Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Bedeutung von Runoff-Prozessen und der Radionuklidsorption an Sedimenten in Fließgewässern für den radiologischen Notfallschutz – Erweiterung des Entscheidungshilfesystems RODOS

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 339. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 28. Oktober 2025

Vorwort

Die Vorhersage von Oberflächenkontamination infolge der Freisetzung von Radionukliden in die Atmosphäre im radiologischen Notfall stellt eine komplexe Herausforderung dar. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) betreibt hierfür das RODOS-System ein, welches die zu erwartende Flächenkontamination in Abhängigkeit von Quellterm und meteorologischen Bedingungen modelliert. Ein wesentlicher Aspekt, der in diese Berechnungen einfließen muss, sind die Runoff-Prozesse. Diese Prozesse beschreiben, wie Radionuklide durch abfließendes Oberflächenwasser, beispielsweise infolge von Niederschlägen, von festen Untergründen in fließende oder stehende Gewässer sowie ins Grundwasser eingetragen werden. Obwohl das RODOS-System grundsätzlich in der Lage ist, Runoff-Prozesse zu berücksichtigen und dazu bereits grundlegende Module enthält, basieren diese auf eher groben Annahmen und werden derzeit in Deutschland nicht genutzt. Eine weitergehende Modellierung, die sekundäre oder mittelbare Kontamination von Oberflächengewässern besser abbildet, ist daher unabdingbar.

Um die Bedeutung dieser Prozesse umfassend zu beurteilen, hat das Bundesumweltministerium die Strahlenschutzkommission (SSK) beauftragt, den Einfluss der Runoff-Prozesse auf die Kontamination von Oberflächengewässern im radiologischen Notfall zu prüfen und eine geeignete Erweiterung des RODOS-Systems vorschlagen. Die Prüfung umfasst auch die Berücksichtigung spezifischer Faktoren, wie die Beschaffenheit der Böden in Einzugsgebieten und die Natur der abgelagerten Radionuklide. Zur Erweiterung des RODOS-Systems sollen relevante Modellansätze, die dem Stand der Wissenschaft und Technik entsprechen und die Run-off Prozesse behandeln, recherchiert und bewertet werden. Dabei sollen sie auch der Anforderung gerecht werden die Beschreibung des Transports und der Anlagerung von Radionukliden an Sedimente während des Transports in aquatischen Systemen zu beinhalten.

Vor diesem Hintergrund hat die SSK im Jahr 2021 eine Arbeitsgruppe des Ausschusses „Radioökologie“ eingesetzt. Diese Arbeitsgruppe hat die Anforderungen und Bedarfe des operationellen Notfallschutzes hinsichtlich der Modellierung von Radionuklideinträgen in Gewässer und deren Transportwege untersucht. Ein Ergebnis war, dass das aktuelle RODOS-System in Bezug auf diese Aspekte nicht dem neuesten Stand der Wissenschaft und Technik entspricht und somit für den Einsatz in möglichen radiologischen Notfällen nicht ausreichend gerüstet ist. Daher hat die Arbeitsgruppe umfassend untersucht, welche Modellabsätze derzeit verfügbar und geeignet sind mit Blick auf eine potenzielle Implementierung in das RODOS-System.

Der Arbeitsgruppe gehörten folgende Mitglieder an:

- Dr. Veronika Ustohalova (Vorsitzende)
- Dr. Rainer Gellermann
- Dr. Jan Christian Kaiser
- Dr. Ralf Kunz
- Dipl.-Met. Wolfgang Raskob
- Dr. Thomas Rummler
- Prof. Dr. Clemens Walther

Wir dem BfS für die Bereitstellung umfangreicher Fachinformationen und fachlicher Unterstützung.

Bonn, im Dezember 2025

Dr. Veronika Ustohalova	*Prof. Dr. Ursula Nestle*
Vorsitzende der Arbeitsgruppe „Runoff-Prozesse“ und des Ausschusses „Radioökologie“ der SSK	Vorsitzende der Strahlenschutzkommission

INHALT

1 Einleitung 6

2 Beratungsauftrag 7

3 Empfehlungen 8

Wissenschaftliche Begründung 10

4 Anforderungen und Bedarfe des Notfallschutzes 10

4.1 Operationeller Notfallschutz und Sicht der zuständigen Behörden 10

4.2 Modelltechnische Abschätzung der Runoff-Prozesse und der Ausbreitung von Radionukliden in Oberflächengewässern im operationellen Notfallschutz 11

4.3 Aspekte des Notfallmanagements im Zusammenhang mit der Trinkwasserversorgung 13

5 Sachanalysen 14

5.1 Kurzbeschreibung von Runoff-Prozessen und deren Bedeutung in radiologischen Ereignissen 14

5.1.1 Hydrologische Grundlagen 14

5.1.2 Trockene und nasse Deposition und Runoff-Prozesse 17

5.1.3 Bedeutung der Runoff-Prozesse am Beispiel Fukushima und Tschornobyl 19

5.2 Transport von Radionukliden in Oberflächengewässern 21

5.2.1 Transportsystem Fließgewässer 21

5.2.2 Transportsystem Standgewässer 22

5.2.3 Relevante Abschnitte des deutschen Gewässernetzes und der oberflächigen Wasserreservoire 23

6 Derzeit in Deutschland vorhandene Modellansätze 25

6.1 RODOS-System 25

6.1.1 RETRACE 26

6.1.2 RIVTOX 27

6.1.3 COASTOX 28

6.1.4 THREETOX 29

6.1.5 POSEIDON 29

6.1.6 MOIRA 31

6.2 Modell QSim der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) 32

7 Recherche international verfügbarer Modelle 33

7.1 Ziele der Recherche 33

7.2 Überblick über die recherchierten Modelle und Bewertungsverfahren 34

7.2.1 Kommerzielle Modelle ohne Bewertung 34

7.2.2 Open-Source-Modelle 36
8 Modellbewertung 38
8.1 Bewertung erster Schritt: “Best-Choice” Open-Source-Modelle 38
8.2 Bewertung zweiter Schritt: “Best-Choice” Open-Source-Modelle in Gegenüberstellung mit dem RODOS-System und dem Modell QSim 44
8.2.1 Bewertung der einzelnen hydrologischen Modelle des RODOS-Systems für die Anwendung in Deutschland 45
8.2.2 Bewertung QSim 46
8.2.3 Bewertung Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model (DHSVM) 46
8.2.4 Bewertung WRF-Hydro® 47
8.3 Zentrale Aspekte als Grundlage der SSK-Empfehlung 47
9 Abkürzungsverzeichnis 49
10 Begriffsbestimmungen 50
11 Literatur 57

1 Einleitung

Gemäß §§ 97 bis 101 des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) sind Notfallpläne des Bundes und der Länder sowie externe Notfallpläne für ortsfeste Anlagen oder Einrichtungen mit einem besonderen Gefahrenpotenzial aufzustellen. Die Notfallpläne sind als Elemente der Vorsorge gegen radiologische Notfälle zu verstehen. Die Bundesregierung hat daher in 2023 auf Vorschlag des Bundesumweltministeriums einen Allgemeinen Notfallplan des Bundes (ANoPl-Bund) (BMUV 2023) aufgestellt. Dort sind unter anderem Referenzszenarien festgelegt, die als Grundlage für die im ANoPl-Bund und in den weiteren Notfallplänen nach StrlSchG darzustellende Planungen der Notfallreaktion des Bundes und der Länder dienen. Die Ausdifferenzierung der o. g. Referenzszenarien orientiert sich u. a. an unterschiedlichen radiologischen Gefahrenpotenzialen. Die Bewertung der möglichen Notfallexpositionssituationen, die sich aus den einzelnen Referenzszenarien ergeben können, erfolgt mit Hilfe von Gefährdungsanalysen.

Basierend auf den Gefährdungsanalysen wird ein Teil der Referenzszenarien als überregionaler Notfall eingestuft, welcher für die in dieser Empfehlung zu betrachtende Prozesse relevant ist. Bei einem derartigen Notfall kommt es im In- oder Ausland zu erheblichen Freisetzungen von Radionukliden in die Atmosphäre und einer großflächigen Kontamination von Gebieten durch trockene und nasse Deposition oder direkten Eintrag in die Oberflächengewässer. Neben dem direkten Eintrag in Oberflächengewässer treten auch Runoff-Prozesse auf. Hierunter versteht man, dass die auf festen Oberflächen abgelagerten Radionuklide in Folge von Niederschlägen in fließende oder stehende Oberflächengewässer wie Flüsse, Seen oder Wasserreservoire eingetragen werden. Die auf diese Art und Weise kontaminierten Oberflächengewässer können über verschiedene Pfade zur Exposition der Bevölkerung beitragen. Die sich dadurch auf deutschem Staatsgebiet ausbreitende Radioaktivität muss hinreichend genau und zeitnah im Sinne der Einschätzung der radiologischen Situation im Notfall abgebildet werden, um rechtzeitig vor dem Eintreffen der Kontamination Maßnahmen vornehmen zu können (siehe Kapitel 4). Eine frühzeitige Einschätzung einer erwarteten radiologischen Belastung der Oberflächengewässer und der dazu führenden Prozesse ist daher von zentraler Bedeutung für den anlagenexternen Notfallschutz.

Gemäß § 161 Absatz 1 StrlSchG ist die großräumige Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt die Aufgabe des Bundes. Dazu gehören u. a. die Ermittlung der Radioaktivität in Bundeswasserstraßen und in der Nord- und Ostsee außerhalb der Bundeswasserstraßen sowie auf der Bodenoberfläche. Der Absatz 1 sieht auch die Entwicklung und den Betrieb von Entscheidungshilfesystemen vor, welche dazu dienen, die Auswirkung von radiologischen Notfällen zu quantifizieren. Zur Analyse und Vorhersage der Kontamination von Oberflächen und Gewässern nach Freisetzungen von Radionukliden in die Atmosphäre betreibt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) das Entscheidungshilfesystem RODOS[1] (im Weiteren RODOS-System genannt), mit dem sich die zu erwartende Flächenkontamination durch Radionuklide und deren Weitertransport in Oberflächengewässern modellieren lassen. Das RODOS-System enthält bereits grundlegende Module zur Beschreibung solcher Runoff- und Transportprozesse in Oberflächengewässern. Diese Module werden derzeit in Deutschland nicht genutzt, da insbesondere die Runoff-Modellierung auf sehr groben Annahmen beruht. Eine künftige Nutzung und Erweiterung des RODOS-Systems zur frühzeitigen Einschätzung der radiologischen Belastung der Oberflächengewässer durch Runoff-Prozesse im Notfall ist beabsichtigt, um eine bessere Bewertungsgrundlage für die Angemessenheit von Maßnahmen zu schaffen. Dabei ist

[1] Realtime Online Decision Support

die anteilige Radionuklidverbreitung über die Runoff-Prozesse auf und unter der Landoberfläche zu ermitteln und diejenigen Transportpfade in die Oberflächengewässer abzubilden, welche aus der Sicht der Notfallmaßnahmen relevant sind.

Das RODOS-System des BfS beinhaltet keine Daten für Fließgewässer. Zur Simulation von Fließgewässern betreibt die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) aufgrund gesetzlicher Vorgaben das Modell QSim[2], mit dem der Transport von Radionukliden in Bundeswasserstraßen in gelöster Form für die Festlegung sofortiger Maßnahmen im Ereignisfall prognostiziert werden kann. Runoff-Prozesse werden derzeit in QSim nicht modelliert; der Radionuklidtransport ist bislang in einer vereinfachten Form als gelöster Stoff implementiert. Dabei ist für die ausgewählten ANoPl-Bund-Szenarien des überregionalen und grenzüberschreitenden Notfalls eine Verbesserung der Beschreibung von Runoff-Prozessen sowie des Radionuklidtransports unter Berücksichtigung des partikulären Transports und der Sedimentation in den Oberflächengewässern erforderlich.

Da die vorliegende Empfehlung Fachbegriffe aus der Hydrologie enthält, werden diese im Kapitel 10 erläutert.

2 Beratungsauftrag

Mit Schreiben vom 02. Juni 2021 bat das Bundesumweltministerium die Strahlenschutzkommission (SSK) um Empfehlungen zur Bewertung der Runoff-Prozesse nach Freisetzungen von Radionukliden in die Atmosphäre. Die Empfehlung sollte die Bedeutung der vielfältigen Faktoren aufzeigen, welche zum Weitertransport der Radionuklide in die Gewässer nach dem Eintrag auf den festen Grund maßgeblich beitragen und darauf basierend eine geeignete Erweiterung des RODOS-Systems vorschlagen. In den Empfehlungen sind folgenden Punkten zu betrachten:

1. Bewertung der Bedeutung von Runoff-Prozessen für die sekundäre/mittelbare Kontamination von Oberflächengewässern in Abhängigkeit von Faktoren wie der Bodenbeschaffenheit der Einzugsgebiete oder der Art der abgelagerten Radionuklide. Welcher Anteil der in einem Einzugsgebiet abgelagerten Oberflächenkontamination kann durch Runoff-Prozesse in ein Oberflächengewässer gelangen?
2. Bewertung der bisherigen Beschreibung der Runoff-Prozesse im RODOS-System. Insbesondere sollten die Eignung und Qualität der verwendeten Modellparameter betrachtet und möglicher Anpassungsbedarf (ggf. auch ortsabhängig je nach Einzugsgebiet) diskutiert werden.
3. In Anlehnung daran wird außerdem gebeten, die Anlagerung von Radionukliden an Sedimente während des Transports in aquatischen Systemen zu bewerten (z. B. durch Berücksichtigung von Veröffentlichungen zu diesem Thema basierend auf Erkenntnissen durch den Reaktorunfall in Fukushima) und nach Möglichkeit geeignete Modelle und Modellparameter zur Beschreibung dieser Prozesse vorzuschlagen.

2 Quality Simulation

3 Empfehlungen

Im operationellen Notfallschutz wird das RODOS-System für die Entscheidungsunterstützung eingesetzt. Die Ausbreitung von Radionukliden kann bereits heute mit Hilfe des RODOS-Systems für Oberflächengewässer (inkludiert auch einige Bundeswasserstraßen) im Prinzip modelliert werden, allerdings wird es in Deutschland für diesen Zweck bisher nicht genutzt. Die SSK kommt nach Überprüfung der im RODOS-System enthaltenden Module zu dem Schluss, dass insbesondere das Modell für den Runoff bzw. dessen Implementierung nicht dem Stand der Wissenschaft und Technik entspricht und auch nicht für den Einsatz in einem radiologischen Notfall ausreichend ist. Gemäß Beratungsauftrag des Bundesumweltministeriums sollte die SSK für einen solchen Fall eine geeignete Erweiterung des RODOS-Systems vorschlagen, durch die die Runoff-Prozesse berücksichtigt werden können und die den Anforderungen des praktischen Notfallschutzes Rechnung trägt. Für eine solche Erweiterung des RODOS-Systems ist es zwingend erforderlich, dass der Quellcode der Software sowie die Schnittstellen nach außen nach Bedarf verändert werden können und die Software sowohl unverändert als auch in einer angepassten Form weitergegeben werden darf. Diese Merkmale erfüllen nur Open-Source-Modelle. Aufgrund dieser Rahmenbedingung hat die SSK im Rahmen ihrer Modellbewertung lediglich Open-Source-Modelle berücksichtigt, da alle anderen Modelle entgegen dem Beratungsauftrag keine geeignete Erweiterung des RODOS-Systems darstellen würden.

Generell sind für den radiologischen Notfallschutz alle Oberflächengewässer und deren Einzugsgebiete zu berücksichtigen – auch wenn diese im Ausland liegen, aber durch Runoff-Prozesse und/oder Transport in Oberflächengewässern ein Eintrag nach Deutschland erfolgen kann. Bei einem radiologischen Notfall ist in den ersten Stunden und Tagen insbesondere der Transport von mit Wasser getragenen Radionukliden sowohl in gelöster als auch in partikelgebundener Form von Bedeutung. Dies beinhaltet auch den Austausch mit dem Sediment. Dies kann je nach Notfallexpositionssituation die Sedimentation von an Schwebstoffen gebundenen Radionukliden in Oberflächengewässern sowie die Ad- und Desorption der Radionuklide an/von Sedimenten als relevante Prozesse mit einbeziehen.

Basierend auf den Auswertungen zu Runoff-Prozessen und dem Radionuklidtransport in Oberflächengewässern nach dem Reaktorunfall von Fukushima bewertet die SSK Runoff-Prozesse als bedeutend für die sekundäre/mittelbare Kontamination von Oberflächengewässern und die daraus resultierenden Risiken für die Bevölkerung.

Im RODOS-System bestehen zu diesen Aspekten Modellierungslücken, die nach Auffassung der SSK zeitnah und nachhaltig geschlossen werden sollen. Konkret empfiehlt die SSK hierzu wie folgt:

Empfehlung 1: Aufgrund der Bedeutung von Runoff-Prozessen und des Radionuklidtransports in Oberflächengewässern für den Notfallschutz empfiehlt die SSK,

a) die Modellierung der Runoff-Prozessen nach Stand von Wissenschaft und Technik in die operationell eingesetzten Notfallschutzsysteme zur Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen einzubeziehen,
b) die Modellierung des Transports von Radionukliden in Oberflächengewässern sowie auch Prozesse der Wechselwirkung von gelösten, partikelgebundenen und im Sediment gebundenen Radionuklide in den operationell eingesetzten Notfallschutzsystemen einzubeziehen.

Empfehlung 2: Dazu ist aus der Sicht der SSK folgende Erweiterung des RODOS-Systems erforderlich:

a) Implementierung eines geeigneten Modells zur Berücksichtigung des Eintrags von Radionukliden in Oberflächengewässer über Runoff-Prozesse,
b) Implementierung des Transports von Radionukliden in Oberflächengewässern (gelöst und partikelgebunden sowie Austausch mit dem Sediment),
c) Realisierung einer Schnittstelle zwischen der Modellierung der Runoff-Prozesse und der Modellierung des Transports von Radionukliden innerhalb der Oberflächengewässer.

Empfehlung 3: Nach Prüfung der relevanten Anforderungen des Notfallschutzes und der international zur Verfügung stehenden hydrologischen Modelle, empfiehlt die SSK ein Modell zu verwenden, welches die in der Empfehlung 2 genannten Anforderungen an die Erweiterung des RODOS-Systems erfüllt und das deutsche Staatsgebiet sowie für den Notfall relevante Regionen im Ausland abdeckt. Aufgrund der Struktur des RODOS-Systems und der in Empfehlung 2 genannten Anforderungen soll das Modell folgende Merkmale besitzen:

a) Open-Source-Modell mit großer Nutzer- und Entwickler-Community,
b) Ausbau von Datenschnittstellen mit Modellsystemen wie RODOS ist schnell umsetzbar,
c) physikalisch basiertes Modellsystem nach Stand von Wissenschaft und Technik mit modularem Aufbau und der Möglichkeit, neue Subroutinen/Module einzufügen,
d) an vielen Beispielen validiert und für ein großes Einzugsgebiet geeignet,
e) Beschreibung von Landoberflächen mit saisonalem Bewuchs und möglicher Schneebedeckung ist vorhanden,
f) Radionuklidtransport in gelöster und partikelgebundener Form sowie der Austausch mit dem Sediment sind implementiert oder effizient implementierbar,
g) europaweite Datenbasis (z. B. Topografie, Landnutzung, Bodentypen bzw. Bodenarten usw.) ist vorhanden und Anpassung an ein Einzugsgebiet ist einfach zu realisieren, wenn möglich für Deutschland bereits demonstriert.

Wissenschaftliche Begründung

Die wissenschaftliche Begründung stellt die Vorgehensweise bei der Entwicklung der Empfehlungen dar. Dazu werden im Kapitel 4 zunächst die Anforderungen und Bedarfe des Notfallschutzes im Zusammenhang mit Referenzszenarien für den Notfallschutz (gemäß ANoPl-Bund) erläutert. Das Kapitel 5 beschreibt die wesentlichen hydrologischen und transportbezogenen Prozesse und bewertet diese im Hinblick auf Relevanz im radiologischen Notfall. Im Weiteren werden im Kapitel 6 die derzeit in Deutschland vorhandenen Modellansätze – das RODOS-System und QSim – beschrieben und analysiert. Dabei wird sowohl der Entwicklungsstand als auch die Struktur betrachtet. Auf die einzelnen Module des RODOS-Systems mit deren Aufgaben wird eingegangen: RETRACE für den Runoff, RIVTOX eindimensional für Fließgewässer, COASTOX zweidimensional für Flussabschnitte, THREETOX dreidimensional für komplexe Geometrien, POSEIDON für Küstengewässer, MOIRA für langfristige Prognosen. Die Analyse erfolgt sowohl aus der Sicht der modellbasierten Implementierung der Hydrologie und des Radionuklidverhaltens in Umweltmedien als auch im Hinblick auf die softwarebezogene Architektur. Das Kapitel 7 beinhaltet eine gezielte Recherche internationaler Modellansätze, die in einem zweistufigen Verfahren bewertet werden. Die Ziele der Recherche, das Bewertungsverfahren und die recherchierten Modelle werden dort vorgestellt. Mit Blick auf die Erweiterung des RODOS-Systems werden im Kapitel 8 die Modelle bewertet und die als am besten geeignet eingestuften Modellansätze gegenübergestellt. Darauf basierend werden die zentralen Merkmale der Anforderungen auf das zukünftige Modellsystem innerhalb des RODOS-Systems formuliert, welche in die Empfehlungen eingeflossen sind.

4 Anforderungen und Bedarfe des Notfallschutzes

4.1 Operationeller Notfallschutz und Sicht der zuständigen Behörden

Die Anforderungen und Bedarfe des operationellen Notfallschutzes – d. h. die Aufgaben, die durch Behörden, wie das BfS und die BfG, in einem radiologischen Notfall zu erfüllen sind – an die Modellierung der Runoff-Prozesse sowie des Radionuklidtransports in Gewässern, wobei je nach der Anforderung Gewässer im Allgemeinen oder ausschließlich Oberflächengewässer tangiert werden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- erste Abschätzung, in der Regel innerhalb von Stunden, des Eintrags von Radionukliden durch die nasse und trockene Deposition aus der Atmosphäre auf den festen Grund und weiter über Runoff-Prozesse in Oberflächengewässer in Notfällen, in denen mit einer luftgetragenen Ausbreitung von radioaktiven Stoffen zu rechnen ist. Dies gilt auch für eine Freisetzung im Ausland, wenn durch Ausbreitung in der Atmosphäre und anschließender Runoff-Prozesse oder durch Transport in Oberflächengewässern ein Eintrag nach Deutschland erfolgen kann;
- erste Abschätzung, in der Regel innerhalb von Stunden, der daraus folgenden Ausbreitung von Radionukliden in Oberflächengewässern;
- Vorhersage von Expositionssituationen als Basis für frühzeitige Vorwarnungen, wo und wann radiologische Gefährdungen durch kontaminiertes Trink- und Tränkwasser, kontaminiertes Bewässerungswasser oder kontaminierte Wasserfahrzeuge auftreten können, um gezielt in den potenziell betroffenen Gebieten eine verstärkte messtechnische Überwachung einleiten zu können;

– Bereitstellung von Daten und Informationen als Basis für das Ergreifen vorbeugender Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung (z. B. Nutzungseinschränkungen oder -verbote für Trink-, Tränk- und Beregnungswasser, Sperrung von Wassergewinnungseinrichtungen, Einschränkung oder Verbot der sonstigen Nutzung von Oberflächengewässern)

4.2 Modelltechnische Abschätzung der Runoff-Prozesse und der Ausbreitung von Radionukliden in Oberflächengewässern im operationellen Notfallschutz

Die modelltechnische Abschätzung der Runoff-Prozesse und der Ausbreitung von Radionukliden in Oberflächengewässern soll im operationellen Notfallschutz eine Priorisierung der messtechnischen Überwachung ermöglichen. Dabei ist zum einen zu entscheiden, wo vordringlich beprobt und gemessen werden muss, zum anderen müssen die Ergebnisse der modelltechnischen Abschätzungen geeignet sein, um festzulegen, wo und wann Maßnahmen zu ergreifen sind, um eine radiologische Gefährdung der Bevölkerung zu minimieren oder zu vermeiden (siehe Abschnitt 4.1). Eine wissenschaftlich genaue Vorhersage der zu erwartenden Radionuklidkonzentrationen in Gewässern mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung ist dabei nur von nachrangiger Bedeutung, die Vorhersage der groben zeitlichen und räumlichen Verteilung der Kontaminationen im Wasserpfad ist hingegen vorrangig. Dabei ist zu beachten, dass diese Vorhersage nach Möglichkeit realitätsnah aber auch genug konservativ sein sollte, so dass die Kontamination nicht unterschätzt wird.

Runoff-Prozesse und Radionuklidtransport in Gewässern können in einigen Referenzszenarien für den Notfallschutz (gemäß dem ANoPl-Bund) eine relevante Rolle spielen, wie in Tabelle 4-1 erläutert ist. Dabei wird die Relevanz für alle Gewässer allgemein oder für die Oberflächengewässer explizit aufgeführt.

Tabelle 4-1: Referenzszenarien und Relevanz der Runoff-Prozesse und des Radionuklidtransports in Gewässern

Referenzszenario		**Relevanz von Runoff-Prozessen und dem Radionuklidtransport in Gewässern**
Nr.	**Bezeichnung**	
S0	Notfall mit ungeklärtem Ursprung	Unklar, nicht von vornherein auszuschließen.
S1	Notfall in einem deutschen Kernkraftwerk (vor Brennelementfreiheit)	Bis zur Brennelementfreiheit sind erhebliche Freisetzungen in die Umwelt nicht ausgeschlossen, daher können bei einem solchen Notfall Runoff-Prozesse und der Radionuklidtransport in Gewässern relevant sein.
S2	Notfall in einem Kernkraftwerk im grenznahen Ausland (in bis zu 100 km Entfernung von der deutschen Grenze)	Hohe Relevanz für Deutschland für die Kernkraftwerke - Temelin (Moldau -> Elbe) - Cattenom (Mosel -> Rhein) - Beznau (Aare -> Rhein) - Leibstadt (Rhein) - Gösgen (Aare -> Rhein); Für andere Kernkraftwerke nur relevant, wenn Einzugsgebiete von deutschen Oberflächengewässern betroffen sind.
S3	Notfall in einem Kernkraftwerk auf dem europäischen Kontinent (in mehr als 100 km Entfernung von der deutschen Grenze)	Nur relevant, wenn Einzugsgebiete von deutschen Oberflächengewässern betroffen sind.

Referenzszenario		Relevanz von Runoff-Prozessen und dem Radionuklidtransport in Gewässern
Nr.	**Bezeichnung**	
S4	Notfall in einem Kernkraftwerk außerhalb des europäischen Kontinents	Nicht relevant für Deutschland, da es nicht zu einer radiologisch bedeutenden Kontamination von deutschen Oberflächengewässern kommen kann.
S5	Notfall in einer ortsfesten Anlage oder Einrichtung im In- und Ausland mit besonderem Gefahrenpotenzial, die nicht unter S1 bis S4 fällt	Relevant für Notfälle in Forschungsreaktoren; Für alle anderen Notfälle in diesem Szenario (z. B. Notfälle in Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung, Kernkraftwerke nach Brennelementfreiheit) in der Regel nicht relevant (nur dann relevant, falls es bei einem derartigen Notfall zu einer Deposition von radioaktiven Stoffen auf größere Flächen und dadurch zu nicht vernachlässigbaren Runoff-Prozessen oder zu einem erheblichen direkten Eintrag in ein deutsches Gewässer kommt).
S6	Notfall im Zusammenhang mit sonstigen Tätigkeiten nach § 4 StrlSchG oder vergleichbaren Tätigkeiten nach ausländischem Recht	In der Regel nicht relevant (nur dann relevant, falls es bei einem derartigen Notfall zu einer Deposition von radioaktiven Stoffen auf größere Flächen und dadurch zu nicht vernachlässigbaren Runoff-Prozessen oder zu einem erheblichen direkten Eintrag in ein deutsches Gewässer kommt).
S7	Transportunfall an Land (Straße, Schiene, Luft)	
S8	Sonstiger Notfall mit radioaktiven Stoffen oder mit radioaktiven Kontaminationen	
S9	Absturz eines Satelliten oder Raumfahrzeugs mit radioaktivem Material	
S10	Notfall auf einem Oberflächengewässer	Runoff-Prozesse nicht relevant[1], hingegen hohe Relevanz für den Radionuklidtransport in Gewässern.
S11	Notfall auf oder in Meeresgewässern	Nur relevant für den Fall, dass es bei einem Notfall zu einer erheblichen Freisetzung in die Umwelt mit anschließendem luftgetragenen Transport auf deutsche Landfläche[2] oder in Einzugsgebiete von deutschen Fließgewässern kommt oder der Notfall in Küstengewässer und tidebeeinflusste Flüsse (z. B. Elbe) auftritt.
S12	Vorsätzliche Straftat im In- und Ausland im Zusammenhang mit radioaktiven Stoffen ohne Bezug zu einer Einrichtung oder kerntechnischen Anlage	In der Regel nicht relevant (nur dann relevant, falls es bei einem derartigen Notfall zu einer Deposition von radioaktiven Stoffen auf größere Flächen und dadurch zu nicht vernachlässigbaren Runoff-Prozessen oder zu einem erheblichen direkten Eintrag in ein deutsches Gewässer kommt).
S13	Vorsätzliche Straftat, Störmaßnahme oder sonstige Einwirkung Dritter gegen oder auf eine Einrichtung oder kerntechnische Anlage	(zur Relevanz siehe S1, S2, S3 oder S5)

Referenzszenario		Relevanz von Runoff-Prozessen und dem Radionuklidtransport in Gewässern
Nr.	**Bezeichnung**	
S14	Nuklearwaffenexplosion	Nur relevant**,** wenn Einzugsgebiete von deutschen Oberflächengewässern betroffen sind.
S15	Sonstiger Notfall beim Umgang mit einer Nuklearwaffe	In der Regel nicht relevant (nur dann relevant, falls es bei einem derartigen Notfall zu einer Deposition von radioaktiven Stoffen auf größere Flächen und dadurch zu nicht vernachlässigbaren Runoff-Prozessen oder zu einem erheblichen direkten Eintrag in ein deutsches Gewässer kommt).

[1] Die unterschiedliche Relevanz der Runoff-Prozesse bei Notfällen auf Oberflächengewässern (S10) und Notfällen auf Meeresgewässern (S11) liegt darin begründet, dass lediglich bei Notfällen auf Meeresgewässern eine Freisetzung in die Atmosphäre aus Kernreaktoren, wie z. B. nuklear betriebenen Eisbrecher, Flugzeugträgern oder Unterseebooten, berücksichtigt werden muss, derartige Szenarien aber für Notfälle auf Oberflächengewässern nicht denkbar sind.

[2] Landfläche: Festland und Inseln

4.3 Aspekte des Notfallmanagements im Zusammenhang mit der Trinkwasserversorgung

Die Bewertung der radiologischen Situation mit Hilfe des erweiterten RODOS-Systems soll eine modelltechnische Abschätzung der Runoff-Prozesse und der Ausbreitung von Radionukliden in Oberflächengewässern möglich machen. Diese ist die Basis für die zentrale Aufgabe im radiologischen Notfall – das Notfallmanagement der Trinkwasserversorgung. Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte der Trinkwasserversorgung im radiologischen Notfall sowie die Aufgaben der verantwortlichen Personen erläutert.

Für effektives Handeln der verantwortlichen Stellen in radiologischen Notfallsituationen ist die Kenntnis der Pläne und Handlungsweisen anderer Beteiligter grundsätzlich bedeutsam. Die Trinkwasserversorgung ist in radiologischen Ereignisfällen ein besonders relevantes Schutzgut. Daher sollte das Handeln der Verantwortlichen im Strahlenschutz mit den Analysen und Planungen der Versorgerbetriebe abgestimmt sein.

Da das Wasser in Trinkwassertalsperren bzw. Einzugsgebieten von Entnahmestellen für die Trinkwassergewinnung generell durch Stoffeinträge gefährdet ist, sind die Betreiber von Anlagen mit mehr als 10 m³ Wasserentnahme pro Tag bzw. 50 versorgten Personen zu einer Risikoanalyse verpflichtet. Im Rahmen einer solchen Analyse sind Gefährdungen und Gefährdungsereignisse zu identifizieren, die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß eines Gefährdungsereignisses abzuschätzen (Risikoanalyse) und eine Priorisierung der Risiken vorzunehmen (Risikobewertung) (TrinkwEGV 2023). Die Risikobewertung und das Risikomanagement der Einzugsgebiete von Entnahmestellen für die Trinkwassergewinnung verfolgt das Ziel, das Rohwasser, das Grundwasser und das Oberflächenwasser in den Einzugsgebieten zu schützen und somit eine Verringerung des Umfangs der Aufbereitung von Trinkwasser zu bewirken.

Zur Umsetzung der dabei gewonnenen Erkenntnisse legen die örtlich zuständigen Behörden nach Anhörung des Betreibers Risikomanagementmaßnahmen fest (§ 15 TrinkwEGV). Sofern im Strahlenschutzregelwerk eigene Anforderungen festgelegt sind, die ebenfalls dem Risikomanagement dienen, hat die örtlich zuständige Behörde darauf hinzuwirken, dass die für den Strahlenschutz zuständige Behörde die Maßnahmen festsetzt, die zur Verhinderung oder Beherrschung der radiologischen Risiken erforderlich sind.

In den Besonderen Notfallplänen des Bundes[3], die sich aktuell in Entwicklung befinden, werden voraussichtlich Aspekte zum Risikomanagement der Trinkwassergewinnung und -versorgung einfließen. Die Vollständigkeit von Risikobewertung und Risikomanagementmaßnahmen für Trinkwasser in diesen Notfallplänen kann durch die SSK derzeit aufgrund der noch laufenden Arbeiten nicht bewertet werden; dies ist auch nicht die Aufgabe dieses Beratungsauftrages.

5 Sachanalysen

5.1 Kurzbeschreibung von Runoff-Prozessen und deren Bedeutung in radiologischen Ereignissen

5.1.1 Hydrologische Grundlagen

Gewässer – sowohl Oberflächengewässer als auch unterirdische Gewässer – unterliegen vielfältiger Nutzung (wie Trinkwasserversorgung, Beregnung, Viehtränken, Freizeitgestaltung). Daher ist für den Notfallschutz eine Kenntnis einer möglichen radioaktive Kontamination der Gewässer sowohl aus einer nassen als auch einer trockenen Deposition nötig. Dazu müssen die Komponenten des Wasserkreislaufes, welche die Entwässerung der Landflächen der Erde, d. h. die Ableitung des überschüssigen Niederschlagswassers, beschrieben und die Prozesse berücksichtigt werden, die zu einer schnellen Ausbreitung von radioaktiver Kontamination führen – die Runoff-Prozesse und der Weitertransport via Oberflächengewässer. Dies ist die Grundlage für die Modellierung des Transports von Radionukliden in die Wasserkompartimente nach dem Eintrag auf die feste Oberfläche. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Wasserkreislaufes dargestellt.

Der **Abfluss bzw. der Volumenstrom des Wassers durch Runoff-Prozesse** wird aus Niederschlagswasser gebildet, das zum Zeitpunkt der Betrachtung nicht verdunstet ist und das auch nicht in Speichern wie Pflanzenoberflächen (Interzeption), Bodenoberflächen (Mulden), in Schnee, Eis und Gletschern, in stehenden Oberflächengewässern, im Boden (Bodenfeuchte) sowie im Grundwasser zurückgehalten wird (abflusswirksamer Niederschlag, Effektivniederschlag)[4]. Als schwerkraftgetriebene Wasserbewegung findet der Abfluss generell sowohl oberirdisch als auch unterirdisch statt.

Der **oberirdische Abfluss** kann als Landoberflächenabfluss flächenhaft verteilt auftreten. Die wichtigste Form des oberirdischen Abflusses ist aber der Fließgewässerabfluss in Gerinnen der Gewässernetze. Während die im Wasser gelösten Radionuklide sich beim Transport nicht aufkonzentrieren können (sofern nicht Verdunstung zu einer Verringerung der Wasservolumina führt), können die an Partikel gebundenen Radionuklide beim Übergang von der Bodenoberfläche zur Gewässerrinne zum einen in Sedimentfallen akkumulieren und zu lokalen Kontaminations-Hotspots führen, zum anderen in Form von Schwebfracht mit dem Strom weitergetragen werden. Der Anteil, der in der oberen Schicht der Flusssedimente akkumulierten Radionuklide, kann als eine Art temporäre Senke gesehen werden. Durch die Änderung der Strömungsverhältnisse aufgrund der Wasserzunahme (Hochwasser) oder Abnahme (Niedrigwasser) oder verursacht durch menschliche Aktivitäten (z. B. Ausbaggerung) kann es zum Weitertransport und erneuter Ablagerung der Sedimentteilchen kommen.

Der **unterirdische Abfluss** besteht ebenfalls aus zwei Komponenten. 1.) Der hypodermische Abfluss (Zwischenabfluss bzw. Interflow) verläuft über oberflächennahe Deckschichten über

[3] https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/__99.html
[4] Mit Bezug auf https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/abfluss/32 verfasst.

dem Grundwasserspiegel und erreicht die Vorfluter zeitverzögert; allerdings wird die Konzentration von Radionukliden geringfügig sein. Zum Beispiel erfolgt die Abwärtswanderung von Radiocäsium in den meisten Böden mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 cm bis 10 cm pro Jahr, abhängig von den örtlichen Bedingungen wie Niederschlagsmengen und Bodeneigenschaften (Konoplev 2022, Onda et al. 2020). 2.) Das bis in das Grundwasser versickernde Wasser gelangt in der Regel stark verzögert über Quellen oder direkten Übertritt in die Oberflächengewässer. Einige charakteristische Eigenschaften der hier genannten Abflussarten sind in Tabelle 5-1 zusammengestellt.

Die Abflussarten, welche als **schnell ablaufende Runoff-Prozesse** angesehen werden können und für den radiologischen Notfall von Bedeutung sind, sind dem Landoberflächenabfluss und dem Fließgewässerabfluss in Bächen und Flüssen (siehe Tabelle 5-1) zugeordnet. Hier ist neben der Hangneigung auch die Beschaffenheit der Landoberfläche entscheidend: Während der Oberflächenabfluss in Wäldern oder auf Grasflächen verzögert oder gar unterbunden wird, wird er auf einer unbedeckten, geneigten Ackerfläche hingegen intensiviert, was wiederum zur Bildung von Rinnen führen kann. Dabei ist zu beachten, dass rund 14,6 % der Gesamtfläche Deutschlands für Siedlungs- und Verkehrszwecke in Anspruch genommen werden. Davon sind rund 45 % aktuell versiegelt[5]. Das Wasser aus den versiegelten Flächen wird zum Teil über die Kanalisation in die Kläranlagen abgeleitet und dort zurückgehalten, ein Teil gelangt über die schnell ablaufenden Runoff-Prozesse in die Oberflächengewässer.

In der folgenden Abbildung 5-1 sind die einzelnen Komponenten des Wasserkreislaufes überblickartig dargestellt.

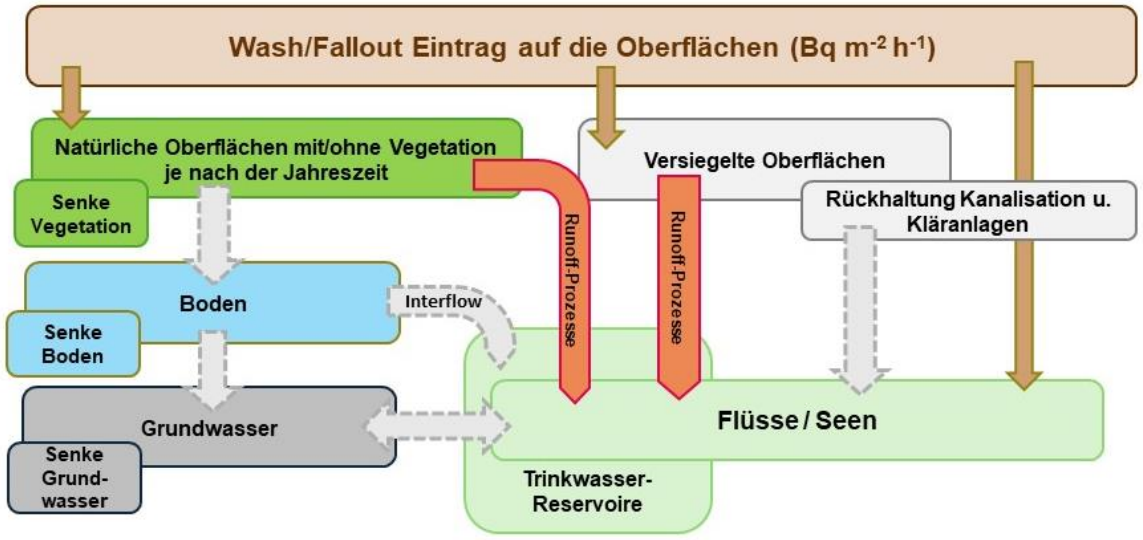

Abbildung 5-1: *Komponenten des Wasserkreislaufes und die Transportpfade (braun: direkter Eintrag auf die feste Oberfläche, blau: langsamer Abfluss in weitere Kompartimente, rot: schneller Runoff). In den dargestellten Oberflächengewässern (hellgrün) (Flüssen, Seen sowie Trinkwasserreservoiren) können die eingetragenen Radionuklide gelöst, partikelgebunden oder im Sediment vorkommen.*

[5] https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung

Tabelle 5-1: Abflussarten und deren Charakteristika für die Modellierung des Radionuklidtransportes

Abflussart und Relevanz für Modellierung	**Verfügbarkeit von Daten zum Abfluss**
Landoberflächenabfluss 1 (Hortonscher Landoberflächenabfluss) Tritt auf bei Regenmengen, die die Infiltrationskapazität des Bodens übersteigen. Sehr kurze Reaktionszeit auf Niederschläge. Für Modellierung relevant.	Keine direkte messtechnische Überwachung. Nur modelltechnisch oder ggf. indirekt aus Niederschlagsmessungen abzuschätzen.
Landoberflächenabfluss 2 (Sättigungsflächenabfluss) Tritt auf bei wassergesättigtem Boden. Kurze Reaktionszeit auf Niederschläge. Für Modellierung relevant.	Keine direkte messtechnische Überwachung. Nur modelltechnisch oder ggf. indirekt aus Niederschlagsmessungen abzuschätzen.
Fließgewässerabfluss 1 (Abfluss in kleinen Gerinnen und Gräben) Kurze Reaktionszeit auf Niederschläge. Für Modellierung wenig relevant*.	In der Regel nicht messtechnisch überwacht. (d. h. keine direkten Abflussdaten verfügbar)
Fließgewässerabfluss 2 (Gewässerabfluss in Bächen und Flüssen) Für Modellierung relevant.	Messtechnische Überwachung der Wasserstände. Daten über Messnetzbetreiber der Länder und der BfG verfügbar. Messintervalle liegen im Minuten- bis Stundenbereich. Für viele Pegel allerdings nur Angabe der Wasserstände, keine sofortige Angabe des Abflusses.
Hypodermischer Abfluss (Zwischenabfluss bzw. Interflow). Unterirdischer oberflächennaher Abfluss in Bodenschichten Für Modellierung wenig relevant.	Keine direkte messtechnische Überwachung. Nur modelltechnisch abbildbar.
Grundwasserabfluss Für Modellierung nicht relevant.	Messtechnische Überwachung der Grundwasserstände. Daten zu Grundwasserständen in Messnetzen verfügbar.

* Muss nicht prozessbasiert modelliert werden, sondern kann durch eine geeignete Parametrisierung als Teil des Landoberflächenabflusses 2 beschrieben werden.

In oberflächennahen Grundwasserleitern, welche mit einem Fluss kommunizieren, kann es über Runoff-Prozesse zu einem nur geringfügig verzögerten Eintrag der mit dem Wasser getragenen Radionuklide via Boden und in Ausnahmefällen Grundwasser in das Flusswasser kommen. Dabei können die Zwischenabfluss-Prozesse im Sinne der geringfügigen Verzögerung von Bedeutung sein: Das abfließende Wasser erreicht zum Teil sehr schnell den Vorfluter über die Bodenschicht oberhalb des Grundwassers und die Radionuklide können aus dem durch den Regeneintrag gesättigten Boden mit dem Zwischenabfluss transportiert werden, ohne dass Rückhaltung durch Bodensorption stattfinden kann. Untersuchungen aus Tschornobyl zeigten allerdings, dass dieser Beitrag sehr geringfügig und daher aus der Sicht des Notfallschutzes kaum von Bedeutung ist (Fesenko et al. 2002, Konoplev 2022). Der unterirdische Abfluss in größeren Tiefen verläuft generell wesentlich langsamer und kann bei tiefen Grundwasserleitern mehrere tausend Jahre dauern.

Für die Ausbreitung von Kontaminationen ist zu beachten, dass Wasser, welches vor einem Niederschlagsereignis oder der Schneeschmelze bereits im Boden oder einem ruhenden Gewässerabschnitt (z. B. Gräben) vorhanden ist und das infolge des Niederschlags mobilisiert wird, zwar einen messbaren Abfluss in einem Fließgewässer verursacht, als Vorereigniswasser („Altwasser“) aber nicht durch den Niederschlag selbst kontaminiert ist. Je nach Gebietscharakteristika und hydrologischen Randbedingungen, kann der Anteil des Vorereigniswasser für ein einzelnes Niederschlagsereignis bei 50 % bis über 80 % liegen und damit einen Verdünnungseffekt haben.

5.1.2 Trockene und nasse Deposition und Runoff-Prozesse

Da Runoff-Prozesse in ihrer räumlichen Ausbreitung von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängen (siehe Tabelle 5-2) und außerdem zeitlich variabel sind, bedarf es für eine Vorhersage der Oberflächenkontamination nach Freisetzungen von Radionukliden in die Atmosphäre eines geeigneten Modellsystems. In diesem Modellsystem müssen auch die im Notfall verfügbaren Daten zu relevanten Parametern von Runoff-Prozessen (beispielsweise Niederschlagsmenge mit geografischen Informationen zum betroffenen Gebiet, Abfluss in Oberflächengewässern) so verarbeitet werden, dass Entscheidungen über angemessene Notfallreaktionen kurzfristig getroffen werden können.

Tabelle 5-2: Einflussgrößen und Parameter der Ausbreitung der Radionuklide nach einer nassen und trockenen Deposition

Größe	**Parameter**	**Bemerkungen**
Effektiver Niederschlag	· Intensität · Zeitlicher Verlauf · Form (Regen / Schnee) · Räumliche Verbreitung	· Daten über den Deutschen Wetterdienst (DWD) verfügbar · Daten für Prognosen · Berechnung der Flächenkontamination
	· Bewuchs · Rückhaltepotenziale	–
Landoberflächenabfluss 1 (Hortonscher Landoberflächenabfluss)	· Bodeneigenschaften Infiltrationsvermögen · Landnutzung · Bewuchs · Relief / Gefälle · Einzugsgebiet	· Daten zu Landnutzung über verschiedene Quellen verfügbar, bspw. CORINE[6] · Daten zur Verbreitung von Böden und deren Eigenschaften über die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) verfügbar · Daten zu Bewuchs bspw. aus Satellitenfernerkundung
Landoberflächenabfluss 2 (Sättigungsflächenabfluss)	· Bodeneigenschaft · Bodenfeuchte · Relief / Gefälle · Bewuchs · Einzugsgebiet	· Daten zu Bodenfeuchte werden meist durch Punktmessungen erhoben. · Flächenhafte Informationen werden in der Regel modelltechnisch generiert.

[6] Coordination of Information on the Environment

Größe	Parameter	Bemerkungen
Fließgewässerabfluss 1 (Abfluss in kleinen Gerinnen, Gräben)	· Fließgewässernetzdichte · Gefälle / Relief · Einzugsgebiet · Fließgeschwindigkeiten	–
Fließgewässerabfluss 2 (Abfluss in Bächen und Flüssen)	· Fließgewässer(quer)profil · Wasserstand · Fließgeschwindigkeiten	· Daten werden meist durch Punktmessungen erhoben. · Flächenhafte Informationen werden in der Regel modelltechnisch generiert.
Hypodermischer Abfluss	· Bodeneigenschaften · Bodenfeuchte · Relief / Gefälle	· Bestimmte Bereiche, in denen Landoberflächenabfluss 2 entsteht
Grundwasserabfluss	· Hydraulische Leitfähigkeit · Porosität · Grundwasserstand	· Bestimmte Bereiche, in denen Landoberflächenabfluss 2 entsteht · Für Notfallexposition von nachrangiger Bedeutung

Hinsichtlich einer radioaktiven Kontamination durch nasse und trockene Deposition sind oberirdische Trinkwasserreservoire und Uferfiltrat-Brunnen (Versickerung von Flusswasser zur Trinkwassergewinnung) besonders gefährdet. So liegen zum Beispiel viele der Trinkwassertalsperren in Mittelgebirgen und im Oberlauf von Flusssystemen. Aus diesem Grund können sie bei einer nassen und trockenen Deposition kurzfristig und unmittelbar von einer Kontamination erreicht werden. Neben dem direkten Eintrag in solche Oberflächengewässer durch Runoff-Prozesse findet je nach der Ausgestaltung der Oberfläche auch eine Versickerung in den Boden und folglich in das Grundwasser statt. Im Fall von Versickerungsanlagen der Wasserwerke mit Uferfiltratgewinnung kann es sowohl direkt über die nasse und trockene Deposition als auch durch den Eintrag von Runoff-Prozessen in den Boden oder aus dem Fließgewässer zur Kontamination während der Aufbereitung kommen. Dieser Kontaminationspfad ist aus Sicht der Bedarfe des Notfallschutzes insofern relevant, als sich eine kurzfristige Beeinträchtigung der Trinkwasserversorgung ergeben könnte (z. B. für ca. 30 Millionen Menschen entlang des Rheins)[7]. Die Trinkwasseraufbereitung müsste im Falle eines radiologischen Notfalls messtechnisch überwacht werden.

Andere hinsichtlich einer radioaktiven trockenen und nassen Deposition zu beachtende Umweltkompartimente sind Fischereigewässer und Überschwemmungsflächen, die als Freizeit- und Erholungsflächen genutzt werden.

[7] Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR.org)

5.1.3 Bedeutung der Runoff-Prozesse am Beispiel Fukushima und Tschornobyl

Nach dem Reaktorunfall von Fukushima im März 2011 wurden erhebliche Aktivitäten von Radionukliden, hauptsächlich Radiocäsium[8] (^{134}Cs und ^{137}Cs) sowie Radioiod[9] (^{131}I), in die Atmosphäre und die hydrologischen Systeme freigesetzt (Steinhauser et al. 2014). Messungen über den Eintrag von Radionukliden in den Pazifik liegen jedoch nicht vor. Geschätzte 11 Petabecquerel (PBq) bis 16 PBq an ^{134}Cs wurden bis Juni 2011 direkt ins Meer eingeleitet (Charette et al. 2013). Darüber hinaus trugen Runoff-Prozesse aus kontaminierten Gebieten zur sekundären Einleitung von Radiocäsium in den Pazifik bei. Schätzungen zufolge gelangten in den ersten beiden Jahren nach dem Ereignis viele hundert Terabecquerel Radiocäsium über Flüsse ins Meer (Yoshikawa et al. 2014).

Die Topografie und die Bodeneigenschaften in der Region Fukushima beeinflussen die Runoff-Prozesse maßgeblich. Die bergigen Landschaften begünstigen den schnellen Abfluss von Oberflächenwasser, was zu einer raschen Verteilung der Radionuklide in Flusssystemen führt. Auch extreme Starkniederschläge, wie sie bei Taifunen vorkommen, können den Transport von Radionukliden in die Küstengebiete dominieren (Nagao et al. 2013). Gemäß einer Studie von Konoplev et al. 2023 haben die Taifune Etou im Jahr 2015 und Hagibis im Jahr 2019 zu einer erheblichen Umverteilung von Radiocäsium in Flusseinzugsgebieten und Überschwemmungsgebieten der Provinz Fukushima geführt. In vielen Fällen wurde eine natürliche Selbstdekontamination durch Runoff-Prozesse von landwirtschaftlichen Bodenflächen festgestellt.

Solche Beobachtungen stützen die allgemeinen Kenntnisse zur Mobilität der Radionuklide in der Umwelt, die stark von physikalischen und chemischen Prozessen abhängen. So wird zum Beispiel Radiocäsium sehr stark an Ton- und Huminstoffpartikeln gebunden, was einen Transport in partikulären Runoff-Prozessen begünstigt (Konoplev et al. 2023). Die Untersuchungen in der Region Fukushima haben ebenfalls nachgewiesen, dass große Mengen an Radionukliden auch in gelöster Form transportiert werden können, insbesondere bei starken Runoff-Prozessen (die Taifune Etou im Jahr 2015 und Hagibis im Jahr 2019) und niedrigem Boden-pH-Wert.

Die Beobachtungen in Fukushima belegten auch, dass Runoff-Prozesse stark vom Bewuchs und Bodentyp bzw. Bodenart sowie der Versiegelung der Geländeoberfläche abhängt (z. B. Konoplev et al. 2023). Die Provinz Fukushima ist durch große Wald- und Ackerflächen gekennzeichnet. Diese Waldböden besitzen eine dicke Humusschicht mit organischem Material. Dies beeinflusste die Bindung von Radionukliden wie ^{137}Cs stark, da sich diese an Tonminerale und organische Stoffe anlagern und somit ihre Mobilität eingeschränkt wird. Dass die dichte Vegetationsdecke und die geringe Bodenerosion den Abfluss von kontaminiertem Material verzögert, wurde auch in Tschornobyl beobachtet (Alexakhin et al. 2007).

Studien von Kato et al. (2015) zeigten, dass im Gegensatz dazu Ackerböden generell durch Pflügen und andere landwirtschaftliche Praktiken weniger stabil und somit eher anfällig für Erosion sind. Verglichen mit Waldböden haben die von Kato et al. (2015) untersuchten

---

[8] Unter Radiocäsium versteht man die Isotopen ^{134}Cs und ^{137}Cs; https://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Info/Strontium-Freisetzungen_aus_Fukushima.pdf

[9] Unter Radiojod versteht man das ^{131}Iod. Der Begriff Radiojod wird heute insbesondere in der Medizin angewendet. Das Verhalten von anionischen Radionukliden in der Umwelt mit besonderer Berücksichtigung ihrer Reaktionen im Boden: Beispiel: Radiojod - ISH-Bericht / Institut für Strahlenhygiene; https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/item/L3XM5IIXY4NP32OO2MKEYGVGT7VOMW6H; https://www.deutsches-schilddruesenzentrum.de/wissenswertes/behandlung/radiojodtherapie/

Ackerböden einen geringeren Anteil an organischer Substanz und binden daher Radionuklide weniger stark. Dadurch können Radionuklide leichter in hydrologische Systeme gelangen, wie die Untersuchungen in Fukushima bestätigt haben. Ähnlich haben auch Yoshikawa et al. (2014) in ihren Studien aus Fukushima gezeigt, dass Runoff-Prozesse von ^{137}Cs aus Ackerböden stärker sind als aus Waldböden. Sie schätzten, dass in den Jahren nach dem Reaktorunfall die Radionuklidverluste durch Runoff-Prozesse von Ackerflächen um 30 % bis 50 % höher waren als von Waldgebieten. Auch langfristig sind Unterschiede zwischen den Böden der beiden Landnutzungstypen signifikant. Während in Wäldern die Radionuklidmobilität mit der Zeit immer weiter abnimmt, da die Bindung an organische Stoffe immer weiter zunimmt, erhöht sich auf Ackerflächen das Risiko der Radionuklidmobilität durch wiederkehrende Störungen beispielsweise durch Pflügen. Unabhängig von den Bindungseigenschaften, kann der Transport von partikelgebundenen Radionukliden über starke Niederschlagsereignisse immer stattfinden.

Der genaue Anteil des durch Runoff-Prozesse in den Pazifik verfrachteten Radiocäsiums ist schwer zu quantifizieren, da er von meteorologischen und geographischen Bedingungen abhängt. Modellstudien schätzen jedoch, dass Runoff-Prozesse im ersten Jahr nach dem Unfall etwa 10 % bis 20 % der gesamten marinen Kontamination durch Fukushima ausmachen (Tsumune et al. 2013).

Taniguchi et al. (2019) haben die Runoff-Prozesse von Radiocäsium im Einzugsgebiet des Abukuma-Flusses zwischen 2011 und 2015 untersucht. Dabei haben sie festgestellt, dass mehr als 96 % des Radiocäsiums in Form von Partikeln transportiert wurde. Hauptquellen waren Reisfelder, Ackerland und städtische Gebiete, die etwa zu 85 % zu Runoff-Prozessen beitrugen, allerdings nur etwa 38 % der Fläche des Einzugsgebietes ausmachen. Weiterhin wurde eine starke zeitliche Veränderung festgestellt. Im zweiten Jahr ging der Beitrag der Runoff-Prozesse um etwa eine Größenordnung zurück. Zwischen 2011 und 2017 wurden etwa 3 % des deponierten Radiocäsiums aus dem Abukuma-Einzugsgebiet in den Pazifik verfrachtet (gemittelt etwa 0,5 % pro Jahr); etwa die Hälfte davon (1,5 % des gesamten Fallouts) bereits im Zeitraum von Juni 2011 bis März 2012.

In einer Studie von Ueda et al. (2013) wurden ähnliche Werte ermittelt. Die Mobilisierung von Radiocäsium und damit der Abtransport aus den Einzugsgebieten des Hiso- und des Wariki-Flusses im Jahr 2011 wurde auf 0,5 % bzw. 0,3 % der gesamten Menge des in den Einzugsgebieten vorliegenden Radiocäsiums geschätzt. Der Wert für den Fluss Wariki ist geringer, da das Einzugsgebiet größere Waldflächen beinhaltet. Trotzdem sind die Werte der Studien für das Abukuma-Einzugsgebiet und die beiden Einzugsgebieten des Hiso- und des Wariki-Flusses mit im Mittel etwa 0,3 % bis 0,5 % pro Jahr ähnlich. Es wird davon ausgegangen, dass der größte Teil des im Einzugsgebiet abgelagerten Radiocäsiums auf der Bodenoberfläche verbleibt.

Auch nach dem Reaktorunfall von Tschornobyl wurde in der Studie von Khanbilvardi et al. (1999) festgestellt, dass etwa ein Prozent der auf dem Boden abgelagerten Radionuklide mobilisiert und in die Flusssysteme, Seen und Reservoire transportiert wurden.

Die oben aufgeführten Studien in den Gebieten um Tschornobyl und Fukushima haben gezeigt, dass im ersten Jahr nach einem radiologischen Fallout etwa 1 % der abgelagerten Radionuklide durch Runoff-Prozesse aus dem Gebiet entfernt wurden. Je nach Wettergeschehen kann dieser Wert niedriger oder höher ausfallen. Seen und Reservoire haben in Fukushima als natürliche Senken gedient, was bei der Qualitätssicherung von Trinkwasser berücksichtigt werden muss (Konoplev et al. 2023). Weiterhin können die Radionuklide durch den weiteren Transport in Fließgewässern in Gebiete gelangen, die durch die direkte Deposition verschont wurden. Auch dieser Prozess ist eine Herausforderung für den Notfallschutz, da eine Quantifizierung nur über Simulationen durchgeführt werden kann. Die Erfahrungen aus Tschornobyl und Fukushima

zeigen somit, dass die Runoff-Prozesse ein (nicht vernachlässigbares) Risiko für die Trinkwassergewinnung darstellen und insbesondere im ersten Jahr nach dem Ereignis speziell berücksichtigt werden müssen.

5.2 Transport von Radionukliden in Oberflächengewässern

Nach der nassen oder trockenen Deposition erreicht ein Teil der Radionuklide direkt oder in Folge der Runoff-Prozesse die Oberflächengewässer: ein Fließgewässer oder ein Standgewässer[10]. Diese Oberflächengewässer sind hochkomplexe Systeme mit vielfach individuellen Besonderheiten.

In diesen Oberflächengewässern werden Radionuklide mit dem Wasser in gelöster Form und gebunden an Partikel weitertransportiert, gleichzeitig findet Sedimentation und Resuspension statt.

Für den Radionuklidtransport in Oberflächengewässern ist die Verweilzeit des Wassers, d. h. der Quotient aus Volumen (m^3) und Durchfluss ($m^3\ s^{-1}$) eine grundlegende Kenngröße. Große Seen weisen Verweilzeiten von Wochen bis Jahren auf, in Stauseen von Flüssen (Flussseen) liegt die Verweilzeit zwischen drei Tagen bis 30 Tagen, bei weniger als drei Tagen Verweilzeit handelt es sich nicht mehr um Standgewässer, sondern um Fließgewässer[11].

Die parallel stattfindenden Sedimentationsvorgänge können in Anlehnung an die Empfehlung der SSK „Radionuklide in Wasser-Schwebstoff-Sediment-Systemen und Abschätzung der Strahlenexposition“ (SSK 1988) folgendermaßen beschrieben werden: es wird vereinfachend zwischen zwei Bereichen in einem Oberflächengewässer unterschieden, Wasser und darin enthaltene Schwebstoffe sowie Sediment mit Interstitialwasser[12]. Ein Teil der Radionuklide wird gleich nach der Freisetzung an Schwebstoffe (Schwebstofffracht) angelagert. In Abhängigkeit von der Verweilzeit sowie der Masse und Größe der Schwebstoffpartikel kann angenommen werden, dass sich diese in Standgewässern in der oberen Sedimentschicht ablagern. In Fließgewässern werden Schwebstoffpartikel abhängig von der Fließgeschwindigkeit an Sedimenten abgelagert oder erodiert. Dabei spielt die standortbezogene Fließgewässermorphologie, wie Gefälle und Gerinneform eine große Rolle.

5.2.1 Transportsystem Fließgewässer

In Fließgewässern werden folgende Transportvorgänge wirksam (vgl. Abschnitt 5.1.1): die Advektion (Bewegung mit dem Hauptstrom), turbulente und molekulare Diffusion (Durchmischung aufgrund der Turbulenz bzw. Vorgänge aufgrund der Konzentrationsunterschiede auf der molekularen Ebene) sowie longitudinale und transversale Dispersion (Geschwindigkeitsunterschiede über das Längs- und Querprofil). Der Transport von Feststoffen mit den angelagerten Radionukliden erfolgt je nach Partikelgröße und -gewicht in Form von Schweb- bzw. Suspensionsfracht oder Geschiebefracht.

---

10 Synonymer Begriff: Stillgewässer

11 LAWA-AO. Rahmenkonzeption Monitoring, Teil B, Bewertungsgrundlagen und Methodenbeschreibungen, Arbeitspapier I, Gewässertypen und Referenzbedingungen (https://www.lawa.de/documents/lawa-rakon-teil-b-i-gewtyp-ref-210806-final-barrierefrei_1689850884.pdf)

12 Die hyporheische Zone – hyporheisches Interstitial – ist der Bereich, in dem sich Oberflächenwasser in das Bach- bzw. Flussbett hinein und aus diesem heraus bewegt und gelöste Gase, Nähr- und Schadstoffe, Mikroorganismen und Partikel mit sich führt.

Von Bedeutung für die Notfallbetrachtung ist vor allem die Advektion und die longitudinale Dispersion, welche je nach den Strömungsverhältnissen unterschiedlich zum schnellen Weitertransport der gelösten und an Schwebstoffen angelagerten Radionuklide flussabwärts beitragen können.

5.2.2 Transportsystem Standgewässer

Für Runoff-Prozesse sind vor allem große Standgewässer (Seen, Teiche, Stauseen) von Bedeutung.

In großen Standgewässern beruht der Stofftransport zum einen auf der Advektion durch die Durchströmung (ggf. entlang von präferierten Zonen) zum anderen, bei hinreichend tiefen Gewässern, auch auf vertikalen Austauschprozessen (Zirkulation), zwischen den durch Temperaturschichtung getrennten Bereichen.

Standgewässer werden dann als tiefer See bezeichnet, wenn durch die Erwärmung der Oberfläche, die dem Jahreszyklus der Solarstrahlung folgt, saisonal regelmäßig unterschiedliche Temperaturgefälle mit charakteristischen, stabilen thermischen Schichtungen ausgebildet werden (Maniak 2016). Dieser Umstand, der auf die Dichteanomalie des Wassers (größte Dichte bei etwa 4 °C) zurückzuführen ist, beeinflusst wesentlich das windinduzierte Mischungsverhalten des tiefen Sees, so dass hier zwischen amiktisch (keine Durchmischung), meromiktisch (Durchmischung bis zu einer bestimmten Tiefe) und holmiktisch (Durchmischung bis zum Grund) unterschieden wird. Bei stabiler thermischer Schichtung in den Sommermonaten kann bei tiefen Seen in eine warme obere Deckschicht (Epilimnion), eine darunter liegende Sprungschicht (Metalimnion) mit einem Temperaturgradienten größer 1 °C m^{-1} und eine unterste Schicht mit 4 °C kaltem Tiefenwasser (Hypolimnion) unterschieden werden (Fohrer et al. 2016). Unter diesen Bedingungen findet zwischen Epilimnion und Hypolimnion kaum vertikaler Austausch statt, wobei letzteres nur durch interne Wellen und deren Ausgleichsströmungen in Bewegung versetzt wird. In den gemäßigten Breiten zirkulieren tiefe Standgewässer ein- bis zweimal im Jahr, abhängig von den lokalen klimatischen Bedingungen und dem Volumen des Wasserkörpers. Die Voraussetzung für die Zirkulation des gesamten Wasserkörpers ist die Homothermie, d. h. das Fehlen eines Dichtegradienten im Vertikalprofil. Idealtypisch findet die Vollzirkulation in den mittleren Breiten somit meist im Frühjahr und im Herbst statt, während sich im Sommer und im Winter aufgrund eines Sprungs in der vertikalen Temperaturverteilung eine stabile Schichtung einstellt.

Durch Sedimentation gelangen die Radionuklide auch ohne den vertikalen Wassermassenaustausch in die darunterliegenden Wasserschichten. Der dominierende Prozess ist dann die Sedimentation durch Anlagerung von Radionukliden beispielsweise an Tonminerale gefolgt von Fällungsvorgängen. Die Sedimentations- und Vermischungsvorgänge im Standgewässer laufen in der Regel deutlich langsamer ab, auch aufgrund der Temperaturschichtungen und der ausgeprägten korngrößenspezifischen Selektion des hohen Anteils an feinen suspendierten Partikeln. Für die Notfallsituation sind daher die anfängliche direkte Kontamination der Oberfläche nach der nassen und trockenen Deposition und im Nachhinein der direkte Eintrag aus den Runoff-Prozessen im nahen Uferbereich relevant.

Die Transportvorgänge und die Sedimentation müssen generell immer standort- und jahreszeitbezogen sowie je nach Pegelstand betrachtet werden. Modelltechnisch ist es insbesondere im Fall von großen und tiefen Seen notwendig, eine spezifische Modellbetrachtung durchzuführen.

5.2.3 Relevante Abschnitte des deutschen Gewässernetzes und der oberflächigen Wasserreservoire

Grundsätzlich sind alle Oberflächengewässer in Deutschland durch trockene und nasse Depositionsprozesse oder direkte Einträge nach Freisetzungen von Radionukliden potenziell gefährdet. Ob im Ereignisfall ganze Flussgebietseinheiten gemäß der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)[13] oder nur Teileinzugsgebiete betrachtet werden müssen, hängt von der Fallkonstellation ab und ist vom Radiologischen Lagezentrum des Bundes zu entscheiden. Dazu sind die Informationen zur Fläche der Bodenkontamination mit den Informationen zu den Runoff-Prozessen und den ggf. betroffenen sensiblen Strukturen (insbesondere Trinkwassergewinnung) zusammenzuführen. Eine Beschreibung und Bewertung der dazu verfügbaren Modelle enthalten die Kapitel 7 und 8.

Da Einzugsgebiete von den Staatsgrenzen abweichen, können Ereignisse im Ausland zu radiologisch relevanten Situationen in Deutschland führen. Es können aber auch Ereignisse in Deutschland zu Kontaminationen im Ausland führen. Eine Zusammenstellung der Flussgebietseinheiten (gelistet nach der Größe der Einzugsgebiete) und deren Bezüge zu ausländischen Staatsgebieten enthält Tabelle 5-3. In die Tabelle aufgenommen wurden Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren, die zum Zeitpunkt der Erarbeitung dieser Empfehlung im aktiven Betrieb waren.

Tabelle 5-3: Flussgebietseinheiten gemäß der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und deren Bezüge zu ausländischen Staatsgebieten sowie im Betrieb befindliche Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren (Stand Juli 2025)

Flussgebietseinheit	**Besonderheiten**
Donau[14] Einzugsgebiet 801 463 km² davon in Deutschland: 56 184 km²	Deutsches Einzugsgebiet im Oberlauf mit Zuflüssen aus dem Ausland über Inn (größeres Einzugsgebiet in Österreich), Iller und Lech (kleinere Einzugsgebiete in Österreich). Ab Passau Abfluss nach Österreich, Slowakei, Ungarn, Kroatien, Serbien, Bulgarien, Rumänien, Republik Moldau und die Ukraine Kerntechnische Anlage Forschungsreaktor München II; Keine Kernkraftwerte und Forschungsreaktoren im ausländischen Einzugsgebiet.
Rhein[15] Einzugsgebiet 191 749 km² (inkl. Küstengewässer) Davon in Deutschland: 105 751 km²	Deutsches Einzugsgebiet im Mittellauf (Hochrhein bis Niederrhein). Hauptzufluss aus der Schweiz. Größere Zuflüsse aus dem Ausland über Mosel in Frankreich. Nordwestlich von Emmerich und Kleve erreicht der Rhein die Niederlande. Kernkraftwerke Schweiz: in Betrieb: Beznau (2 Blöcke), Gösgen, Leibstadt. Kernkraftwerke Frankreich: Cattenom (4 Blöcke), Forschungsreaktor in Mainz.

[13] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20141120&from=DE

[14] International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR): The Danube River Basin. Facts and Figures. (https://www.icpdr.org/resources/danube-basin-facts-figures)

[15] Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR): International koordinierter Bewirtschaftungsplan 2022 – 2027 für die internationale Flussgebietseinheit Rhein (Teil A = übergeordneter Teil) März 2022. KSR-CIPR-ICBR 2022, https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/BWP-HWRMP/DE/bwp_De_BWP_2021.pdf

Flussgebietseinheit	**Besonderheiten**
Elbe[16] Einzugsgebiet 148 268 km², davon in Deutschland: 97 175 km².	Deutsches Einzugsgebiet im Mittellauf. Hauptzufluss in Tschechien (Einzugsgebiet ca. 50 000 km²), kleine Einzugsgebiete in Österreich und Polen. Kernkraftwerke: Temelín, Tschechische Republik (2 Blöcke).
Maas[17] Einzugsgebiet 34 349 km² Davon in Deutschland: 3 976 km²	Zwei deutsche Einzugsgebiete (Maas Nord mit Hauptgewässern Schwalm und Niers; Maas Süd mit Hauptgewässer Rur). Beide Einzugsgebiete entwässern in niederländisches Staatsgebiet.
Ems[18] Einzugsgebiet 17 800 km² (bis Küsten-Basislinie + eine Seemeile) Davon in Deutschland: 15 008 km²	Größter Teil des Einzugsgebietes in Deutschland. Mündung in Nordsee im Grenzbereich mit Niederlanden.
Weser[19] Einzugsgebiet 49 000 km² (vollständig in Deutschland)	Gesamtes Einzugsgebiet in Deutschland.
Oder[20] Einzugsgebiet 124 115 km² Davon in Deutschland: 9 705 km²	Einzugsgebiet größtenteils in Polen. Unterlauf Grenzfluss zu Polen. Mündung über Oderhaff in die Ostsee.
Eider[21] Einzugsgebiet 9 337 km², davon 4 730 km² Landfläche inklusive Fließgewässer und Seen sowie 4 607 km² Küsten- und Hoheitsgewässerfläche	Gesamtes Einzugsgebiet in Deutschland (Schleswig-Holstein). Neben der Eider selbst sind in der Flussgebietseinheit weitere Einzugsgebiete von Fließgewässern, die von Schleswig-Holsteinischem Gebiet aus in die Nordsee entwässern, zusammengefasst.
Schlei/Trave[22] Einzugsgebiet ca. 6 184 km² (ohne Küstengewässer)	Gesamtes Einzugsgebiet in Deutschland (Schleswig-Holstein). Besteht aus fünf kleineren Planungseinheiten (Schlei, Kossau, Schwentine, Trave, Stepenitz).

[16] https://www.wasserblick.net/servlet/is/35008/Internat_A-Bericht2005_Elbe.pdf?command=downloadContent&filename=Internat_A-Bericht2005_Elbe.pdf

[17] https://www.meuse-maas.be/CIM/media/PGRI-dec-2021-en-anglais/Roof_Report_Mregie_21_1def_en.pdf

[18] https://www.ems-eems.de/fileadmin/co_theme/Default/Media/pdfs/2022_03_22_int_BWP_Ems_DE.pdf

[19] https://www.fgg-weser.de/die-weser-und-ihr-ezg

[20] https://www.wasserblick.net/servlet/is/156167/BP_FGE_Oder.pdf

[21] https://www.schleswig-holstein.de/mm/downloads/Fachinhalte/Wasserrahmenrichtlinie/20201210_ENTWURF_BP_Eider_BF.pdf

[22] https://www.wrrl-mv.de/static/WRRL/Dateien/Dokumente/WRRL/BMU/bwz3/SchleiTrave/ST_BZR3_BP_Text_und_Anlagen.pdf

Flussgebietseinheit	Besonderheiten
Warnow/Peene Einzugsgebiet 13 452 km² (Landfläche)	Gesamtes Einzugsgebiet in Deutschland. Umfasst mehrere Planungseinheiten (Warnow, Peene, Küstengebiet Ost, Küstengebiet West).

Die für eine Modellierung von Transportprozessen benötigten hydrologischen Daten zu den Gewässern sind durch die Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)[23] für alle Einzugsgebiete grundsätzlich verfügbar.

6 Derzeit in Deutschland vorhandene Modellansätze

In Deutschland stehen derzeit zwei Modellansätze zur Verfügung, welche sich mit der Migration der Radionuklide in der Umwelt bzw. in den Oberflächengewässern befassen: das RODOS-System des BfS und das Modell QSim der BfG. Diese Modellansätze wurden in der Vergangenheit im Rahmen unterschiedlicher Zielsetzungen entwickelt und sind daher konzeptionell unterschiedlich aufgebaut. Im Folgenden werden die vorhandenen Modellansätze beschrieben. Die Bewertung mit Blick auf die Anforderungen des Notfallschutzes erfolgt zusammen mit der Bewertung der recherchierten international verfügbaren Modelle (Beschreibung siehe Kapitel 7) im Kapitel 8.

6.1 RODOS-System

Das RODOS-System enthält eine komplexe Modellkette, die Vorgänge in verschiedenen aquatischen Medien beschreibt. Zurzeit sind die folgenden Modelle als Module im System implementiert:

- RETRACE zur Beschreibung des Oberflächenabflusses (Zheleznyak et al. 2010),
- RIVTOX zur Beschreibung des Transports in Flusssystemen, eindimensionales Modell (Zheleznyak et al. 1993),
- COASTOX zur Beschreibung des Transports und der Ausbreitung in Flussabschnitten oder Reservoiren, zweidimensionales Modell (Zheleznyak et al. 1992),
- THREETOX zur Beschreibung des Transports in komplexen Geometrien, tiefen Seen und Küstengewässern, dreidimensionales Modell (Maderich et al. 2008, Maderich et al. 2016),
- POSEIDON zur Modellierung der Nahrungsketten in Seen und im Ozean (Bezhenar et al. 2016a),
- MOIRA zur Beschreibung des langfristigen Verhaltens von Radionukliden in der aquatischen Umwelt (Gallego et al. 2016).

Alle Modelle beschreiben das Verhalten von Radionukliden gelöst im Wasser, angelagert an Partikel und im Sediment. Der Transfer zwischen diesen Kompartimenten (Wasser, Schwebstoffe und Sediment) wird über empirische Transferfaktoren modelliert (Abbildung 6-1). Allerdings wird im Abflussmodell RETRACE keine Trennung der einzelnen Kompartimente durchgeführt. Bei der Modellbildung sollte ebenfalls berücksichtigt werden, dass der Oberflächenabfluss typischerweise der wichtigste Beitrag für den Eintrag an Radionukliden – neben

[23] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20141120&from=DE

einer direkten Einleitung – in Fließgewässer darstellt. Deshalb sollten Oberflächenabfluss und Transport in Fließgewässern immer zusammen betrachtet werden.

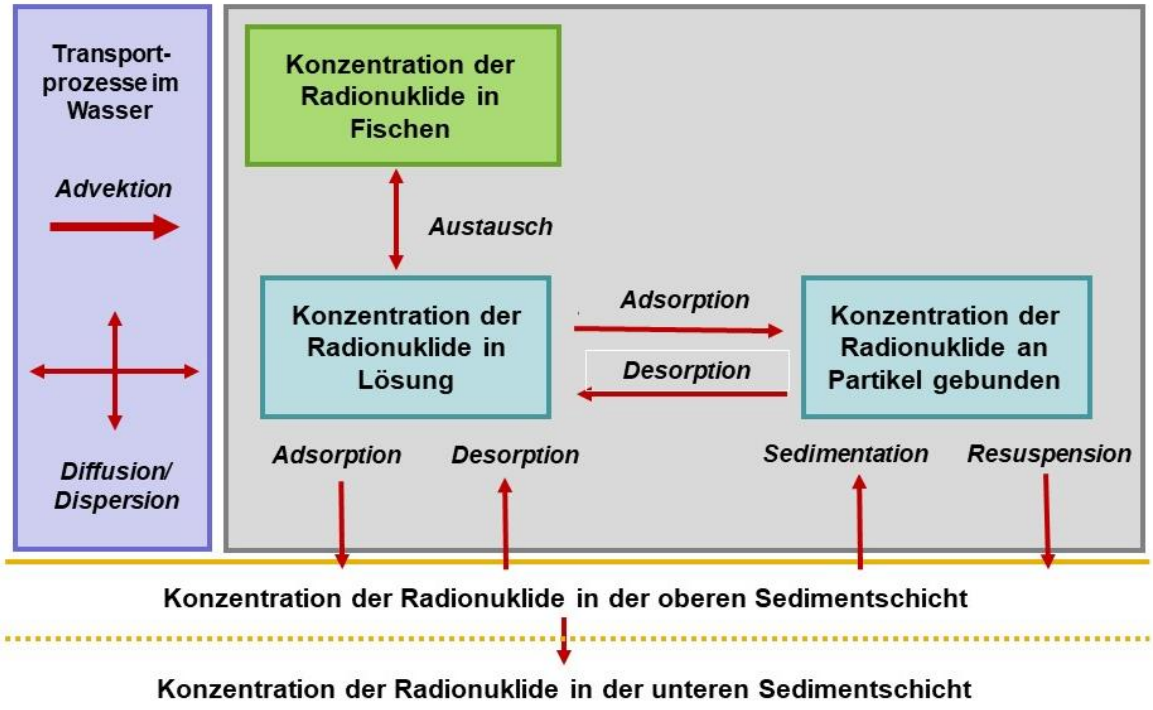

Abbildung 6-1: Transportprozesse, die in allen hydrologischen RODOS-Modulen – bis auf RETRACE – genutzt werden

Im Folgenden werden die verschiedenen Module des RODOS-Systems kurz beschrieben. Zu erwähnen ist ebenfalls, dass alle Module eine flächenhafte Kontamination verarbeiten können; diese kann durch direkte Deposition auf die Oberfläche oder durch den Oberflächenabfluss simuliert werden.

6.1.1 RETRACE

Die Oberflächenkontamination wird durch die nasse und trockene Deposition der atmosphärischen Ausbreitungsmodelle im RODOS-System modelliert. RETRACE selbst ist ein semi-verteiltes Modell, das allerdings die Transportprozesse mit einer einfachen Transferfunktion (Aktivitätskonzentration auf der Oberfläche multipliziert mit einem empirisch gewonnen Transferfaktor) beschreibt. Semi-verteilt bedeutet hierbei, dass RETRACE Informationen des Geographischen Informationssystems (GIS) nutzt, um ein Höhenprofil des Einzugsgebietes zu erstellen, die Oberfläche also in Zellen/Kacheln aufteilt. Der Transport der Radionuklide über den Wasserabfluss einer Zelle erfolgt aber eindimensional in die jeweils tieferliegende Zelle. Dieser Wasserabfluss ist linear mit der Höhe des Niederschlags gekoppelt. Weiterhin erfolgt der Wasserabfluss selbst instantan und ist nicht an die Entfernung zu dem Fließgewässer gekoppelt. Das bedeutet, dass der Eintrag in das Fließgewässer immer in dem aktuellen Simulationszeitschritt erfolgt, der Wasserabfluss selbst also nicht modelliert wird. Diese Vereinfachung stellt eine eher konservative Annahme dar und ist für den Notfallschutz anwendbar. Durch den Runoff von Wasser, sollte auch der Pegel des Flusssystems erhöht werden. Aber auch dies wird in RETRACE nicht berücksichtigt. Es kommt also nur zu einem Eintrag von Radionukliden, die Erhöhung des Wasserstandes selbst wird aber nicht berücksichtigt. Dies ist

ein Resultat der vereinfachten Transfermodellierung. Diese Annahme ist für größere Flüsse gut anwendbar, für kleine Flüsse aber eher nicht[24].

Der Wasserabfluss enthält eine gewisse Menge an Radionukliden in gelöster und partikulärer Form – bestimmt durch die Transferfunktion. Die empirisch gewonnene Transferfunktion, die aus Daten in der Umgebung von Tschornobyl ermittelt wurde, ist Teil des Modells und enthält zwei Exponentialfunktionen, die einerseits einen schnellen (Tage bis Wochen) und andererseits einen langsamen (Wochen bis Jahre) Wassertransfer vom Boden in den Abfluss beschreiben.

Eingaben für RETRACE

- Kontamination vom RODOS-Ausbreitungsmodell,
- Flussnetz im ESRI-Shape-Format (*.shp),
- Berechnungspunkte des Flussmodells im ESRI Shape-Format (*.shp), die auf diesem Netz liegen,
- Einzugsgebiet im ESRI-Shape-Format (*.shp),
- Rauigkeit der Oberfläche der einzelnen Zellen im Einzugsgebiet,
- Zeitreihen der Niederschlagsmenge, Tagesdurchschnitt und langfristig monatliche Durchschnittswerte.

6.1.2 RIVTOX

Die aktuelle RIVTOX-Version beinhaltet eine eindimensionale Lösung für die verschiedenen Transport- und Austauschprozesse wie die der Flussströmung, des Schwebstofftransports und des Radionuklidtransports in gelöster Form sowie des Transports von Radionukliden, die an Schwebstoffen adsorbiert werden. Weiterhin tauschen sich die an Schwebstoffe gebundenen und in Wasser gelösten Radionuklide mit dem Sediment aus. Das Flusshydraulikmodell basiert auf der numerischen Lösung der vollständigen Version der Saint-Venant-Strömungsgleichung (Cunge et al. 1980). Der numerische Algorithmus von RIVTOX basiert auf der Methode für die Berechnungen von verzweigten Flussnetzwerken, die erfolgreich im hydraulischen Code CHARIMA (Holly et al. 1990) getestet wurde.

Das Flusssystem wird über Knoten definiert (Abbildung 6-2). Ein Knoten (Node) ist eine beliebige Kreuzung von zwei oder mehr Verbindungen (Link) oder ein Grenzpunkt. Eine Verbindung ist ein beliebiger Fließweg, der an einem Knoten beginnt und an einem anderen endet. Ein Punkt ist eine beliebige Stelle entlang einer Verbindung, an der der Querschnitt bekannt ist und der hydraulische Parameter zugeordnet ist. Eine Strecke ist ein beliebiger Kanalabschnitt zwischen zwei Punkten. Jede Verbindung hat immer mindestens zwei Punkte, von denen einer mit dem Knoten an jedem Ende verbunden ist.

[24] Die Größen der Flüsse werden anhand der Einzugsgebietsgrößen: Bach (10 km² bis 100 km²), kleiner Fluss (100 km² bis 1 000 km²), großer Fluss (1 000 km² bis 10 000 km²) und Strom (> 10 000 km²) kategorisiert.

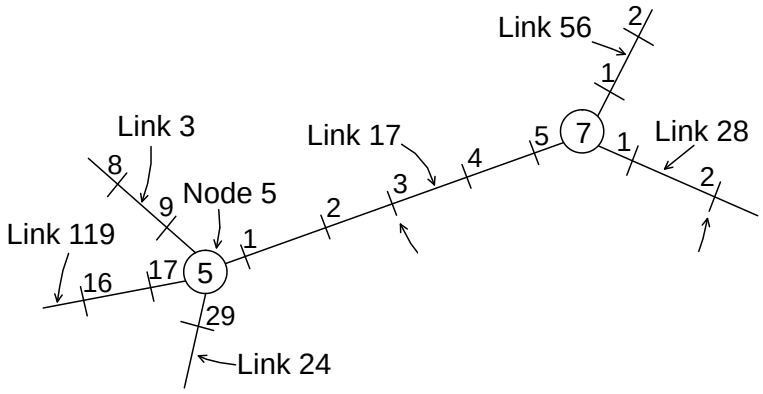

Abbildung 6-2: *Schematische Definition eines Flusssystems durch Knoten (Kivva et al. 2020)*

Daten, die benötigt werden, sind:

- Beschreibung der einzelnen Flussabschnitte:
  - Verbindungsanfang, Verbindungsende, Punktanfang und Punktende.
- Werte der wichtigsten Variablen an allen Punkten:
  - Abflussmenge,
  - Höhe des Talwegs[25] (zentriert für einen Abschnitt),
  - Querschnitt mit Wassertiefe,
  - Tiefe und Eigenschaft der oberen Sedimentschicht, die im Austausch mit dem Wasser steht,
  - Eigenschaften der unteren Sedimentschicht,
  - Partikeleigenschaften.
- Randbedingung kann Wassertiefe oder Abflussmenge sein.

6.1.3 COASTOX

COASTOX ist ein zweidimensionales, tiefengemitteltes Strömungsmodell auf der Grundlage von 2D-Flachwassergleichungen (Zheleznyak et al. 1992). Es umfasst Teilmodelle für die Hydrodynamik im Flachwasser, den Sedimenttransport, die sich verändernde Bodenmorphologie und den Radionuklidtransport. COASTOX kann für die Modellierung der Radionuklid-dynamik in flachen Oberflächengewässern wie Flüssen und Flussauen, flachen Stauseen und Seen, sowie Küstengebieten der Meere verwendet werden.

COASTOX benötigt ähnliche Eingabedaten wie RIVTOX, zusätzlich auch eine detaillierte Beschreibung des Rechengebiets (Höhenprofil und Uferlinie). Dabei verwendet COASTOX ein unstrukturiertes Dreiecksgitter für die Diskretisierung des Höhenprofils innerhalb des gewählten Modellgebiets (Abbildung 6-3).

[25] Talweg bezeichnet die Verbindungslinie der tiefsten Punkte aller Querprofile in der Längsrichtung eines Flusses.

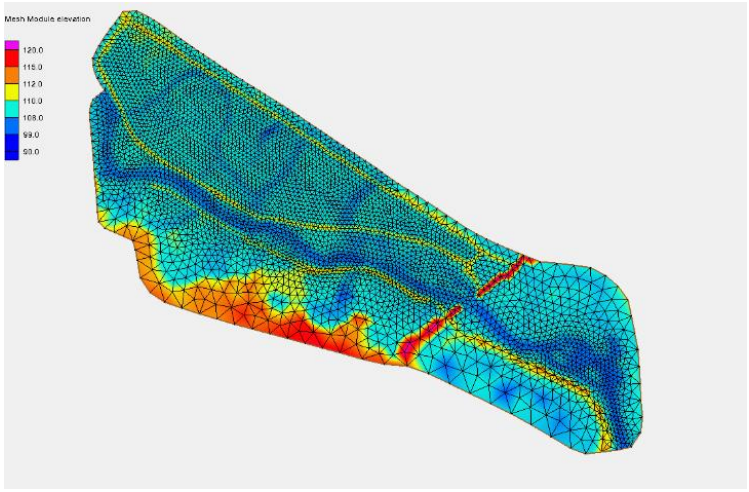

Abbildung 6-3: *Zusammengefasste Karten der Boden- und Oberflächenhöhe eines Pripyat-Teilgebietes flussaufwärts des Kernkraftwerk Tschornobyl; die Skala beschreibt die Höhenstufen in m (Kivva et al. 2021)*

6.1.4 THREETOX

THREETOX ist das komplexeste Modell im RODOS-System und geeignet für tiefe Seen, Küstengebiete oder komplexe Geometrien. Das dreidimensionale Modellsystem THREETOX wurde für die Simulation der Ausbreitung von Radionukliden und anderen Schadstoffen auf lokalen (einige 10 km) und regionalen Skalen (einige 100 km) entwickelt (Margvelashvily et al. 1997; Maderich et al. 2008; Johannessen et al. 2010). Das System umfasst zwei Teilmodelle, die Hydrodynamik und die Eisdynamik. In beiden Teilbereichen werden thermodynamische Prozesse sowie der Sediment- und Radionuklidtransport modelliert. Die prognostischen Variablen des hydrodynamischen Teilmodells sind die drei Komponenten des Geschwindigkeitsfeldes, Temperatur, Salzgehalt und Oberflächenniveau, die kinetische Energie der Turbulenz und die Dissipationsrate. Der Transport, die Deposition und die Resuspension verschiedener Sedimentfraktionen werden mit dem Teilmodell für den Sedimenttransport berechnet. Die Konzentration der in Wasser gelösten oder an Sedimente und am Boden angelagerten Radionukliden, wird durch das Teilmodell Radionuklidtransport vorhergesagt.

THREETOX benötigt die Information über die Strömung als Randbedingung für die Modellierung. Hierbei kann jedes Ozean-Modell verwendet werden. Weiterhin müssen die folgenden Informationen/Daten bereitgestellt werden:

- Topografie/Tiefenprofil,
- Wetterdaten wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur,
- Hydrologische Parameter,
- Eis,
- Sedimentcharakteristika,
- Randbedingungen aus dem Ozeanströmungsmodell.

6.1.5 POSEIDON

POSEIDON (Lepicard et al. 2004) wurde entwickelt, um die radiologischen Folgen diskreter oder kontinuierlicher Freisetzungen von Radionukliden in europäische Gewässer zu bewerten (Abbildung 6-4). Die Software basiert auf einem Box-Modellierungsansatz und erlaubt dadurch

die Berechnungen auf großer räumlicher und zeitlicher Skala (Bezhenar et al. 2016b). Die Ausbreitung von Radionukliden findet über benachbarte Boxen und über die vertikale Wassersäule statt, wobei die folgenden Ausbreitungsmechanismen berücksichtigt werden:

- horizontaler und vertikaler Wasseraustausch zwischen den Boxen – es sind drei Schichten implementiert,
- Adsorption an Schwebstoffen,
- Desorption der Aktivität in Schwebstoffen im Gleichgewicht mit der Aktivität in der Wasserphase,
- Austausch von Radionukliden zwischen Wassersäule und Sediment durch molekulare Diffusion und Bioturbationsphänomene.

Basisdaten für die Benutzung von POSEIDON sind:

- Boxstruktur für das Rechengebiet (Volumen und Größe der Boxen),
- Transfer zwischen Boxen basierend auf Strömungsdaten von mindestens fünf Jahren, die von der anwendenden Person bei den verantwortlichen Institutionen beschafft werden müssen,
- Konzentration von Schwebstoffen, Sedimentationsraten, Bioturbations- und Diffusionskoeffizienten in Bodensedimenten.

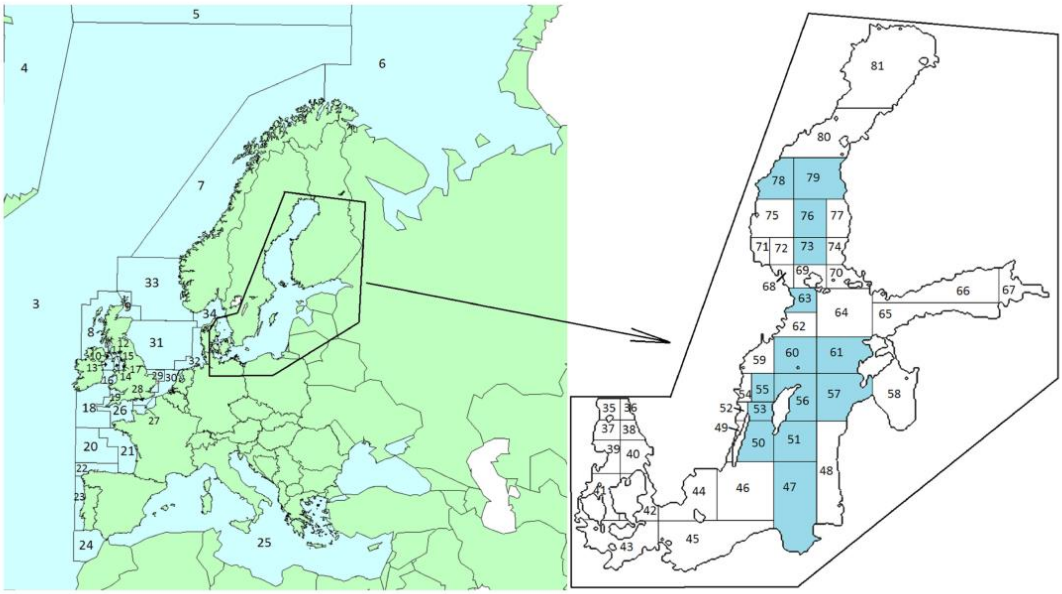

Abbildung 6-4: Boxstruktur für die Nord- und Ostsee (siehe Bezhenar et al. 2016b)

POSEIDON ist das einzige hydrologische Modell im RODOS-System, das auch den Transfer der Radionuklide in der Nahrungskette beschreibt. Hierzu wird das dynamische Aufnahmemodell BURN (Biological Uptake model of Radionuclides) (Heling et al. 2002) benutzt. Dieses Modell berücksichtigt die Struktur der Nahrungskette und die trophische Ebene[26] der Organismen. Dieser Ansatz unterscheidet sich stark vom Ansatz des biologischen Konzentrationsfaktors, der von einem Gleichgewicht zwischen der Radionuklidkonzentration im Wasser und

[26] Die trophische Ebene ist die Kennzeichnung für eine bestimmte Ebene (Niveau) oder Stufe einer linearen Nahrungskette im Ökosystem.

in Biota ausgeht. Die unfallbedingten Freisetzungen sind jedoch durch kurzfristige Veränderungen mit starken räumlichen Gradienten in der Konzentration der Umweltradioaktivität gekennzeichnet. Unter solchen Bedingungen ist die Anwendung eines dynamischen Aufnahmemodells erforderlich.

Das dynamische Aufnahmemodell BURN ist im Grunde ein prozessgesteuertes Aufnahmemodell, das eine Vielzahl von Meeresorganismen berücksichtigt. Das Modell ist mit einer Salzgehaltsabhängigkeit für mehrere chemische Elemente (darunter auch Cäsium und Strontium) kombiniert, um eine gute Beschreibung der Nuklidaufnahme aus dem Meerwasser in das Gewebe zu ermöglichen. Das dynamische Nahrungsnetzmodell bietet standardmäßig eine einzelne Box für jeden Organismus. Die zugrundeliegende Annahme ist, dass die Radionuklidaufnahme gewebespezifisch ist. Gewebespezifische Daten für Fische (Yankovich et al. 2010) zeigen jedoch, dass Radionuklide in verschiedenen Gewebeteilen der Fischkörper vorhanden sein können. Aus diesem Grund gibt es einen Gewichtungsansatz, der die Aufnahme chemischer Elemente (z. B. Schwermetalle und Radionuklide) in mehreren Geweben, z. B. Organen und Fischfleisch, berücksichtigt. Es ist wichtig zu betonen, dass das BURN-Modell generisch und prinzipiell für alle Radionuklide geeignet ist. Da sich die meisten experimentellen Studien jedoch auf eine begrenzte Anzahl von Radionukliden konzentrieren, ist das Modell für Cäsium- und Strontium-Isotope am besten anwendbar. Im Rahmen der Arbeiten zu Fukushima wurde das Nahrungskettenmodell weiter verbessert (Bezhenar et al. 2016b).

6.1.6 MOIRA

MOIRA („A Model-based computerised system for management support to identify optimal remedial strategies for restoring radionuclide contaminated aquatic ecosystem and drainage areas“) ist ein Entscheidungshilfesystem, das für mittel- und langfristige (Monate bis Jahre oder Jahrzehnte) Managementfragen entwickelt wurde (Gallego et al. 2016). Die Hauptkomponenten von MOIRA sind validierte Modelle zur Vorhersage des langfristigen Verhaltens der abgelagerten Radionuklide in Seen, Flüssen und Einzugsgebieten, einschließlich Simulationen der Auswirkungen ausgewählter Gegenmaßnahmen zur Verringerung der Kontaminationswerte der Oberflächengewässer. Es dient der zuverlässigen Bewertung der langfristigen Entwicklung der radiologischen Situation und möglicher alternativer Bewirtschaftungsstrategien, einschließlich einer rationalen und umfassenden Bewertung ihrer sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen.

MOIRA besteht aus insgesamt drei Komponenten:

- MOIRA-Lake zur Beschreibung des Verhaltens von Radionukliden in Seen,
- MOIRA-River zur Beschreibung des Verhaltens von Radionukliden in Flüssen und Einzugsgebieten,
- multikriterielles Bewertungsmodell.

MOIRA-Lake besteht aus mehreren Untermodellen, die den Radionuklidtransport aus dem Einzugsgebiet in den See und die anorganischen Prozesse, die in diesem See stattfinden, beschreiben. Weiterhin werden im Modell die Änderung der Temperatur im See, der Transfer der Radionuklide in der Nahrungskette sowie der Zu- und Abfluss beschrieben und letztendlich die Auswirkungen von Gegenmaßnahmen simuliert.

MOIRA-River beschreibt das Verhalten der Radionuklide in Flüssen über ein Kompartimentsystem. Ein Fluss kann in bis zu 20 Kompartimente zerlegt werden und diese interagieren mit dem Einzugsgebiet über die Ränder der einzelnen Boxen. Startpunkt der Simulation ist die flächenhafte Kontamination über die atmosphärische Ausbreitung. Wie in MOIRA-Lake wird

die langfristige Entwicklung der Kontamination sowie potenzielle Gegenmaßnahmen modelliert. MOIRA-River beseht aus den folgenden Modulen:

- **HydroAV** (Hydrologisches Modul zur Berechnung variabler Volumina): Untermodell zur Simulation des zeitlichen Verhaltens der hydrologischen und morphologischen Parameter eines komplexen Oberflächengewässers.
- **CAT** (Einzugsgebietsmodell): Untermodell, das die Migration von Schadstoffen aus dem Einzugsgebiet in das aquatische System simuliert.
- **MIGRA** (Migration durch abiotische Komponenten): Untermodell, das die Migration eines Schadstoffs durch die abiotischen Komponenten eines Oberflächengewässersystems simuliert.
- **BIOT** (Migration des Schadstoffs von den abiotischen zu den biotischen Komponenten): Untermodell, das die Migration eines Schadstoffs von den abiotischen Komponenten eines aquatischen Systems zu den Fischarten simuliert.

Das multikriterielle Teilsystem von MOIRA wird nicht weiter beschrieben, da es für die hydrologische Modellkette keine Rolle spielt.

6.2 Modell QSim der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Neben dem RODOS-System wird hier die Entwicklung des Modells QSim der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) erwähnt. Dieses Modell basiert auf einem eindimensionalen Ansatz und simuliert den Transport sowie die Verteilung der Radionuklide in gelöster Form im Flusslauf nach unfallbedingten Ableitungen aus den Kernkraftwerken unter verschiedenen Abflussregimen (Hoch-, Mittel-, Niedrigwasser). Der Fokus liegt auf den deutschen Bundeswasserstraßen (Mosel, Elbe und Rhein), an denen im grenznahen Ausland aktive Kernkraftwerke vorhanden sind, allerdings existieren auch darüber hinaus Modellbausteine weiterer Flüsse (z. B. Weser).

Im Rahmen eines gesetzlichen Auftrags gemäß § 161 StrlSchG nimmt die BfG mehrere Aufgaben der Überwachung der Umweltradioaktivität in Binnengewässern wahr. Hierfür betreibt sie ein deutschlandweites Messnetz mit 40 Stationen, das kontinuierlich aktuelle Messwerte an ein Frühwarnsystem zur Erkennung möglicher Einträge radioaktiver Stoffe in die Bundeswasserstraßen übermittelt. Als Leitstelle des Bundes und Teil des IMIS ist die BfG zudem für die Prüfung der Messdaten der Landesmessstellen außerhalb von Bundeswasserstraßen (Fließgewässern und Seen/Talsperren) zuständig. Neben den Laboranalysen an Wasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben und der Qualitätssicherung der Analytik gehören auch die bewertete Zusammenfassung der Messwerte sowie die Erstellung von Ausbreitungsprognosen zu ihren Aufgaben.

Das Modell QSim wurde ursprünglich als ein Instrument zur Simulation und Prognose des Stoffhaushalts und der Planktondynamik in Fließgewässern entwickelt. Im Vordergrund steht dabei die Ermittlung und Beurteilung der Auswirkungen wasserbaulicher Maßnahmen auf die Wasserbeschaffenheit von Bundeswasserstraßen unter Berücksichtigung von Klimawandelaspekten. QSim basiert auf einem deterministischen Ansatz und ist dabei modular aufgebaut. Die Zustandsgrößen werden gleichverteilt über den gesamten Fließgewässerquerschnitt betrachtet, wobei die Identifizierung und Parametrisierung der Funktionen auf wissenschaftlich beschriebenen Modellansätzen beruhen. Sowohl frei fließende als auch staugeregelte Oberflächengewässerabschnitte sowie Verzweigungen, Fließumkehrungen und Buhnen können im Modell abgebildet werden. Neben den ökologischen Modellbausteinen verfügt QSim auch über ein Modul zur Berechnung des gelösten Stofftransportes, welches für den Radionuklidtransport

verwendet wird. Betrachtet werden punktuelle Einträge radioaktiver Stoffe mit einem eindimensionalen Ansatz; es wird angenommen, dass die Zustandsgrößen im gesamten Querschnitt gleichverteilt sind. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Flussmorphologie wird in dem offline gekoppelten hydraulischen Modell HYDRAX der Wasserabfluss berechnet. Die räumliche und zeitliche Auflösung des Modells ist dabei frei wählbar. Für die Zwecke einer schnellen Prognose im Ereignisfall steht aber üblicherweise alle 500 m ein Stundenwert zur Verfügung. Mit Hilfe der Advektions-Dispersions-Gleichung werden die Konzentrationserhöhungen und -durchgänge der radioaktiven Stoffe nach einem punktuellen Eintrag in QSim simuliert. Niederschlagseinträge mit Oberflächenabfluss, Sorptions- und Sedimentationsprozesse werden dabei derzeit nicht betrachtet. Diese werden aber im Rahmen von Modellerweiterungen langfristig angestrebt und als mehrjährige Aufgabe geplant.

Um die Zuverlässigkeit von QSim zu gewährleisten, hat die BfG in den vergangenen Jahren sehr umfangreiche Dispersionsversuche an verschiedenen Bundeswasserstraßen durchgeführt. Dabei werden anhand von geeigneten Tracern, welche flussabwärts transportiert werden, Daten generiert, die Auskunft zu Fließzeiten und den flussspezifischen Dispersionsprozessen geben. Mittels dieser werden die vorhandenen Modelle kalibriert und validiert.

7 Recherche international verfügbarer Modelle

7.1 Ziele der Recherche

Das RODOS-System besteht aus einem Set verschiedener Modelle, welche die relevanten Komponenten des Wasserkreislaufes berücksichtigen und die einzelnen Aspekte des Radionuklidtransportes über den Wasserpfad nach einer Freisetzung behandeln können (vgl. Abschnitt 5.1). Hierbei sollte gewährleistet werden, dass das RODOS-Modellkonzept bei der Bewertung der radiologischen Notfalllage nach einer trockenen und nassen Deposition weder wesentliche Transportprozesse vernachlässigt, noch überkonservativ ausgelegt ist. Insbesondere im Fall des RETRACE-Modells ist eine dezidiertere Darstellung der Runoff-Prozesse und deren zeitliche Abläufe nicht gegeben. Deshalb ist das RODOS-System im Einklang mit den Bedarfen des Notfallschutzes anzupassen und ggf. zu erweitern. Gesucht wird daher ein hydrologisches Software-Paket, welches die beschriebenen Vorgänge in den verschiedenen aquatischen Medien hinreichend fundiert behandelt, in das vorhandene RODOS-System gut implementierbar und an die Erfordernisse des Notfallschutzes gut adaptierbar ist.

Zunächst werden diejenigen Modellansätze, welche im Rahmen einer umfassenden Recherche identifiziert wurden, vorgestellt und im Nachhinein mit Blick auf die Erweiterung des RODOS-Systems im Kapitel 8 bewertet.

Aufgrund der fortgeschrittenen Computertechnik bzw. Nutzung von Supercomputern im Bereich der Hydrologie- und Transportmodellierung gibt es eine Vielzahl verschiedener Softwarelösungen. Die Recherche hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, vielmehr war das Ziel die Darstellung des Portfolios, welches gegenwärtig in diesem Bereich vorhanden ist. Dies ist den Anforderungen der Modellierung des radiologischen Notfallschutzes in Deutschland gegenüberzustellen und basierend auf der Bewertung der recherchierten oder bereits bekannten Software diejenigen Merkmale zu identifizieren, welche in die hier allgemein formulierten Empfehlungen einfließen sollten.

Die Komplexität der Modellansätze ist zum Teil sehr hoch, allerdings sind diese häufig nur auf ein bestimmtes Gebiet fokussiert und nur unter bestimmten Bedingungen anwendbar oder auch schwierig bzw. mit erheblichem Aufwand erweiterbar. Darüber hinaus muss beachtet werden,

dass eine hohe Komplexität nicht unbedingt ein qualitativ gutes Ergebnis liefert. Die Skala der Betrachtung ist entscheidend. Im Bereich der Hydraulik der Fließgewässer sind z. B. für kleinskalige Detailuntersuchungen der Strömung auf Navier-Stokes-Gleichungen basierende dreidimensionale (3D) Modelle geeignet, für großskalige Anwendungen sollte das Modell eine zweidimensionale (2D) tiefengemittelte oder eine eindimensionale (1D) Betrachtung bieten.

Aufgrund der Zielsetzung, oben genannte Anforderungen als eine Erweiterung in das RODOS-System zu implementieren, ist es zwingend erforderlich, dass der Quellcode der Software sowie die Schnittstellen nach außen nach Bedarf verändert werden können und die Software sowohl unverändert als auch in einer angepassten Form weitergegeben werden darf. Diese Merkmale erfüllen nur Open-Source-Modelle. Auch aus wissenschaftlicher Perspektive ist die Nutzung von Open-Source-Software als erstrebenswert zu betrachten. Mit dem Fortschreiten der Digitalisierung im Forschungsbetrieb gewinnt Open-Source zunehmend an Bedeutung im Rahmen des Open-Science-Konzepts (Deutsche Forschungsgemeinschaft 2019 [27], UNESCO 2022). Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Forschungsergebnisse durch Dritte. Zudem trägt es zur Nachhaltigkeit bei, wenn Parallelentwicklungen vermieden werden und eine Nachnutzung grundsätzlich ermöglicht wird. Ein weiterer relevanter Baustein ist die Inklusion: durch den Verzicht auf künstliche Hürden wie Lizenzgebühren wird der Zugang erleichtert und gleichzeitig können Weiterentwicklungen aus der Nutzerbasis in das Projekt zurückfließen.

Neben Open-Source gibt es im Bereich der Hydrologie- und Transportmodellierung kommerzielle (kostenpflichtige) Software, welche ein breites Anwendungsspektrum bietet. Gegen Bezahlung wird der anwendenden Person ein hoher Serviceumfang geboten, eine Erweiterung der Modellinhalte durch die anwendende Person ist jedoch nicht möglich und in der Regel ist eine Anpassung der Schnittstellen seitens der Hersteller auch nicht erwünscht.

7.2 Überblick über die recherchierten Modelle und Bewertungsverfahren

Im Folgenden werden sowohl die einzelnen kommerziellen als auch Open-Source-Modellansätze kurz vorgestellt und Kriterien zu deren Bewertung identifiziert. Allerdings erfolgt keine Bewertung der kommerziellen Modellansätze und deren Anwendungsgebiete, da nur quelloffene Produkte für die Erweiterung des RODOS-Systems geeignet sind. Die Vorstellung der kommerziellen Modellansätze ist jedoch mit Blick auf den Stand der Wissenschaft und Technik von wesentlicher Bedeutung, da diese zur Demonstration der aktuell denkbaren praxisnahen Modellapplikationen und als Maßstab der aktuellen Standards auf dem betrachteten Fachgebiet dienen.

7.2.1 Kommerzielle Modelle ohne Bewertung

Beispielhaft werden zum einen zwei auch in Deutschland bekannte Vertreter kommerzieller hydrologischer physikalisch basierter Modellsysteme vorgestellt, welche einen breiten Einsatz in verschiedenen Bereichen der Hydrologie und ingenieurtechnischen Anwendungen haben und kontinuierlich ausgebaut werden: MIKE SHE des Dansk Hydraulisk Instituts (DHI) und die Modelle der Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH: HydrAs, NASIM und Jabron. Zum anderen werden zwei Vertreter der Modellansätze zur Radionuklidmigration in den Umweltmedien nach einer unfallbedingten Freisetzung vorgestellt: Modellansätze

[27] Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Leitlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis. 2019. https://www.dfg.de/resource/blob/173732/4166759430af8dc2256f0fa54e009f03/kodex-gwp-data.pdf

GoldSim (GoldSim Technology Group) und AMBER (Quintessa). Während die hydrologische Modellierung eine Vielzahl von umfassenden physikalisch basierten Ansätzen bietet, sind die Modellansätze im Bereich des Radionuklidtransports häufig stärker Kompartiment-basiert und vergleichsweise eher auf konservative Bewertungen ausgerichtet.

MIKE SHE

MIKE SHE[28] ist ein flexibles Modellsystem, welches ursprünglich durch Zusammenarbeit von drei europäischen Organisationen in den 80er-Jahren entstanden ist. Eine von den drei Organisationen – DHI Water & Environment – hat seitdem das Modell zum umfassenden und vielseitigen hydrologischen Modellsystem ausgebaut. Es besteht aus gekoppelten physikalisch basierten Modellen für den Überlandfluss, den ungesättigten Fluss, den Grundwasserfluss und den volldynamischen Kanalfluss, einschließlich der komplexen Rückkopplungen und Wechselwirkungen. MIKE SHE umfasst auch Prozesse, wie vegetationsbasierte Evapotranspiration, Bewässerung, Schneeschmelze und Wasserqualität; inkludiert ist auch der Nährstofftransport. Es ist ein auf dem Gebiet der Siedlungs- und Wasserwirtschaft etabliertes Werkzeug für ingenieurtechnische Anwendungen im Bereich Planung und Bewirtschaftung von Wasserressourcen und verschiedener Umweltlösungen. Es kann auch zur Modellierung von hydrologischen Prozessen auf Einzugsgebietsbasis verwendet werden.

Modelle der Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH

In Deutschland haben sich in letzten Jahren drei Softwarelösungen der Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH[29] etabliert, welche in Kooperation mit dem niederländischen Institut Deltares[30] entwickelt wurden. Sie liefern Informationen für die Bewirtschaftung von Gewässern, Entwässerungssystemen und Berechnungen für Starkregen im Rahmen des Hochwasserschutzes und sind einzeln oder in Kopplung anwendbar:

- **HydroAS** (2D-Simulation von Fließgewässern und vom Oberflächenabfluss von Niederschlägen): Es basiert auf der numerischen Lösung der Flachwassergleichungen mit der Finite-Volumen-Methode.
- **NASIM** (Niederschlag-Abfluss-Modell): NASIM bildet die hydrologischen Prozesse natürlicher und urbaner Einzugsgebiete und den Stofftransport ab und dient der Abflussvorhersage. NASIM findet breite Anwendung und wird schwerpunktmäßig bei der Erstellung der Hochwasserschutzkonzepte eingesetzt.
- **Jabron** (1D-Modell zur Wasserspiegellagenberechnung für stationär-gleichförmige und ungleichförmige Strömungsbedingungen): Es ist als ein unterstützendes Werkzeug für Gewässerplanung sowie Entwicklung von Hochwasserschutzkonzepten angedacht.

GoldSim

GoldSim[31] von der GoldSim Technology Group wurde für verschiedene Applikationen entwickelt, darunter hydrologische Modellierung sowie Transport von Schadstoffen. Die Transportmodule zum Schadstofftransport bilden die verschiedenen Prozesse von der Schadstofffreisetzung (inkl. Radionuklide) bis hin zu der Beschreibung der Transportwege in Umweltmedien wie Grundwasser, Oberflächenwasser, Luft und Boden ab. Sowohl advektive als auch

28 https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she
29 https://www.hydrotec.de/
30 https://www.deltares.nl/en
31 https://www.goldsim.com/Web/Applications/Areas/#EnvironmentalSystems

diffusive Transportmechanismen werden berücksichtigt. Das Ergebnis ist eine Vorhersage von Massenflüssen am Ort der Bestimmung sowie von Konzentrationen und möglicher Dosen.

AMBER

AMBER[32] von Quintessa ist eine kompartimentbasierte Software, welche es den anwendenden Personen ermöglichen soll, eigene dynamische Kompartimentmodelle erstellen zu können. Sie dient der Darstellung der Migration und der Rückhaltung von Schadstoffen in einem System, inklusive radioaktiver Stoffe. AMBER wird zur routinemäßigen, unfallbedingten und langfristigen Szenarienbewertung eingesetzt. AMBER wurde u. a. zur Bewertung von Sanierungsoptionen für einzelne Standorte um Fukushima Daiichi auf der Grundlage der gemessenen Kontaminationswerte, ihrer Verteilung und der Landnutzungsmuster verwendet.

7.2.2 Open-Source-Modelle

Aus dem Bereich der Open-Source-Modelle wurden hydrologische, wenn möglich physikalisch basierte, Modellansätze ausgewählt: Wflow, ParFlow, mHM, WRF-Hydro® und DHSVM. Es sind etablierte Modellsysteme, welche zum Teil auch den Sedimenttransport von Partikeln oder Transport von chemischen Stoffen und Radionukliden berücksichtigen. Diese Modelle werden im Kapitel 8 in der Bewertungsmatrix gegenübergestellt. Für alle Modelle gilt, dass sie Wetterdaten (insbesondere Niederschlag) für das Rechengebiet benötigen.

Wflow

Wflow ist ein Modellsystem[33], das vom Institut Deltares allen frei zur Nutzung zur Verfügung gestellt wird. Wflow[34] ermöglicht die Modellierung sämtlicher hydrologischer Prozesse eines Einzugsgebiets darunter Niederschlag, Interzeption, Schneeakkumulation und -schmelze, Evapotranspiration, Bodenwasser, Oberflächenwasser sowie Grundwasserneubildung. Wflow benutzt die kinematische Welle sowie weitere Ansätze für die Modellierung des Transports von Wasser und Sediment und entspricht dem Stand der Wissenschaft und Technik. Es ist modular aufgebaut und kann auch mit anderen Modellen von Deltares gekoppelt werden. Wflow wird weltweit eingesetzt und ist bereits für Einzugsgebiete in Deutschland im Einsatz gewesen. Die Beschaffung aller Daten ist Aufgabe der anwendenden Person. Wflow enthält keine Komponente für den Transport von Radionukliden. Wflow benötigt als Eingabe Informationen über die Topographie, Einzugsgebiete und Flüsse. Ein Fluss wird durch seine Länge, Breite und Neigung charakterisiert.

ParFlow

ParFlow[35] ist eine rasterbasierte, flächendifferenzierte Modellplattform mit mehreren Modulen, die sowohl gesättigte als auch variabel gesättigte Wasserflüsse im Untergrund mit einer dreidimensionalen Richards-Gleichung simulieren und somit räumlich wie zeitlich variable Grundwasserstände abbilden kann (Ashby und Falgout 1996, Jones und Woodward 2001, Kollet und Maxwell 2006, Maxwell 2013). Der Oberflächenabfluss wird als eine kinematische Welle in zwei Dimensionen simuliert. Ein modular gekoppeltes Landoberflächenmodell liefert die Beschreibungen für Vegetation, Schneeprozesse sowie alle relevanten Energieflüsse. Hervorzuheben ist der Umstand, dass aktuell eigenständige Prozessbeschreibungen für Fließgewässer und Seen fehlen. Somit müssen sich diese Gewässer dynamisch im Modell

---

32 https://www.quintessa.org/software/AMBER/modelling-accidental-and-historical-contamination
33 https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/Models+linked+to+Delft-FEWS
34 https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/wflow-catchment-hydrology
35 https://parflow.org

entwickeln, beispielsweise durch Interaktion von Oberflächenwasser und oberflächennahem Grundwasser.

Das resultierende Flussnetz und die Güte des simulierten Abflusses sind folglich in starkem Maße von den Modelleinstellungen abhängig. Insbesondere die gewählte räumliche Auflösung des Modellgitters sowie die Verfügbarkeit und Qualität der Eingangsdaten haben hierbei maßgebliche Relevanz. Diese umfassen Informationen zu Topographie, Boden, Geologie, Landnutzung und den meteorologischen Antrieb. Die Identifizierung, der Bezug und die Aufbereitung geeigneter Eingangsdaten für die Zielregion obliegen der anwendenden Person.

mHM

mHM (mesoscale Hydrologic Model)[36] ist ein rasterbasiertes, flächendifferenziertes hydrologisches Modell (Samaniego et al. 2010, Kumar et al. 2013, Thober et al. 2019). Es berücksichtigt die wichtigsten hydrologischen Prozesse wie Schneefall und Schneeschmelze, Interzeption durch das Kronendach, Bodenfeuchtedynamik, Evapotranspiration, Oberflächen- und Zwischenabfluss, Perkolation sowie ein Abflussrouting im Gerinnebett. Für das Abflussrouting im Gerinnebett kommt ein Muskingum-Cunge-Verfahren zum Einsatz, wodurch die Anwendung auf Regionen beschränkt ist, die keine nennenswerte Rückstauung (wie beispielsweise durch Querbauwerke, ausgedehnte Überschwemmungsgebiete, Flussdeltas) aufweisen. Das Modell arbeitet mit verschiedenen räumlichen Auflösungen, um den unterschiedlichen Maßstäben Rechnung zu tragen, auf denen physiografische Daten verfügbar sind und die relevanten hydrologischen Prozesse simuliert werden können. Eine Besonderheit des Modellsystems ist die Behandlung der Modellparameter. Hier kommt ein integriertes Regionalisierungsverfahren zum Einsatz, um das Modell möglichst effizient auf das Untersuchungsgebiet abzustimmen. Notwendige Eingabedaten sind die Topographie, die Landnutzung, die Bodenbeschaffenheit / die Bodenart wie Sand und Lehm, der Bewuchs sowie Flusssysteme und Grundwasserleiter. Ebenfalls notwendig sind Abflussdaten der einzelnen Flüsse an definierten Punkten. Optional können auch Temperatur und Schneebedeckung genutzt werden. In der Modelldokumentation finden sich Vorschläge zu verfügbaren Datenquellen und Werkzeugen zur Anpassung auf das jeweilige Untersuchungsgebiet.

DHSVM

Das „Distributed Hydrology Soil Vegetation Model“ (DHSVM)[37] ist ein räumlich verteiltes, physikalisch basiertes hydrologisches Modell, das in den frühen 1990er Jahren vom Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) und der University of Washington entwickelt wurde (Wigmosta et al. 1994). Es beschreibt die Auswirkungen des lokalen Klimas, der Topografie, des Bodens und der Vegetation auf die Schneeakkumulation und -schmelze sowie auf die hydrologischen Prozesse über und unter der Oberfläche in den Wassereinzugsgebieten. Ursprünglich wurde das Modell für kleine Einzugsgebiete konzipiert. Durch Parallelisierung kann es jetzt auch für größere Gebiete genutzt werden. Das letzte Update des quelloffenen Programms wurde 2014 realisiert. DHSVM besitzt eine große Verbreitung. Es existiert eine Datenbasis für Teile der USA sowie eine Beschreibung der notwendigen Eingabedaten. Als Folge des Reaktorunfalls von Fukushima wurde DHSVM von einer Gruppe von Wissenschaftlern um ein Modul erweitert, das den Transport von Radionukliden im Oberflächenabfluss beschreibt (Kivva et al. 2015). Es ist nicht vorgesehen, dass dieses Modul Teil des von PNNL verteilten Quellcode sein wird. Das Modell benötigt flächenhafte Daten wie ein digitales

36 https://mhm-ufz.org
37 https://www.pnnl.gov/projects/distributed-hydrology-soil-vegetation-model

Höhenmodell (digital elevation model, DEM), Information über die Einzugsgebiete, die Bodenart (z. B. Sand, Lehm), die Bodentiefe und den Vegetationstyp. Weiterhin benötigt DHSVM die Charakterisierung des Flusssystems und aller Straßen in dem Rechengebiet.

WRF-Hydro®

Das hydrologische Modellierungssystem WRF-Hydro®[38] wurde als Modellkopplungssystem entwickelt, welches mehrskalige Prozessmodelle der Atmosphäre und der terrestrischen Hydrologie miteinander verbindet. Für alle relevanten Komponenten des Wasserkreislaufs wie Niederschlag, Bodenfeuchte, Schneedecke, Grundwasser, Evapotranspiration sowie Abfluss an der Landoberfläche und im Gerinne stehen entsprechende Beschreibungen zur Verfügung. Ferner existieren Komponenten für Seen, Reservoire und den Sedimenttransport. Eine Repräsentation des Transports von Radionukliden ist jedoch aktuell nicht vorhanden. Das National Center for Atmospheric Research (NCAR) koordiniert federführend die Weiterentwicklung des Modellsystems, wobei der Open-Source-Ansatz externe Beiträge bzw. Erweiterungen zulässt. Durch das modulare Design können unterschiedlichste physikalische Prozessmodelle eingebunden werden. Die vom Modell benötigten Eingangsdaten umfassen Informationen zu Topographie, Boden, Landnutzung, Hydrologie und den meteorologischen Antrieb. Der mitgelieferte Präprozessor für die Aufbereitung der zeitlich invarianten Eingangsdaten inkludiert eine weltweite Datenbasis und vereinfacht das Aufsetzen des Modells für die Zielregion.

8 Modellbewertung

Die Bewertung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Bewertungsschritt werden die im Abschnitt 7.2.2 umrissenen Open-Source-Modelle, die der SSK am geeignetsten erscheinen, detailliert beschrieben und für ihre Eignung als Modul des RODOS-Systems abschließend bewertet. Die so als „Best-Choice" identifizierten Modelle werden im zweiten Schritt den in Deutschland vorhandenen Modellansätzen – dem RODOS-System und dem Flussmodell QSim – gegenübergestellt. Dabei werden die Lücken dieser zwei Modellansätze aufgezeigt und bewertet, inwiefern mit Hilfe der als „Best-Choice" identifizierten Modelle diese Lücken geschlossen werden können. Schlussendlich werden die zentralen Eignungsmerkmale der Modellierung für die Bedarfe des Notfallschutzes abgeleitet. Diese sind als die Kriterien zu sehen, welche der zukünftige Modellansatz erfüllen sollte, und fließen in die Empfehlungen ein.

8.1 Bewertung erster Schritt: "Best-Choice" Open-Source-Modelle

Mit Blick auf die Bedarfe des Notfallschutzes, das Einsatzgebiet Deutschland mit angrenzenden Ländern, der aktuellen Struktur des RODOS-Systems und der Notwendigkeit, dass das auszuwählende Modell dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht sowie eine große Nutzer- und Entwickler-Community besitzt, wurden durch die SSK die folgenden Kriterien für die erste Stufe der Bewertung erarbeitet, welche in eine Bewertungsmatrix eingeflossen sind:

- modularer Aufbau,
- für großes Einzugsgebiet geeignet,
- physikalisch basiert,
- Transport von Sediment und Partikel implementiert,

[38] https://ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro

- Radionuklidtransport implementiert oder effizient implementierbar,
- Beschreibung von Landoberflächen mit saisonalem Bewuchs und möglicher Schneebedeckung vorhanden
- effiziente Implementierung neuer Subroutinen/Module möglich bzw. einfach anzupassen,
- Schnittstellen zu externen Modellsystemen (Datenverkehr) problemlos ausbaubar,
- weltweite Datenbasis vorhanden,
- Anpassung an ein Einzugsgebiet einfach zu realisieren und schon für Deutschland demonstriert,
- große Nutzer- und Entwickler-Community; weltweit sowie in Deutschland gut etabliert.

Die detaillierte Bewertung der Qualität der einzelnen Modelle ist mit Hilfe der oben definierten Kriterien in Tabelle 8-1 erfolgt. Weiterhin ist die Bewertung auch über die in der SSK vorhandene Expertise (Expert Judgement) erfolgt.

Tabelle 8-1: Bewertungsmatrix der betrachteten Open-Source-Modelle

Kriterium	**Wflow**	**ParFlow** *	**mHM**	**DHSVM**	**WRF-Hydro®** **
modularer Aufbau	++	++	++	+++	+++
für großes Einzugsgebiet geeignet	+++	++	++	++	+++
physikalisch basiert	++	+++	+	++	++
Transport von Sediment und Teilchen implementiert	++	nicht implementiert	nicht implementiert	++	++
Radionuklidtransport implementiert	nicht implementiert	nicht implementiert	nicht implementiert	+++	nicht implementiert
Beschreibung von Landoberflächen mit saisonalem Bewuchs und möglicher Schneebedeckung vorhanden	+++	+++	+++	+++	+++
effiziente Implementierung neuer Subroutinen/Module möglich / einfach anzupassen	+++	++	++	+++	+++
Schnittstellen zu externen Modellsystemen (Datenverkehr) problemlos ausbaubar	++	++	+	++	+++
weltweite Datenbasis vorhanden	+	+	+	+	+++
Anpassung an ein Einzugsgebiet einfach zu realisieren und schon für Deutschland demonstriert	++	+	++	+	+++
große Nutzer- und Entwickler Community; weltweit sowie in Deutschland gut etabliert	++	++	+	++	+++
Ergebnis: Anzahl beste Bewertung	**3**	**2**	**1**	**4**	**8**

Bewertung erfolgt in einer dreistufigen Skala +++, dreimal + ist die beste Bewertung;
*Sehr komplex aber dadurch auch schwieriger handhabbar
** Eine erfolgreiche Anwendung des Modells wurde bereits für verschiedene Einzugsgebiete in Deutschland demonstriert (u. a. Arnault et al. 2018; Fersch et al. 2020; Rummler et al. 2022).

Basierend auf der Bewertungsmatrix, wurden DHSVM und WRF-Hydro® als diejenigen Modelle identifiziert, die am geeignetsten für eine Erweiterung des RODOS-Systems erscheinen („Best Choice“).

Distributed hydrology-soil-vegetation model (DHSVM)

Die Hydrologie von Wassereinzugsgebieten im DHSVM wird durch ein mehrschichtiges Gittersystem auf Gitterzellen simuliert. Jedem Pixel des Gitters sind verschiedene Merkmale wie Bodenart bzw. Bodentyp, Vegetationstyp, Höhe, Neigung und Tiefe des Grundwasserspiegels zugeordnet.

Durch die Mitarbeit von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Pacific Northwest National Laboratory und anderen Entwicklerinnen und Entwicklern wurde die Anwendung des Modells auf mehrere Gebiete wie die städtische Hydrologie, gletscherhydrologische Dynamik, thermische Dynamik von Flüssen, städtische Wasserqualität, Erosion und Sedimenttransport sowie Wechselwirkungen zwischen Wald und Schnee in Baumkronenlücken ausgedehnt.

Konzeptionell ist DHSVM für kleinräumige Gebiete ausgelegt. Typische Gitterweiten liegen zwischen 10 und 100 Metern. Damit ist die räumliche Auflösung stark an die Performance der Rechner gekoppelt. Eine Parallelisierung ermöglicht, wie weiter in Abschnitt 7.2.2 aufgeführt, größere Gebiete zu modellieren.

Wie in den meisten der physikalisch basierten Modelle werden die Prozesse detailliert auf einem Pixel in Gittergröße modelliert. DHSVM führt für jedes Pixel eine Energie- und Wassermassenbilanz durch. Anschließend werden alle Pixel durch eine unterirdische Transportmethode (Wasserbilanz über den Zwischenabfluss oder Grundwasserabfluss) miteinander verbunden. Das Darcy-Gesetz[39] bestimmt die Abwärtsbewegung, und der Volumenstrom an Wasser wird zwischen den Pixeln auf der Grundlage der Topografie ausgetauscht (siehe Abbildung 8-1) (Storck et al. 1998).

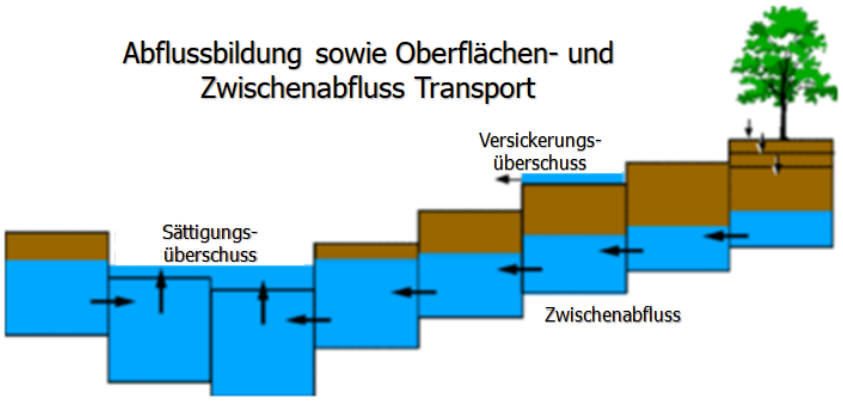

Abbildung 8-1: *DHSVM Oberflächen- und unterirdische Strömungsführung und Abflusserzeugung (aus Storck et al. 1998)*

Modelliert werden alle wichtigen Prozesse wie Evapotranspiration im Bestand, Transport von Wasser durch die ungesättigte Bodenzone, Verhalten von Schnee auf der Oberfläche sowie der

[39] Das Darcy-Gesetz gibt die in einer Zeiteinheit durch einen bestimmten Querschnitt eines Porengrundwasserleiters fließende Wassermenge Q an. Die Wassermenge Q ist dem Druckhöhenunterschied h und einem gesteinsspezifischen Koeffizienten k_f (Durchlässigkeitsbeiwert) direkt proportional und umgekehrt proportional der Fließlänge.

Abfluss in Gerinnen. Der Oberflächenabfluss wird über den Ansatz einer kinematischen Welle beschrieben.

Wichtige Eingabeparameter sind:

- Digitales Höhenmodell (DEM) des Einzugsgebiets,
- Informationen zur Bodentextur und -hydraulik,
- Informationen über die Vegetation,
- Meteorologische Bedingungen in einem untertägigen Zeitschritt, insbesondere Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, einfallende kurzwellige Strahlung und einfallende langwellige Strahlung (Das Format ist NetCDF[40].),
- Informationen über das Fließgewässernetz sowie Straßennetz (Lage, Breite, usw.).

DHSVM beinhaltet nur Prozesse, die den Fluss von Wasser beschreiben. DHSVM liegt quelloffen vor und kann deshalb auch erweitert werden. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der Ukraine und Fukushima haben die Radionuklidmodellierung, die auch in den aquatischen Modellen im RODOS-System implementiert ist, für DHSVM portiert und dort implementiert (Kivva et al. 2015). Das mit dem Radionuklidtransport erweiterte Modell DHSVM-R wurde auch erfolgreich in Fukushima für die Modellierung des Niida- Einzugsgebietes angewendet (Zheleznyak et al. 2022).

WRF-Hydro®

Die Open-Source-Plattform WRF-Hydro® (Gochis et al. 2020)[41] wurde entwickelt, um eine verbesserte Darstellung terrestrischer hydrologischer Prozesse in Modellen zur Beschreibung der Landoberfläche (engl. land surface model, LSM) zu ermöglichen. Diese LSMs kommen üblicherweise in numerischen Klima- und Wettermodellen zur Anwendung und stellen die untere Randbedingung für ein Atmosphärenmodell dar. Die dort beschriebenen Energie- und Wasserflüsse zwischen Boden, Landoberfläche und Atmosphäre sind dabei traditionell rein vertikaler Natur. Diese vereinfachte Annahme konnte durch die grobe horizontale Modellauflösung der Atmosphärenmodelle (≥ 10 km) gerechtfertigt werden. In der jüngeren Vergangenheit erhöhte sich die räumliche Auflösung der Atmosphärenmodelle zunehmend in einen Bereich von wenigen Kilometern und rückte die Berücksichtigung lateraler Feuchteflüsse in den Fokus. WRF-Hydro® schafft hier die Möglichkeit, Infiltrationsüberschuss an der Landoberfläche sowie Bodenwasser lateral auf benachbarte Modellgitterzellen zu verteilen. Abhängig vom Sättigungszustand der Zielgitterzelle wird zudem eine Ex- bzw. Reinfiltration abgebildet. Da aktuell noch größere Diskrepanzen zwischen den üblicherweise verwendeten räumlichen Auflösungen für Modellierung der Hydrologie (≤ 200 m) und der Atmosphäre (≥ 2 km) bestehen, bietet WRF-Hydro® auch die notwendige Infrastruktur, Modellgitter mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung für das LSM und hydrologische Erweiterungen verwenden zu können.

Gleichzeitig kann WRF-Hydro® in einem eigenständigen Modus als traditionelles hydrologisches Modellierungssystem für die Landoberfläche arbeiten (siehe National Water Model[42]).

---

[40] NetCDF (Network Common Data Form) ist ein Dateiformat für den Austausch mehrdimensionaler wissenschaftlicher Daten. Es handelt sich um ein binäres Dateiformat, das durch die Angabe der Byte-Reihenfolge im Header maschinenunabhängig ist und über Attribute eine Selbstbeschreibung der enthaltenen Daten ermöglicht.

[41] https://ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro

[42] https://water.noaa.gov/about/nwm

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Modellantrieb aus externen Quellen bereitgestellt werden muss, da das Atmosphärenmodell nicht Bestandteil der Simulationskette ist. Die zum Antrieb notwendigen meteorologischen Variablen sind:

- Temperatur in 2 m Höhe,
- spezifische Feuchte in 2 m Höhe,
- Windkomponenten in 2 oder 10 m Höhe,
- Niederschlag,
- eintreffende kurzwellige Strahlung,
- eintreffende langwellige Strahlung,
- Luftdruck an der Erdoberfläche.

Diese Informationen werden unter anderem von operationell eingesetzten numerischen Wettervorhersagemodellen (z. B. ICON[43], IFS[44], GFS[45]) generiert und können nach einer Postprozessierung für den Antrieb von WRF-Hydro® verwendet werden. Der meteorologische Modellantrieb wird gitterbasiert in stündlicher Auflösung eingelesen. Die für Deutschland relevanten Einzugsgebiete werden beispielsweise von dem operationellen Vorhersagesystem ICON-D2 des Deutschen Wetterdienstes in 2 km Auflösung abgedeckt (siehe Abbildung 8-2).

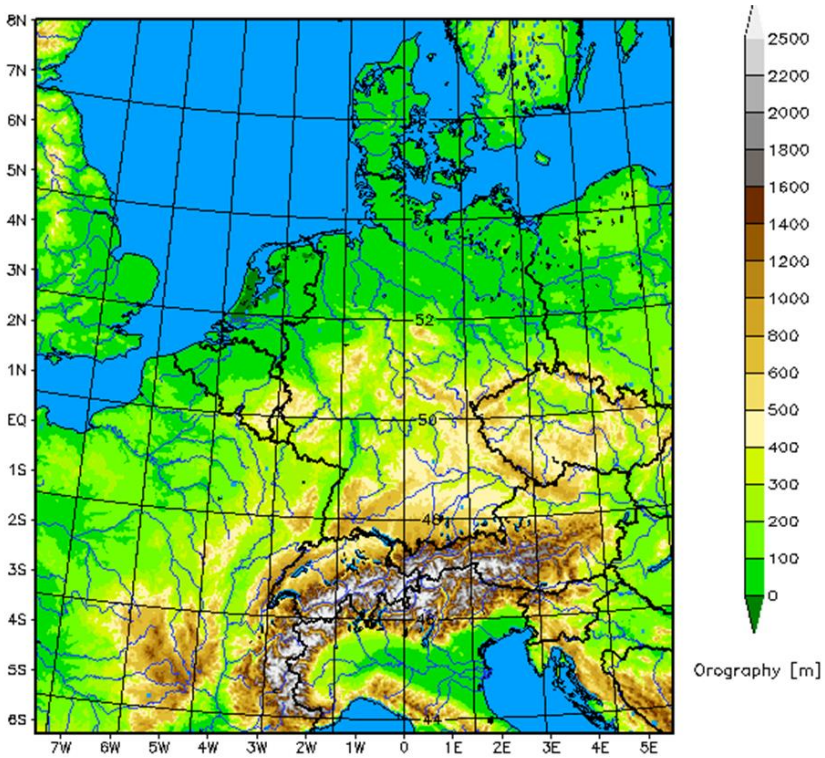

Abbildung 8-2: *Modellgebiet und Topographie des Vorhersagemodells ICON-D2 (Quelle: Deutscher Wetterdienst)*

Die einzelnen Modellkomponenten sind in Abbildung 8-3 dargestellt. Konzeptionell ist WRF-Hydro® als Koppelungsarchitektur ausgelegt. Einzelne Komponenten, die einen Teilbereich

[43] Icosahedral Nonhydrostatic (ICON) Modell des Deutschen Wetterdienstes
[44] Integrated Forecast System (IFS) des Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage
[45] Global Forecast System (GFS) der amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration

oder einen bestimmten Prozess beschreiben, werden dabei als Modul in das Modellsystem eingebunden und mit den anderen Komponenten vernetzt.

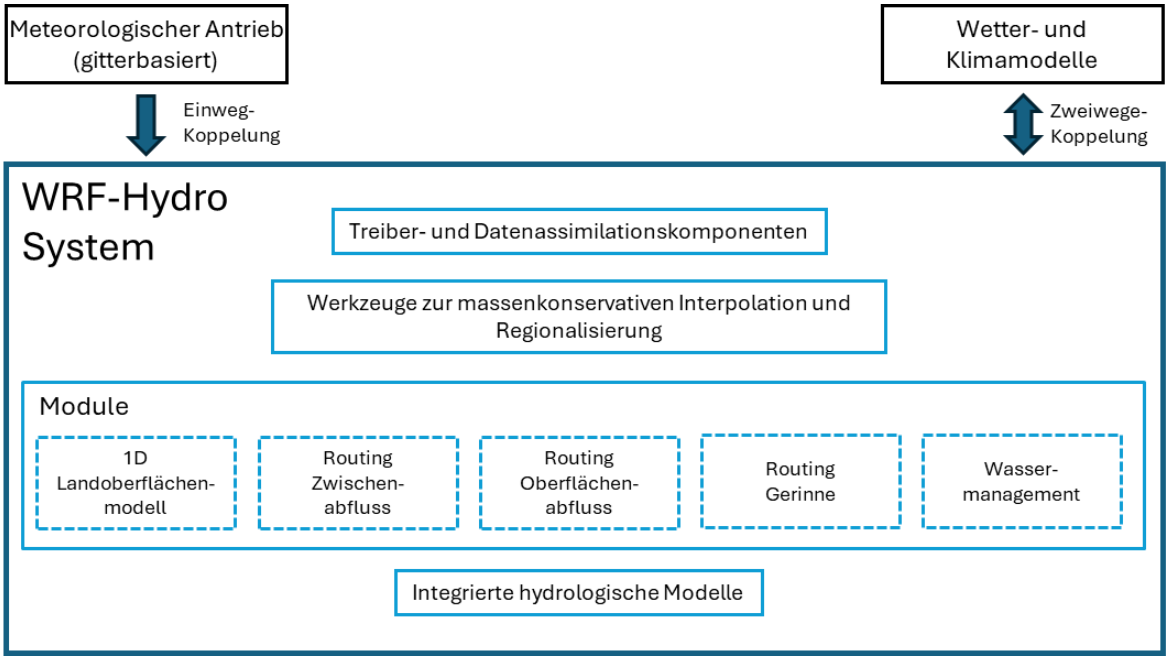

Abbildung 8-3: Modularer Aufbau der WRF-Hydro®-Architektur (nach Gochis et al. 2020)

Grundlegender Bestandteil ist das Landoberflächenmodell welches die vertikalen Energie- und Wasserflüsse berechnet. Als Standardoption ist derzeit das Noah-MP[46] (He et al. 2023) als LSM vorgesehen. Die dort berücksichtigten wesentlichen hydrologischen Prozesse sind in Abbildung 8-4 schematisch dargestellt. Für den Betrieb des LSM werden – neben den oben bereits erläuterten Antriebsvariablen – eine Reihe statischer Eingangsvariablen benötigt, u.a. flächendifferenzierte Informationen zur Topografie, Landnutzung, Bodentextur, Anteil der grünen Vegetationsbedeckung (monatlich) und Albedo (monatlich). Diese werden vom WRF-Präprozessor (WPS) aufbereitet und auf das von der anwendenden Person definierte, regionale Modellgitter interpoliert. Entsprechende Eingangsdatensätze mit globaler Abdeckung werden direkt von den Modellentwicklern bereitgestellt[47]. Ferner ist das Datenformat ausreichend dokumentiert, wodurch sich auch benutzerdefinierte Datensätze in den Präprozessor einbinden lassen.

46 https://ral.ucar.edu/model/noah-multiparameterization-land-surface-model-noah-mp-lsm
47 https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html

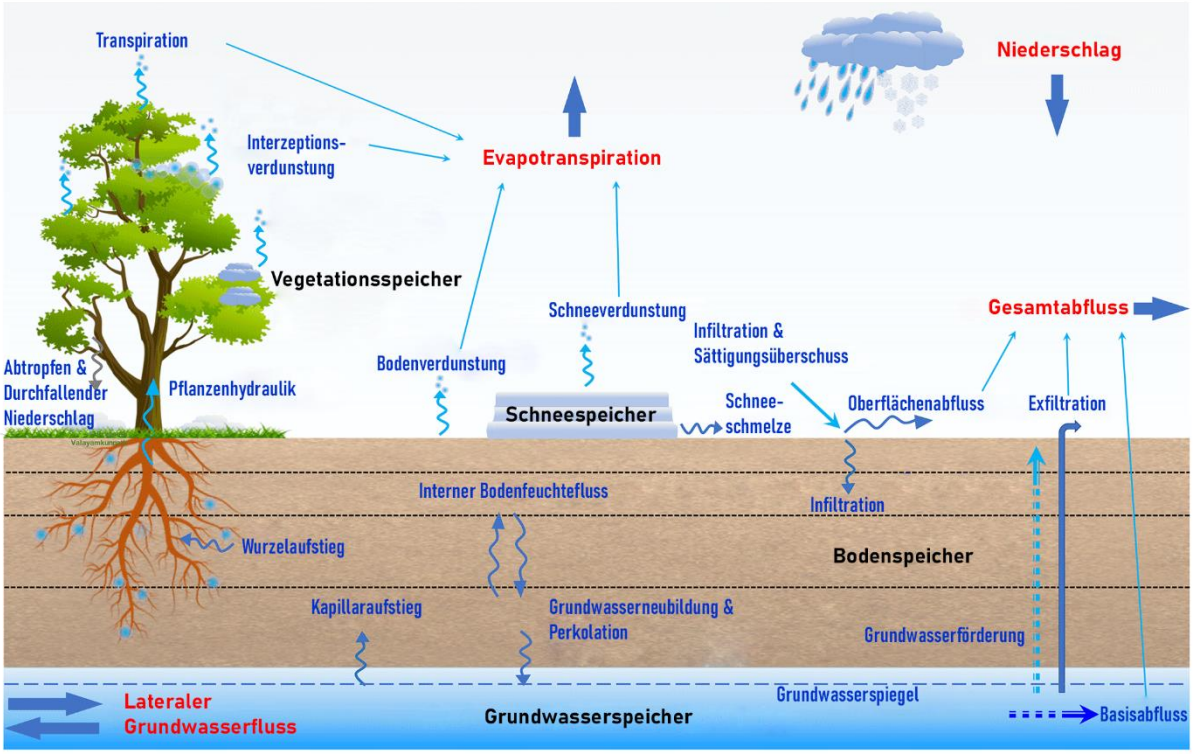

Abbildung 8-4: Schematische Darstellung hydrologischer Prozesse im Noah-MP Landoberflächenmodell (nach He et al. 2023)

Die von WRF-Hydro® bereitgestellten Erweiterungen zur lateralen Hydrologie bieten eine umfassende Beschreibung aller relevanten Runoff-Prozesse: inkludiert sind Module für Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss, Grundwasserabfluss, Abfluss im Gerinne und Reservoire bzw. Seen. Hierfür werden zusätzlich statische Eingangsdatensätze für beispielsweise Fließrichtung, Flussordnungszahl und Flussnetz benötigt. Diese werden üblicherweise mittels eines geographischen Informationssystems von einem hochaufgelösten Geländemodell abgeleitet. Als mögliche Eingangsdatensätze kommen beispielsweise HydroSHEDS[48] oder EU-DEM[49] in Frage.

8.2 Bewertung zweiter Schritt: “Best-Choice” Open-Source-Modelle in Gegenüberstellung mit dem RODOS-System und dem Modell QSim

Um DHSVM und WRF-Hydro® abschließend einschätzen zu können, müssen beide mit den bisher in Deutschland vorhandenen Modellansätzen – den hydrologischen Modellen im RODOS-System und dem Flussmodell QSim – vergleichend bewertet werden. Ziel ist es anhand der im Abschnitt 8.1. genannten zentralen Merkmale (Kriterien) für die Erweiterung der operationell umsetzbaren Modellierung die Vorteile aber auch die Lücken der Modelle eingehend darzustellen und diese in der Empfehlung geeignet zu interpretieren. Dabei beschränkt sich die Empfehlung auf die Eigenschaften, die in einer möglichen Erweiterung des RODOS-Systems realisiert werden sollten – sie bleibt dabei modellunabhängig.

[48] https://www.hydrosheds.org/
[49] https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/gisco/geodata/reference-data/elevation/eu-dem

8.2.1 Bewertung der einzelnen hydrologischen Modelle des RODOS-Systems für die Anwendung in Deutschland

Der folgende Abschnitt enthält eine Bewertung im Hinblick auf die Erfüllung des Standes von Wissenschaft und Technik der einzelnen hydrologischen Modelle, die im RODOS-System zurzeit implementiert sind. Diese Darstellung dient auch dem Überblick, welche Komponenten des Wasserkreislaufes (vgl. Abschnitt 5.1) im RODOS-System berücksichtigt werden und welche davon für die Betrachtung der schnell ablaufenden Runoff-Prozesse relevant sind. Somit zeigt sich, dass hinsichtlich der Fragestellung des Beratungsauftrags die Module RETRACE, RIVTOX und THREETOX relevant sind. Vollständigkeitshalber werden alle Module des RODOS-Systems mit bewertet. Der Grund dafür ist, dass für die Spätphase eines Notfalls diese Module auch relevant sein könnten. Zudem ist zu berücksichtigen, dass moderne Oberflächenabflussmodelle gemäß dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht nur die reine Abflussmodellierung umfassen, sondern auch das weitere Routing von Wasser und Sedimenten in Fließgewässern sowie in Reservoiren und Seen beinhalten.

RETRACE ist für eine schnelle Simulation konzipiert, benötigt wenige Eingabewerte, die allgemein verfügbar sind. Allerdings stehen dem die folgenden Einschränkungen entgegen:

- sehr einfaches Modell für den Oberflächenabfluss,
- kleinste Zeiteinheit für Niederschlag sind Tageswerte,
- Transferkoeffizient für die Bestimmung der Kontamination im Wasserabfluss ist sehr einfach und empirisch bestimmt – nicht für alle Einzugsgebiete anwendbar,
- keine Trennung von gelösten und an Partikel gebundenen Radionukliden.

Wegen der oben aufgeführten Einschränkungen entspricht RETRACE nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Eine Erweiterung erscheint problematisch, und deshalb ist die Implementierung eines Modells, das dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht, zu bevorzugen.

RIVTOX beschreibt den Transport in Fließgewässern mit einer eindimensionalen Lösung der Saint-Venant-Gleichung. RIVTOX entspricht dem Stand der Wissenschaft und Technik. RETRACE und RIVTOX sind im RODOS-System gekoppelt. Falls ein Modell für den Oberflächenabfluss auch den Transport in Fließgewässern beinhaltet – das ist in den neuen Systemen wie WRF-Hydro® der Fall – dann muss RIVTOX nicht notwendigerweise weiter genutzt werden.

Für **COASTOX**, welcher kleine Abschnitte von Flüssen, Seen, Reservoiren oder spezielle Bereiche wie Häfen beschreibt, erscheint eine Anpassung an die vielen Seen in Deutschland kaum möglich. Deshalb sollte getestet werden, inwieweit die Modellierung in neuen Oberflächenabflussmodellen für den Notfallschutz ausreicht.

THREETOX benötigt als ein komplexes dreidimensionales Modell umfangreiche Eingabedaten. Es wurde nach dem Reaktorunfall von Tschornobyl für den Bodensee angewendet – und dokumentiert. THREETOX entspricht dem Stand der Wissenschaft und Technik. Das Modell kann für Küstengewässer und komplexe Seen/Reservoire genutzt werden. Eine Anpassung von THREETOX an andere Seen erscheint nicht notwendig. Allerdings sollte eine Prüfung dazu zukünftig erfolgen.

POSEIDON dient der Modellierung der Nahrungsketten in Seen und im Ozean. POSEIDON entspricht dem Stand der Wissenschaft und Technik. Eine Parametrisierung für die Nord- und Ostsee ist vorhanden. Eine Kopplung mit den jetzigen RODOS-Modellen ist implementiert.

Allerdings liegt die Anwendung von POSEIDON außerhalb der jetzigen Fragestellung, da hier längerfristige Transportprozesse von Bedeutung sind.

MOIRA wird wegen seines großen Modellzeitschritts (minimal ein Monat) nur für die langfristige Prognose der Konzentration in Einzugsgebieten genutzt (Jahre bis Jahrzehnte). Somit ist dieses Modell für den frühen Notfallschutz nicht anwendbar.

8.2.2 Bewertung QSim

Das Modell QSim für die Modellierung des Transports von Radionukliden in Bundeswasserstraßen befindet sich hinsichtlich des Sediment- und Radionuklidtransports im Aufbau und deckt für den Notfall zurzeit einen Teil der relevanten Fließgewässer – der Bundeswasserstraßen – ab (Flüsse mit aktiven Kernkraftwerken im grenznahen Ausland). Andere für den radiologischen Notfall relevanten Fließgewässer, welche nicht zu den Bundeswasserstraßen gehören sowie Seen und Trinkwasserreservoire, werden nicht berücksichtigt. In der aktuellen Version ist die eindimensionale Modellierung der Zustandsgrößen wie Fließgeschwindigkeit als gleichverteilt im gesamten Oberflächengewässerquerschnitt festgelegt, was zu einer vereinfachten Darstellung des Stofftransports führt. Für eine Betrachtung eines Radionuklideintrags im Nahbereich (die ersten 200 m bis 1 000 m) wäre eine mehrdimensionale Umsetzung notwendig. Es werden keine Niederschlagseinträge mit Oberflächenabfluss sowie kein Schwebstofftransport mitbetrachtet. Eine Implementierung des Radionuklidtransportes samt Sorptionsprozessen und Sedimentation befindet sich im frühen Entwicklungsstadium. Aktuell wird der Fokus auf die Validierung und Kalibrierung der Modelle anhand von erhobenen Daten aus durchgeführten Dispersionsversuchen gelegt, so dass eine sichere Erstellung von Prognosen gewährleistet werden kann. Für weitere Anforderungen des Notfallschutzes wäre eine Weiterentwicklung denkenswert. Die Simulation von Runoff-Prozessen innerhalb von QSim ist derzeit nicht vorgesehen. Daten zu Runoff-Prozessen können jedoch entlang der Fließstrecken im Modell als Punktquellen oder als diffuser Eintrag über größere Flussabschnitte berücksichtigt werden.

Das Modell QSim wird zurzeit in jeglicher Form überarbeitet, wodurch auch eine Breitstellung als Open-Source angedacht ist.

8.2.3 Bewertung Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model (DHSVM)

Das hydrologische Modell DHSVM entspricht dem Stand der Wissenschaft und Technik. Es wurde als physikalisch basiertes Modell entwickelt, beschreibt den Oberflächenabfluss von Wasser unter den verschiedensten klimatologischen Bedingungen und wird hauptsächlich für kleine bis mittlere Einzugsgebiete genutzt. Der Transport von kleinen Partikel wird nicht modelliert. Das quelloffene Programm erlaubt die Erweiterung durch die nutzende Person und kann somit für spezielle Fragestellungen angepasst werden.

Durch die Anwendung für Tschornobyl und Fukushima wurde ein Modell zur Beschreibung des Transports von Radionukliden integriert. Allerdings ist diese Komponente nicht Teil des frei verfügbaren Quellcodes.

DHSVM benötigt detaillierte Eingabedaten, und diese müssen von der anwendenden Person speziell angepasst werden. Insbesondere ein Flussnetz sowie Straßennetz müssen vorgegeben werden. Dies ist sehr zeitaufwendig und erfordert substanzielle Ressourcen. Weiterhin ist die Anwendung von DHSVM in großen Einzugsgebieten – wie sie für Rhein, Donau und Elbe notwendig sind – noch wenig getestet.

Durch den sehr großen Aufwand bei der Datensammlung für Deutschland ist die Anwendbarkeit für Deutschland nur eingeschränkt zu empfehlen, andere Modelle bieten deutlich einfachere Möglichkeiten. Dieser große Nachteil wird auch durch die Möglichkeit der Modellierung von Radionukliden nicht kompensiert. Diese Modellierung kann nicht einfach übernommen werden, sondern muss auch angepasst werden.

8.2.4 Bewertung WRF-Hydro®

Die Open-Source-Plattform WRF-Hydro® bietet aktuell eine Beschreibung des regionalen Wasserkreislaufs und muss daher um den Radionuklidtransport erweitert werden. Dank des modularen Aufbaus, der bereits enthaltenen Schnittstellen und der daraus resultierenden guten Adaptierbarkeit einzelner Modellkomponenten an die Bedürfnisse der Zielfragestellung, ist die Implementierung des Radionuklidtransportes in das WRF-Hydro®-Modellsystem möglich. Zudem existiert mit der Sedimenttransport-Erweiterung (Yin et al. 2020) eine Vorarbeit, die sich potenziell gewinnbringend einbringen ließe. Darüber hinaus wurde eine erfolgreiche Anwendung des Modells bereits für verschiedene Einzugsgebiete in Deutschland demonstriert (u. a. Arnault et al. 2018; Fersch et al. 2020; Rummler et al. 2022).

Aus klimatologischer und hydrologischer Sicht werden in den einzelnen WRF-Hydro®-Modulen die zentralen Prozesse der Notfallbetrachtung abgebildet:

- Die wesentlichen Aspekte der Runoff-Prozesse im Zusammenhang mit der Landoberfläche, dem saisonalen Bewuchs, möglicher Schneebedeckung und der Berücksichtigung der für den weiteren Wassertransport relevanten Bodeneigenschaften,
- Wassertransport in Fließgewässern und Wasserreservoiren unter Berücksichtigung der Struktur der Gewässernetze,
- Die Möglichkeit das Modell über Prognosen des numerischen Vorhersagemodells ICON-D2[50] des Deutschen Wetterdiensts (DWD) anzutreiben. Das in Abbildung 8-2 dargestellte Simulationsgebiet deckt alle für Deutschland relevanten Flussgebietseinheiten vollständig ab mit Ausnahme der Oder, für die das nur teilweise gilt.

8.3 Zentrale Aspekte als Grundlage der SSK-Empfehlung

Sowohl die beiden in Deutschland genutzten Systeme RODOS und QSim als auch die beiden Modelle für den Oberflächenabfluss, DHSVM und WRF-Hydro®, erfüllen nicht alle wünschenswerten Kriterien für die Bedarfe des Notfallschutzes, auch wenn sie über erweiterbare Schnittstellen verfügen, über welche z. B. die Daten des operationellen Vorhersagesystem ICON-D2 des Deutschen Wetterdienstes oder andere externe Datensätze übertragbar sind.

Die im RODOS-System implementierten Module entsprechen teilweise nicht mehr dem Stand der Wissenschaft und Technik, QSim befindet sich noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium, DHSVM benötigt erheblichen Aufwand in der Implementierung und WRF-Hydro® – obwohl das am besten bewertete Modell der Stufe eins – beinhaltet kein Modell für den Radionuklidtransport. Die im Abschnitt 8.1 definierte Bewertungsmatrix legt auch die zentralen Merkmale eines Modells fest, das als geeignet angesehen werden kann.

[50] https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/01_num_vorhersagemodelle/regionalmodell_icon_d2.html

Die SSK stellt fest, dass zurzeit ein einzelnes System / Modell nicht alle Anwendungsfälle des Notfallschutzes abdecken, ein solches System / Modell aber auf Basis der quelloffenen Architektur der vorgestellten Ansätze entwickelt werden kann. Dafür sind aus Sicht der SSK die folgenden Kriterien notwendig und zu berücksichtigen:

- Open-Source-Modell, welches durch große Nutzer- und Entwickler-Community angewendet bzw. entwickelt und geprüft wurde,
- Datenschnittstellen mit Modellsystemen wie RODOS sollen umsetzbar sein,
- physikalisch basiertes Modellsystem nach Stand von Wissenschaft und Technik mit modularem Aufbau und der Möglichkeit neue Subroutinen/Module einzufügen und Datenschnittstellen zu implementieren,
- an vielen Beispielen validiert und für ein großes Einzugsgebiet geeignet,
- Beschreibung von Landoberflächen mit saisonalem Bewuchs und möglicher Schneebedeckung vorhanden,
- Radionuklidtransport in gelöster und partikelgebundener Form sowie der Austausch mit dem Sediment ist implementiert oder effizient implementierbar,
- europaweite Datenbasis vorhanden und Anpassung an ein Einzugsgebiet einfach zu realisieren (schon für Deutschland demonstriert).

9 Abkürzungsverzeichnis

ANoPl-Bund	Allgemeinen Notfallplan des Bundes
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoff
BURN	Biological Uptake model of Radionuclides
QSim	Quality Simulation
CORINE	Coordination of Information on the Environment (Koordinierung von Informationen über die Umwelt)
DEM	Digital elevation model
DHSVM	Distributed Hydrology Soil Vegetation Model
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EZG	Einzugsgebiet
GIS	Geographisches Informationssystem
GFS	Global Forecast System
ICON	Icosahedral Nonhydrostatic
IFS	Integrated Forecast System
LSM	land surface model
mHM	Mesoscale Hydrologic Model
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NetCDF	Network Common Data Form
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory
RODOS-System	Realtime Online Decision Support System
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
TrinkwEGV	Trinkwassereinzugsgebieteverordnung
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

10 Begriffsbestimmungen

Bioturbation	Bioturbation sind durch Aktivität von Organismen erzeugte Texturen im Boden bzw. Sediment, wodurch sowohl durch endogene (im Sedimentinneren) als auch exogene (an der Sedimentoberfläche angelegte) Bauten die ursprüngliche Schichtung zerstört wird. Diese Definition wurde zuletzt in der 339. Sitzung der SSK am 27./28. Oktober 2025 geprüft. (https://glossar-ssk.de/index.php?title=Bioturbation)
Buhne	Eine Buhne ist ein Regelungsbauwerk, das vom Ufer aus quer zur Strömung errichtet wird. Es dient dem Uferschutz und fixiert den Flusslauf. In ihrer Wirkung als Regelungssystem bündelt es den Durchfluss, um auch bei geringen Durchflüssen ausreichende Wassertiefen für die Schifffahrt sicherzustellen. Mehrheitlich bestehen Buhnen aus – oftmals gepflasterten – Steinschüttungen. (Quelle: Bundesanstalt für Gewässerbau https://wiki.baw.de/de/index.php/Buhnen_-_Regelungselemente_an_Bundeswasserstra%C3%9Fen)
Darcy-Gesetz	Das Darcy-Gesetz gibt die in einer Zeiteinheit durch einen bestimmten Querschnitt eines Porengrundwasserleiters fließende Wassermenge Q an. Die Wassermenge Q ist dem Druckhöhenunterschied h und einem gesteinsspezifischen Koeffizienten k_f (Durchlässigkeitsbeiwert) direkt proportional und umgekehrt proportional der Fließlänge.
ESRI-Shape-Format	Das Format des Shapefiles ist ein georäumliches Vektordatenformat für Geoinformationssystem (GIS). Es wird von ESR (Environmental Systems Research Institut) als weitgehend offene Spezifikation für die Dateninteroperabilität zwischen ESRI und anderen GIS-Softwareprodukten entwickelt und reguliert. Das Format der Formdatei kann Vektormerkmale räumlich beschreiben: Punkte, Linien und Polygone, die zum Beispiel Wasserbrunnen, Flüsse und Seen darstellen. Jedes Element hat in der Regel Attribute, die es beschreiben, wie Name oder Temperatur.
Evapotranspiration	Evapotranspiration ist die Gesamtverdunstung von einer natürlich bewachsenen Bodenoberfläche. Sie setzt sich aus der Evaporation (direkte Verdunstung) und der Transpiration (Abgabe durch Pflanzen und Tiere) zusammen.

Flussgebietseinheit	Eine Flussgebietseinheit ist ein als Haupteinheit für die Bewirtschaftung von Einzugsgebieten festgelegtes Land- oder Meeresgebiet, das aus einem oder mehreren benachbarten Einzugsgebieten und den ihnen zugeordneten Grundwässern und Küstengewässern besteht. (Quelle: nach Artikel 2 der Richtlinie 2000/60/EG)
Fließgewässer	Fließgewässer ist nach DIN 4049-3 ein oberirdisches Gewässer mit ständig oder zeitweise fließendem Wasser.
Geographisches Informationssystem	Geographisches Informationssystem (GIS) ist ein computergestütztes Informationssystem zur Erfassung, Verwaltung und Verarbeitung raumbezogener Daten.
Geschiebefracht	Geschiebefracht (synonym Geröllfracht, Gerölltrieb, Bettfracht, Bodenfracht) ist in der Fluvialmorphologie Masse des Geschiebes, das in einem bestimmten Zeitabschnitt durch den gesamten Gewässerquerschnitt transportiert wird. Die Geschiebefracht stellt den Teil der Flussfracht dar, welcher im Gerinnebett schiebend, flottierend, rollend und/oder saltierend (springend, hüpfend) mitgeschleppt wird. Die Bewegung wird durch die Kapazität des Flusses bestimmt, welche wiederum v.a. von gepulsten Änderungen der Fließgeschwindigkeit abhängt (Transportkörper). (Quelle: Lexikon der Geowissenschaften https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/geschiebefracht/5802)
Gerinne	In Anlehnung an DIN 4044 ist ein Gerinne die seitliche und untere Begrenzung einer Strömung mit freier Oberfläche, wobei die Ausdehnung des Gerinnes in der Hauptströmungsrichtung sehr viel größer als senkrecht zur Hauptströmungsrichtung ist. Gerinne können natürlich entstanden oder künstlich erschaffen worden sein, zum Beispiel als Kanal oder künstliches Gerinne zu Versuchszwecken.
Gewässer	Gewässer ist nach DIN 4049-1 fließendes oder stehendes Wasser, welches mit dem Wasserkreislauf in Verbindung steht, inklusive des Gewässerbetts und des Grundwasserleiters.
Huminstoff	Huminstoffe sind dunkel gefärbte, hochmolekulare, amorphe, relativ stabile organische Substanzen des Bodens, die bei der Humifizierung entstehen.
Hypodermische Abflüsse	Hypodermische Abflüsse sind oberflächennahe, laterale Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone. Diese Prozesse spielen sich meist oberflächennah im Bereich von Berghängen ab (oberflächennaher Abfluss).

hyporheische Zone	Die hyporheische Zone- hyporheisches Interstitial - ist der Bereich, in dem sich Oberflächenwasser in das Bach- bzw. Flussbett hinein und aus diesem heraus bewegt und gelöste Gase, Nähr- und Schadstoffe, Mikroorganismen und Partikel mit sich führt.
kinematische Welle	Kinematische Welle ist eine vereinfachte Beschreibung des Fließvorganges bei geringen Wasserhöhen. Viele in der Natur vorkommende Prozesse wie die lokale Beschleunigung ($\partial v/\partial t$), die konvektive Bescheunigung $v\ (\partial v/\partial s)$ sowie der Druckterm $g\ (\partial h/\partial s)$ können in dem Energieteil der Saint-Venant-Gleichung vernachlässigt werden. Diese Vereinfachung ist insbesondere für den Landoberflächenabfluss auf Hängen zulässig, da hier die Schwerkraft die anderen Kräfte um etwa zwei Größenordnungen übertrifft. Somit bleibt nur noch der Schwerkraft J_s und der Reibungsterm J_v übrig. Der Energieteil der Saint-Venant-Gleichung lautet dann: $J_s = J_v$. Bei der Anwendung dieser Beziehung muss beachtet werden, dass der Druckterm dann nicht mehr vernachlässigt werden kann, wenn das Gefälle gegen Null geht. Die Kontinuitätsgleichung lässt sich, wenn Quellen (z.B. seitliche Zuflüsse) oder Senken (z.B. Wasserentnahmen oder Verluste durch Versickerung) vorhanden sind, um einen Quellen-Senkenterm $i_{(s,t)}$ erweitern. Die letztgenannte Gleichung wird dann zu: $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (v \cdot h)}{\partial s} = i(s,t)$ und als kinematische Wellen-Gleichung bezeichnet. Ihr Vorteil gegenüber der vollständigen Saint-Venant-Gleichung (voll-hydrodynamische Welle) liegt in der leichteren Handhabbarkeit. Kriterium für die Anwendbarkeit der kinematischen Wellengleichung ist die kinematische Strömungszahl: $K_i = \frac{J_s \cdot L}{Fr \cdot H}$, wobei L die Fließlänge, H die Fließhöhe und Fr die Froude-Zahl bedeuten. Solange $K_i > 10$ ist, sind die Bedingungen für die Anwendbarkeit der kinematischen Wellengleichung erfüllt. (Quelle: https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/kinematische-welle/8346)
Kleines Gerinne	Unter einem kleinen Gerinne kann ein natürliches Gewässer geringer Breite verstanden werden. Die Wasserführung kann unter Umständen auch nur temporär erfolgen.

Kompartiment	Kompartimente sind Teile von Systemen zur vereinfachten Modellierung, um z. B. das Verhalten von Radionukliden in Ökosystemen zu beschreiben.
Muskingum-Cunge-Verfahren	Das Muskingum-Cunge-Verfahren dient der Darstellung der Flussganglinie und Berechnung des Gerinneabflusses. Es basiert auf der Massenbilanz des Wassers in einzelnen Gerinnesegmenten der Flussführung, indem ihre Speicheränderung pro Zeitschritt berechnet wird.
NetCDF	NetCDF (Network Common Data Form) ist ein Dateiformat für den Austausch mehrdimensionaler wissenschaftlicher Daten. Es handelt sich um ein binäres Dateiformat, das durch die Angabe der Byte-Reihenfolge im Header maschinenunabhängig ist und über Attribute eine Selbstbeschreibung der enthaltenen Daten ermöglicht.
Oberflächengewässer	Oberflächengewässer sind oberirdische Gewässer (auf der Landoberfläche) und umfassen sowohl die Fließ- als auch die Standgewässer.
Perkolation	Perkolation beschreibt das Durchfließen von Wasser durch ein festes Substrat. Dabei können Mineralien herausgelöst oder gefällt werden; die ausgewaschenen Partikel nennt man Perkolate. Perkolation wird auch als Sickerlaugung bezeichnet
Planungseinheit	Eine Planungseinheit ist ein bestimmter Bereich oder eine räumliche Einheit, für die ein zusammenhängender Bewirtschaftungsplan erstellt wird, um die nachhaltige Nutzung und den Schutz der Ressource Wasser sicherzustellen. Es erfolgt eine Unterteilung der Einzugsgebiete in kleinere, regionale und somit besser handhabbare Planungseinheiten für die Maßnahmenplanung.
physiografische Daten	Physiografische Daten beschreiben die Beschaffenheit der Erdoberfläche.
QSim	Das Gewässergütemodell QSim (Quality Simulation) ist ein Instrument zur Simulation und Prognose des Stoffhaushalts und der Planktondynamik von Fließgewässern.
Richards-Gleichung	Die Richards-Gleichung nach Lorenzo A. Richards (1904–1993), beschreibt die Sickerströmung eines Fluids (z. B. Wasser oder Öl) in einem porösen Medium (z. B. dem Erdboden). Das Fluid kann sich in einem ungesättigten Zustand befinden, d. h. neben dem Fluid kann sich auch Luft in den Poren des Mediums befinden.

RODOS	Real-time Online Decision Support System ist ein softwaregestütztes Entscheidungshilfe- und Prognosemodell, das für einen radiologischen Notfall die Berechnung der zukünftigen Umweltkontamination und der zu erwartenden Dosen der betroffenen Personen ermöglicht. Diese Definition wurde zuletzt in der 330. Sitzung der SSK am 29./30. Januar 2024 geprüft.
Routing	In der Hydrologie ist das Routing eine Technik, mit der die Formänderungen eines Hydrographen vorhergesagt werden, wenn sich Wasser durch einen Flusskanal oder ein Reservoir bewegt).
Runoff-Prozesse	Runoff-Prozesse sind Prozesse, durch die Niederschlagswasser auf oder unter der Landoberfläche aus einem Einzugsgebiet abgeleitet wird und durch die Radionuklide und andere Stoffe transportiert werden. Diese Definition wurde zuletzt in der 339. Sitzung der SSK am 27./28. Oktober 2025 geprüft. (https://glossar-ssk.de/index.php?title=Runoff-Prozesse)
Saint-Venant-Strömungsgleichung	Die Saint-Venant-Strömungsgleichung ist ein Gleichungssystem für die Berechnung von Durchfluss und Wasserstand in einem Gerinne bei allmählich veränderlicher instationärer Wasserführung (Gerinneströmung). Es besteht aus der Kontinuitätsgleichung: $\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$ wobei *Q* den Durchfluss, *A* den durchflossenen Fließquerschnitt, *s* die Weglänge und *t* die Zeiteinheit darstellen, und der Energiegleichung: $\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial s} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial s} + g \cdot (J_s + J_v) = 0.$ Dabei ist *v* die Fließgeschwindigkeit, *g* die Erdbeschleunigung, *h* die Wasserhöhe, J_s das Sohlgefälle und J_v das Reibungsgefälle. Die Glieder $(\partial v/\partial t)$ und $v \cdot (\partial v/\partial s)$ beschreiben die lokale und die konvektive Beschleunigung (Trägheitsglieder), der Term $g \cdot (\partial h/\partial s)$ das Druckglied. Diese Gleichungen bilden die Grundlagen für die hydraulischen Berechnungsverfahren des Hochwasserwellenablaufs in Flüssen (Floodrouting-Verfahren). (Quelle: https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/saint-venant-gleichungen/13888)

Schwebfracht	Schwebfracht (oder Suspensionsfracht) sind feinste Sedimentpartikel, die aufgrund ihrer Korngröße und Dichte und in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit in einer Wassersäule schweben. Selbst bei sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten verbleiben Tonminerale als Schwebfracht in Suspension, während Siltkörnchen bereits zu Boden sinken. (Quelle: Lexikon der Geowissenschaften, https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/suspensionsfracht/16122)
Standgewässer	Standgewässer oder Stillgewässer sind oberirdisches Gewässer mit stehendem oder nahezu stehendem Wasser.
Transportmechanismen über den Wasserpfad	Die Transportmechanismen über den Wasserpfad sind Mechanismen, durch welche die im Wasser enthaltenen Stoffe mittransportiert werden: die Advektion (Verfrachtung von Schadstoffen mit dem strömenden Wasser) und die Dispersion sowie die Diffusion (die Vermischung der Wasserinhaltsstoffe). Zusammen mit den abiotischen und biotischen Vorgängen (chemische Reaktionen, biotischer Abbau und Metabolisierung) führen diese Transportmechanismen zu den Massen- und damit Konzentrationsänderungen der mittransportierten Stoffe. Diese Definition wurde zuletzt in der 340. Sitzung der SSK am 11./12. Dezember 2025 geprüft. (In Anlehnung an Trapp, S., Matthies, M. (1996). Transport- und Transformationsprozesse. In: Dynamik von Schadstoffen — Umweltmodellierung mit CemoS. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79775-0_3)
Vorereigniswasser	Vorereigniswasser (Synonym pre-event water, altes Wasser, Altwasser) ist Wasser, das vor dem auslösenden Niederschlag oder vor der Schneeschmelze im Boden (Bodenwasser- oder Grundwasserspeicher) des Einzugsgebietes gespeichert war und als Folge eines Niederschlagsereignisses entweder als returnflow auf der Landoberfläche oder als Abfluss im Uferbereich eines Fließgewässers austritt. Je nach Gebietscharakteristika und hydrologischen Randbedingungen liegt der Anteil des „Altwassers“ für ein einzelnes Niederschlagsereignis in der Größenordnung von mindestens 50 % bis über 80 %. (Quelle: https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/vorereigniswasser/17735)

Vorfluter	Ein Vorfluter ist ein natürliches oder künstliches Gewässer (Wasserlauf), der Wasser und Abwasser (gereinigt oder ungereinigt) aufnimmt und weiterleitet. (Quelle: https://wasser-lexikon.de/vorfluter/)
Wellenablaufmodell	Ein Wellenablaufmodell ist ein hydrologisches Modell zur Beschreibung des Ablaufes von Hochwasserwellen in einer Flussstrecke. Grundlage sind die Saint-Venant-Gleichungen. Da diese in geschlossener Form nicht integrierbar sind, werden zu ihrer Lösung numerische Methoden, d.h. explizite oder implizite Charakteristiken- oder Differenzenverfahren eingesetzt. Der Rechenaufwand ist dabei erheblich. Diese Modelle werden bei Flüssen und Kanälen mit bedeutenden Rückstaueffekten eingesetzt. Die Vernachlässigung der Trägheitsglieder in den Saint-Venant-Gleichungen führt zu dem Diffusionswellenansatz (Diffusionswelle), die Vernachlässigung der Trägheitsglieder und des Druckgliedes zum kinematischen Wellenansatz (kinematische Welle). Diese Modelle werden für Stofftransportuntersuchungen und zur Untersuchung von Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen in das Flusssystem eingebracht. (Quelle: https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/wellenablaufmodell/18122)

11 Literatur

Alexakhin et al. 2007 — Alexakhin RM, Sanzharova NI, Fesenko SV, Spiridonov SI, Panov AV. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts. Health Phys. 2007 Nov;93(5):418-26, doi: 10.1097/01.HP.0000285093.63814.b7

Arnault et al. 2018 — Arnault J, Rummler T, Baur F, Lerch S, Wagner S, Fersch B, Zhang ZY, Kerandi N, Keil C, Kunstmann H. Precipitation Sensitivity to the Uncertainty of Terrestrial Water Flow in WRF-Hydro: An Ensemble Analysis for Central Europe. Journal of Hydrometeorology. 2018 Jun;19(6):1007-25, doi: 10.1175/Jhm-D-17-0042.1

Ashby und Falgout 1996 — Ashby SF, Falgout RD. A Parallel Multigrid Preconditioned Conjugate Gradient Algorithm for Groundwater Flow Simulations. Nuclear Science and Engineering. 1996 1996/09/01;124(1): 145-59, doi: 10.13182/NSE96-A24230

Bezhenar et al. 2016a — Bezhenar R, Heling R, Ievdin I, Iosjpe M, Maderich V, Willemsen S, de With G, Dvorzhak A. Integration of marine food chain model POSEIDON in JRODOS and testing versus Fukushima data. Radioprotection. 2016a 12/01;51, doi: 10.1051/radiopro/2016050

Bezhenar et al. 2016b — Bezhenar R, Tae-Jung K, Maderich V, Willemsen S, de With G, Qiao F-L. Transfer of radiocaesium from contaminated bottom sediments to marine organisms through benthic food chains in post-Fukushima and post-Chernobyl periods. Biogeosciences. 2016b 05/23;13:3021-30134, doi: 10.5194/bg-13-3021-2016

BMUV 2023 — Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Allgemeine Verwaltungsvorschrift für einen Allgemeinen Notfallplan des Bundes nach § 98 des Strahlenschutzgesetzes (ANoPl-Bund) vom 10. November 2023. Bekanntmachung im BAnz AT 23.11.2023 B1

Charette et al. 2013 — Charette MA, Breier CF, Henderson PB, Pike SM, Rypina II, Jayne SR, Buesseler KO. Radium-based estimates of cesium isotope transport and total direct ocean discharges from the Fukushima Nuclear Power Plant accident. Biogeosciences. 2013;10(3):2159-67, doi: 10.5194/bg-10-2159-2013

Cunge et al. 1980 — Cunge JA, Holly FMJ, Verwey A. Practical Aspects Computational River Hydraulics. Pitman Advanced Publishing Program, 1980, ISBN 9780273084426

Fersch et al. 2020 — Fersch B, Senatore A, Adler B, Arnault J, Mauder M, Schneider K, Völksch I, Kunstmann H. High-resolution fully coupled atmospheric–hydrological modeling: a cross-compartment regional water and energy cycle evaluation. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020;24(5):2457-81, doi: 10.5194/hess-24-2457-2020

Fesenko et al. 2002 — Fesenko SV, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Anisimov VS, Aleksakhin RM. Simulation of 137Cs Migration over the Soil–Plant System of Peat Soils Contaminated after the Chernobyl Accident. Russian Journal of Ecology. 2002 May-Jun;33(3):170-7, doi: 10.1023/a:1015475406815

Fohrer et al. 2016 — Fohrer N, Bormann H, Miegel K, Casper M, Schumann A, Bronstert A, Weiler M. Hydrologie. Seiten 320pp. Utb Basics, Haupt Verlag, Bern, Switzerland, 2016

Gochis et al. 2020 — Gochis D, Dugger A, Barlage M, Cabell R, FitzGerald K, McAllister M, McCreight J, RafieeiNasab A, Read L, Sampson K, Yates D, Zhang Y. The WRF-Hydro® modeling system technical description (Version 5.2.0). https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/projects/wrf-hydro/technical-description-user-guide/wrf-hydrov5.2technicaldescription.pdf

He et al. 2023 — He C, Valayamkunnath P, Barlage M, Chen F, Gochis D, Cabell R, Schneider T, Rasmussen R, Niu GY, Yang ZL, Niyogi D, Ek M. Modernizing the open-source community Noah with multi-parameterization options (Noah-MP) land surface model (version 5.0) with enhanced modularity, interoperability, and applicability. Geosci. Model Dev. 2023;16(17):5131-51, doi: 10.5194/gmd-16-5131-2023

Johannessen et al. 2010 — Johannessen O, Volkov V, Pettersson L, Maderich V, Zheleznyak M, Gao Y, L.P B, Stepanov A, I.A N, V T, Nielsen S. Radioactivity and Pollution in the Nordic Seas and Arctic Region. Observations, Modelling and Simulations. 2010, ISBN 978-3-540-24232-1

Jones und Woodward 2001 — Jones JE, Woodward CS. Newton–Krylov-multigrid solvers for large-scale, highly heterogeneous, variably saturated flow problems. Advances in Water Resources. 2001 2001/07/01/;24(7): 763-74, doi: https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00075-0

Kato et al. 2015 — Kato I, Young A, Liu J, Abrams J, Bock C, Simon M. Electric Blanket Use and Risk of Thyroid Cancer in the Women's Health Initiative Observational Cohort. Women Health. 2015;55(7):829-41, doi: 10.1080/03630242.2015.1050545, Epub 2015/05/23

Khanbilvardi et al. 1999 — Khanbilvardi R, Shestopalov V, Onishchenko I, Bublyas V, Gudzenko V. Role of erosion processes in transfer of radionuclides: Results of field experiments. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 1999 08/01;35:887-98, doi: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb04182.x

Kivva et al. 2015 — Kivva S, Zheleznyak M, Konoplev A, Nanba K, Onda Y, Yoshifumi W. Distributed modeling of radiocesium washoff from the experimental watershed plots of the Fukushima fallout zone. Geophysical Research Abstracts Vol. 17, EGU2015-12458, 2015. 2015

Kivva et al. 2020 — Kivva S, Zheleznyak M, Pylypenko O, Yoschenko V. Open Water Flow in a Wet/Dry Multiply-Connected Channel Network: A Robust Numerical Modeling Algorithm. Pure and Applied Geophysics. 2020 2020/07/01;177(7):3421-58, doi: 10.1007/s00024-020-02416-0

Kivva et al. 2021 — Kivva S, Zheleznyak M, Bezhenar R, Pylypenko O, Sorokin M, Demydenko A, Kanivets V, Laptev G, Votsekhovich O, Boyko V, Gudkov D. Modeling of major environmental risks for the Kyiv city, Ukraine from the Dnieper river waters - inundation of coastal areas and contamination by the radionuclides deposited in bottom sediments after the Chornobyl accident. EGU General Assembly Conference Abstracts, April 01, 2021. p. EGU21-13038

Kollet und Maxwell 2006 — Kollet SJ, Maxwell RM. Integrated surface–groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. Advances in Water Resources. 2006 2006/07/01/;29(7):945-58, doi: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.08.006

Konoplev 2022 — Konoplev A. Fukushima and Chernobyl: Similarities and Differences of Radiocesium Behavior in the Soil-Water Environment. Toxics. 2022 Sep 30;10(10):578, doi: 10.3390/toxics 10100578, Epub 20220930

Konoplev et al. 2023 — Konoplev A, Wakiyama Y, Igarashi Y, Nanba K. Fate and Transport of Fukushima-Derived Radiocesium in the Environment: Key Findings and Challenges for the Future. International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences. 2023 11/09;13(04), doi: 10.26502/ijpaes.4490154

Kumar et al. 2013 — Kumar R, Samaniego L, Attinger S. Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations. Water Resources Research. 2013 January 01, 2013;49:360-79, doi: 10.1029/2012wr012195

Maniak 2016 — Maniak U. Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure. Springer Berlin Heidelberg, 2016, ISBN 978-3-662-49086-0

Margvelashvily et al. 1997 — Margvelashvily N, Maderich V, Zheleznyak M. THREETOX - A Computer Code to Simulate Three-Dimensional Dispersion of Radionuclides in Stratified Water Bodies. Radiation Protection Dosimetry. 1997 09/01;73:177-80, doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032128

Maxwell 2013 — Maxwell RM. A terrain-following grid transform and preconditioner for parallel, large-scale, integrated hydrologic modeling. Advances in Water Resources. 2013 2013/03/01/;53: 109-17, doi: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.10.001

Nagao et al. 2013 — Nagao S, Kanamori M, Ochiai S, Tomihara S, Fukushi K, Yamamoto M. Export of 134Cs and 137Cs in the Fukushima river systems at heavy rains by Typhoon Roke in September 2011. Biogeosciences Discussions. 2013 02/01;10:2767-90, doi: 10.5194/bgd-10-2767-2013

Onda et al. 2020 — Onda Y, Taniguchi K, Yoshimura K, Kato H, Takahashi J, Wakiyama Y, Coppin F, Smith H. Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems. Nature Reviews Earth & Environment. 2020 2020/12/01;1(12): 644-60, doi: 10.1038/s43017-020-0099-x

Rummler et al. 2022 — Rummler T, Wagner A, Arnault J, Kunstmann H. Lateral terrestrial water fluxes in the LSM of WRF-Hydro: Benefits of a 2D groundwater representation. Hydrological Processes. 2022;36(3):e14510, doi: https://doi.org/10.1002/hyp.14510

Samaniego et al. 2010 — Samaniego L, Kumar R, Attinger S. Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. Water Resources Research. 2010;46(5), doi: https://doi.org/10.1029/2008WR007327

SSK 1988 — Strahlenschutzkommission (SSK). Radionuklide in Wasser-Schwebstoff-Sediment-Systemen und Abschätzung der Strahlenexposition. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 09, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1988, ISBN ISBN 3-437-11196-5

Steinhauser et al. 2014 — Steinhauser G, Brandl A, Johnson TE. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. Science of The Total Environment. 2014 2014/02/01/;470-471:800-17, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.029, Epub 20131102

Storck et al. 1998 — Storck P, Bowling L, Wetherbee P, Lettenmaier D. Application of a GIS-based distributed hydrology model for prediction of forest harvest effects on peak stream flow in the Pacific Northwest. Hydrological Processes. 1998 May 01, 1998;12(6): 889-904, doi: 10.1002/(sici)1099-1085(199805)12:6<889::Aid-hyp661>3.0.Co;2-p

Taniguchi et al. 2019 — Taniguchi K, Onda Y, Smith HG, Blake W, Yoshimura K, Yamashiki Y, Kuramoto T, Saito K. Transport and Redistribution of Radiocesium in Fukushima Fallout through Rivers. Environmental Science & Technology. 2019 2019/11/05;53(21): 12339-47, doi: 10.1021/acs.est.9b02890

Thober et al. 2019 — Thober S, Cuntz M, Kelbling M, Kumar R, Mai J, Samaniego L. The multiscale routing model mRM v1.0: simple river routing at resolutions from 1 to 50 km. Geosci. Model Dev. 2019;12(6): 2501-21, doi: 10.5194/gmd-12-2501-2019

TrinkwEGV 2023 — Verordnung über Einzugsgebiete von Entnahmestellen für die Trinkwassergewinnung (Trinkwassereinzugsgebieteverordnung - TrinkwEGV) vom 4. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 346)"

Tsumune et al. 2013 — Tsumune D, Tsubono T, Aoyama M, Uematsu M, Misumi K, Maeda Y, Yoshida Y, Hayami H. One-year, regional-scale simulation of ^{137}Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Biogeosciences. 2013;10(8):5601-17, doi: 10.5194/bg-10-5601-2013

Ueda et al. 2013 — Ueda S, Hasegawa H, Kakiuchi H, Akata N, Ohtsuka Y, Hisamatsu Si. Fluvial discharges of radiocaesium from watersheds contaminated by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan. J Environ Radioactiv. 2013 2013/04/01/; 118:96-104, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.11.009, Epub 20121227

UNESCO 2022 — UNESCO. 2022. An introduction to the UNESCO Recommendation on Open Science. In. UNESCO

Wigmosta et al. 1994 — Wigmosta MS, Vail LW, Lettenmaier DP. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. Water Resources Research. 1994;30(6):1665-79, doi: https://doi.org/10.1029/94WR00436

Yin et al. 2020 — Yin D, Xue ZG, Gochis DJ, Yu W, Morales M, Rafieeinasab A. A Process-Based, Fully Distributed Soil Erosion and Sediment Transport Model for WRF-Hydro. Water. 2020;12(6):1840

Yoshikawa et al. 2014 — Yoshikawa N, Obara H, Ogasa M, Miyazu S, Harada N, Nonaka M. Cs-137 in irrigation water and its effect on paddy fields in Japan after the Fukushima nuclear accident. The Science of the total environment. 2014 03/03;481C:252-9, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.129

Zheleznyak et al. 2022 — Zheleznyak M, Kivva S, Pylypenko O, Sorokin M. Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. In: Nanba K, Konoplev A, Wada T, Hrsg. Behavior of Radionuclides in the Environment III: Fukushima Springer Singapore, Singapore, 2022, Seiten 199-252, ISBN 978-981-16-6799-2