV betragen die relativen Unterschiede etwa 23% bzw. 14%. Bei 0,2 MeV und 0,5 MeV reduzierten sich diese auf 9% bzw. 8%, und für Energien größer 0,7 MeV lag die relative Abweichung unter 4%. In allen Fällen war die relative Abweichung kleiner als die Zwei-Sigma-Unsicherheit und nur in drei Fällen lag sie über der Ein-Sigma-Unsicherheit.

### Anwendungsfall: Strahlendosis in der Ostsee

Die Ostsee ist eines der weltweit am stärksten mit anthropogenen radioaktiven Stoffen kontaminierten Meere [20], weshalb die Anwendung des Modells besonders interessant ist. Daher wurden die neuen Modellergebnisse zur Berechnung der Beta-Teilchendosen von  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{137}\text{Cs}$  (den beiden wichtigsten anthropogenen Radionukliden in der Ostsee [42]) auf die Augenlinse eines in der Ostsee lebenden Wildfisches über dessen gesamte Lebenszeit mit Hilfe der folgenden Gleichung verwendet:

$$D_A = A \cdot g_{\beta,r,T} \cdot t_L$$

$D_A$  - Lebens-Augen-Dosis, in  $\mu\text{Gy}$

$A$  - Aktivität im umgebenden Wasser, in  $\text{Bq/l}$

$g_{\beta,r,T}$  - Dosiskoeffizient, der mit dem in dieser Arbeit entwickelten mathematischen Modell abgeschätzt wird, und

$t_L$  - der durchschnittlichen Lebenszeit der betreffenden Fischart.

Für die nachfolgende Modellierung wurden folgende Werte für die einzelnen Parameter angenommen:

- durchschnittliche Aktivitätskonzentrationen für  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{137}\text{Cs}$  in der südlichen Ostsee im Jahr 2010 von 0,008  $\text{Bq/l}$  und 0,036  $\text{Bq/l}$  [48],
- Dosiskoeffizienten von  $1,5 \cdot 10^{-7} \mu\text{Gy/l} \cdot \text{Partikel}^{-1}$  für  $^{90}\text{Sr}$  und  $6,0 \cdot 10^{-6} \mu\text{Gy/l} \cdot \text{Partikel}^{-1}$  für  $^{137}\text{Cs}$ , wobei die Ergebnisse dieser Arbeit interpoliert wurden (Tabelle 4.1) und
- eine Lebenserwartung von 6 Jahren vergleichbar wie für die Forelle (ICRP 108, 2008b [36]).

Mit Hilfe dieser Werte wurden Lebens-Strahlendosen auf die Augenlinse von 0,227  $\mu\text{Gy}$  für  $^{90}\text{Sr}$  und 40,871  $\mu\text{Gy}$   $^{137}\text{Cs}$  abgeschätzt.

Diese Werte sind im Vergleich zum gegenwärtig akzeptierten Schwellenwert von 0,5 Gy für strahleninduzierte Katarakte in der menschlichen Augenlinse relativ niedrig (ICRP 103 [35]). Allerdings vernachlässigen diese Werte die zusätzlichen Dosen aus der Gammastrahlung des  $^{137}\text{Cs}$  ebenso wie die Strahlendosis durch natürliche Radionuklide, obwohl letztere als wesentlich höher angenommen wird [38].

### Fazit

Unter Verwendung des Monte-Carlo-Codes MCNPX wurden Berechnungen für Energien zwischen 0,1 MeV und 4 MeV durchgeführt. Die Ergebnisse wurden dann in Form von Dosiskoeffizienten dargestellt, die eine schnelle Abschätzung der Dosis für die Fischaugenlinse auf der Basis der Energie eines von einem Radionuklid emittierten Elektrons und der jeweiligen Aktivitätskonzentration im umgebenden Wasser ermöglichten. Dies wurde für die Dosisberechnung an einem in der südlichen Ostsee lebenden Fisch demonstriert.

Um den Einfluss der Zusammensetzung des umgebenden Wassers auf die erhaltene Dosis des Fischauges zu bewerten, wurde die absorbierte Dosis für drei verschiedene Wasserzusammensetzungen berechnet: Reinst-, Fluss- und Meerwasser. Im Allgemeinen wurden nur geringe relative Unterschiede zwischen den absorbierten Dosen in der Augenlinse bei unterschiedlichen Zusammensetzungen des umgebenden Wassers gefunden. Daher spielt die Zusammensetzung des Wassers für die absorbierte Betastrahlungs-Dosis der Augenlinse von Fischen nur eine geringe Rolle.