

Anlage 23 Fachgutachten zu Tritiumimmissionen

Anlage 23.2 Weiterentwicklung des Tritium- Bilanzmodells der Deponie Ihlenberg

Bericht

„Weiterentwicklung des Tritium-Bilanzmodells der Deponie Ihlenberg“

Projekt-Nr.: MV037-13 Kurztitel: Selmsdorf, T-Modell 2020

Auftraggeber: IAG – Ihlenberger Abfallentsorgungsgesellschaft mbH
Ihlenberg 1
23923 Selmsdorf

Bestellnummer: K2/500/005/19

Auftragnehmer: Nuclear Control & Consulting GmbH
Hinter dem Turme 24
38114 Braunschweig

Revision Rev 0

Bearbeiter Dr. Rainer Gellermann E-Mail: rainer.gellermann@nuclear-cc.de

Ort, -datum: Braunschweig, den 09.09.2020

Bestätigt / Freigegeben: 

Dr. Klaus Flesch
(Niederlassungsleiter)

Inhalt

1	Vorgang, Aufgabenstellung	5
2	Systembeschreibung	6
2.1	Deponiekörper	6
2.2	Sickerwasserfassung und Sickerwasserbehandlung	7
2.3	Überwachung der Ableitungen	9
3	Datenzusammenstellung	10
3.1	Datengrundlagen	10
3.2	Tritium im Permeat	10
3.3	Ergebnisse von Sickerwasseruntersuchungen in der Deponie	14
3.4	Oberflächengewässer außerhalb der Deponie.....	15
3.5	Grundwasser	18
4	Bisherige Modelle	20
5	Weiterentwicklung der Modelle	23
5.1	Modellansätze	23
5.2	Ein-Box-Modell	24
5.2.1	Modellbeschreibung	24
5.2.2	Modellanwendung	25
5.3	Zwei-Box-Modell.....	26
5.3.1	Grundkonzept.....	26
5.3.2	Modellierung Box 1 (Black-Box-Ansatz).....	27
5.3.3	Modellierung Box2 (Black-Box-Ansatz).....	28
5.4	Numerisches Bilanzmodell	29
5.5	Bewertung der Modellergebnisse	32
6	Radioökologische Dosisabschätzungen	34
6.1	Bezug.....	34
6.2	Einwirkstellen und Verdünnungsfaktoren	34
6.3	Referenzpersonen	35
6.4	Expositionspfade	35
6.5	Modellgleichungen.....	36
6.6	Ergebnisse.....	38
7	Literatur	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Luftbild der Deponie Ihlenberg (Blickrichtung SW – NE). Die rote Ellipse kennzeichnet (grob) den derzeit zur Ablagerung von Abfällen genutzten Bereich des Deponiekörpers. (Bildquelle: IAG)	6
Abbildung 2-2:	Bereiche der Basisentwässerung von Deponieabschnitten (farbig schraffiert und nummeriert) und Messpunkte (blau) zu Überwachung der Oberflächenwässer auf der Deponie Ihlenberg (Bildquelle: IAG)	7
Abbildung 2-3:	Schematische Übersicht zur Sickerwasserfassung und Sickerwasserbehandlung. Die gestrichelte Linie markiert den Rand des Systems Deponie.....	8
Abbildung 3-1:	Ableitmengen Permeat (bis Dezember 2019) mit markierten Zeitpunkten der Probenahme (PN) von Tritiumproben durch IAG und LUNG	10
Abbildung 3-2:	Zeitlicher Verlauf der bis Juni 2020 gemessenen Tritiumkonzentrationen im Permeat und zugehörige Modellkurven nach Modellen aus [1].....	12
Abbildung 3-3:	Zeitlicher Verlauf der mit dem Permeat abgeleitete Tritiumfracht (bis Dezember 2019).....	13
Abbildung 3-4:	Modellanalyse zum gemessenen Peak im August 2018 für den Zeitraum August bis Dezember 2018	13
Abbildung 3-5:	Tritium im Sickerwasser von Deponieabschnitten.....	15
Abbildung 3-6:	Gewässersystem im Abstrom der Permeat-Einleitstelle „(1)“ mit Angaben zu Tritiumkonzentrationen zum Stichtag 23.10.2019	16
Abbildung 3-7:	Grundwassermessstellen im Nahbereich der Deponie Ihlenberg. Die Pfeile verweisen auf die beiden im Text beschriebenen Messtellen (Bildquelle: IAG)	18
Abbildung 3-8:	Zeitlicher Verlauf der Tritiumkonzentration in den Messstellen GW50/GW603	19
Abbildung 4-1:	Zeitliche Veränderung der Tritiuminventare in der Deponie und daraus mit einem linearen Ansatz errechnete Tritiumkonzentrationen im Permeat. Erläuterungen s. Text.....	22
Abbildung 5-1:	Messwerte und Modellkurve der Modellvariante A-2a	26
Abbildung 5-2:	Modellkurven zur Anpassung der Messwerte ab 2014 als Austräge aus einer Box1 (Erläuterungen s. Text).....	27
Abbildung 5-4:	Modellkurven zur Anpassung der Messwerte 2011 - 2013 als Zumischung einer Box2 mit hohen Tritiumkonzentrationen (Erläuterungen s. Text).....	29
Abbildung 5-5:	Ergebnisse der Modellrechnungen zum numerischen Boxmodell (Fortsetzung nächste Seite).....	30
Abbildung 6-1:	Relative Dosisbeiträge von Produkten	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Messwerte von Tritium im abgeleiteten Permeat	11
Tabelle 3-2:	Messergebnisse von Tritium in Sickerwässern auf der Deponie.....	14

Tabelle 3-3:	Mittelwerte von Tritium in Sickerwässern und zugehörige Messwerte von Tritium im Permeat	15
Tabelle 3-4:	Messwerte von Tritium (H-3) in Oberflächengewässern. Messpunkte (1) bis (7) nach Abbildung 3-6.....	16
Tabelle 3-5:	Mischungsanteile von Permeat in Oberflächengewässern im Abstrom der Permeat-Einleitstelle.....	17
Tabelle 5-1:	Modellparameter für die besten Fits des Modells A	26
Tabelle 5-2:	Parameterwerte zur Modellierung eines „schnellen“ Tritiumaustrags aus einer Box2	28
Tabelle 5-3:	Abschätzung von zugeführten Tritiumaktivitäten seit Januar 2011	32
Tabelle 6-1:	Dosiskoeffizienten von Tritium in Wassermolekülen (HTO) und als organisch gebundenes Tritium (OBT)	35
Tabelle 6-2:	Mittlere Verzehrraten der Referenzperson von pflanzlichen und tierischen Lebensmitteln in kg/a und anzuwendender Faktor zur Abdeckung des 95 % Perzentils nach Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV.....	36
Tabelle 6-3:	Modellvarianten.....	39
Tabelle 6-4:	Modellergebnisse für Referenzpersonen von der Kategorie „Bevölkerung“	39

Anlagen

Anlage 1	Daten der Eigenüberwachung
Anlage 1.1a	Tritium im Permeat
Anlage 1.1b	Tritium in Oberflächengewässern
Anlage 1.2	Tritium im Deponiesickerwasser
Anlage 1.3	Tritium im Grundwasser
Anlage 1.4	Ableitmengen Permeat
Anlage 2	Musterdokumentation Bilanzmodell
Anlage 3	Musterdokumentation Basisvariante Dosis

1 Vorgang, Aufgabenstellung

Im NCC-Bericht „Radioökologische Untersuchung zum Tritium im Deponiesickerwasser der Deponie Ihlenberg“ [1] wurden die bis 2016 vorliegenden Messergebnisse aus der Überwachung des abgeleiteten gereinigten Sickerwassers untersucht und bewertet. In dem genannten Bericht wurde auch ein Boxmodell zur Tritiumbilanz und zur Abschätzung des Tritiuminventars der Deponie Ihlenberg entwickelt.

Tritium (wissenschaftliche Symbole H-3, T) ist neben Protium („H-1“) und Deuterium (H-2, D) ein natürlich vorkommendes radioaktives Isotop des Wasserstoffs. Es wird durch die kosmische Strahlung in der Erdatmosphäre gebildet und kommt bezogen auf die Stoffmenge Wasserstoff des Wasserkreislaufs in Spuren von ca. 10^{-16} % in der Natur vor. Im Wasser liegt Tritium überwiegend als Tritium-Wasser (HTO) vor. Organisch gebundenes Tritium (abgekürzt OBT) kommt im Wasser vor, wenn organische Kohlenwasserstoffe mit Tritium in Gewässer eingeleitet werden. Es entsteht auch im Gewebe von Lebewesen (wie Fischen), wenn diese in tritiumhaltigen Wässern leben.

Die radioaktive Halbwertszeit von Tritium beträgt 12,35 Jahre. Der Zerfall erfolgt als niedrig-energetischer β -Zerfall ($E_{\max} = 18,6$ keV). Aufgrund dieser geringen Energie der β -Teilchen sind die Dosiskoeffizienten für die innere Strahlenexposition auch im Vergleich zu anderen Dosiskoeffizienten von Betastrahlern relativ klein. Tritium trägt nicht zur äußeren Strahlenexposition, auch nicht über eine Hautdosis bei.

In [1] wurde die aus Ableitungen der Deponie Ihlenberg resultierende Dosis mittels radioökologischer Modelle abgeschätzt. Die Modellierung ergab, dass bei Säuglingen (Kleinkinder unter 1 Jahr) die höchsten jährlichen Dosen auftreten können und für das Jahr 2015 bei ca. 1 Mikrosievert (μSv) lagen. Der Hauptbeitrag dieser strahlenschutzfachlich unbedeutenden Dosis ergab sich durch den Verzehr von Muttermilch.

Da inzwischen weitere umfangreiche Messungen von Tritium an Wasserproben vorgenommen wurden, beauftragte die IAG die Nuclear Control & Consulting GmbH (NCC) mit der Weiterentwicklung der Modelle auf der Grundlage neuerer Messbefunde.

2 Systembeschreibung

2.1 Deponiekörper

Das Betriebsgelände der IAG umfasst eine Fläche von 165 ha, von denen 113 ha als Deponiefläche genutzt werden können. Ein Luftbild des Deponiekörpers zeigt Abbildung 2-1. Man erkennt, dass Teile des Deponiekörpers im Norden und Nordosten inzwischen abgedeckt und begrünt sind. Offene Deponieabschnitte befinden sich im zentralen und südlichen Bereich der Deponie.



Abbildung 2-1: Luftbild der Deponie Ihlenberg (Blickrichtung SW – NE). Die rote Ellipse kennzeichnet (grob) den derzeit zur Ablagerung von Abfällen genutzten Bereich des Deponiekörpers. (Bildquelle: IAG)

Ein Lageplan, in dem die Einzugsflächen der Basisentwässerung von Deponieabschnitten (im Weiteren „Entwässerungsabschnitte“) dargestellt und für die Auswertungen in diesem Bericht vom nördlichsten Abschnitt im Uhrzeigersinn umlaufend nummeriert sind, zeigt Abbildung 2-2.

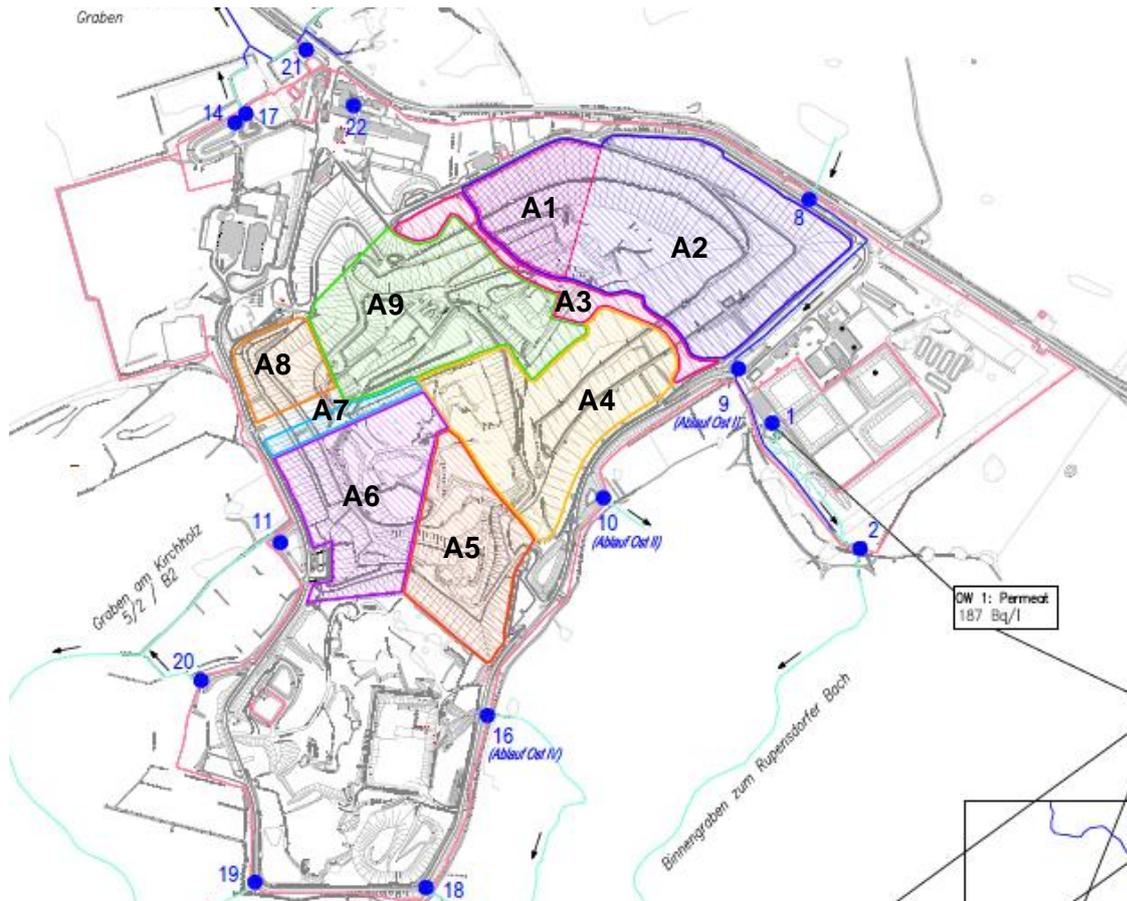


Abbildung 2-2: Bereiche der Basisentwässerung von Deponieabschnitten (farbig schraffiert und nummeriert) und Messpunkte (blau) zu Überwachung der Oberflächenwässer auf der Deponie Ihlenberg (Bildquelle: IAG)

2.2 Sickerwasserfassung und Sickerwasserbehandlung

Da eine Versickerung des auf die Deponie Ihlenberg fallenden Niederschlagswassers zum einen aufgrund der geologischen Struktur des Untergrundes zum anderen durch technische Systeme der Basisdichtung zum Schutz des Grundwassers und Bodens wirksam unterbunden wird, muss das anfallende Sickerwasser gesammelt und abgeleitet werden.

Ein schematisches Bild der Sickerwasserfassung und Sickerwasserbehandlung zeigt Abbildung 2-3.

Soweit Niederschläge in die noch nicht abgedeckten Teile des Deponiekörpers einsickern, werden die Sickerwässer in einem Drainagesystem an der Basis der Deponie gefasst und über Leitungen in Sickerwasserspeicherbecken mit Schwimmbdeckung gepumpt. In den Speicherbecken werden Zuflüsse unterschiedlicher Drainagebereiche zusammengeführt und damit homogenisiert. Außerdem kommt es zur Belüftung.

Im Speicherbecken wurden in den vergangenen Jahren abhängig von den Mengen des anfallenden Sickerwassers zwischen 50.000 bis 80.000 m³ eingestapelt.

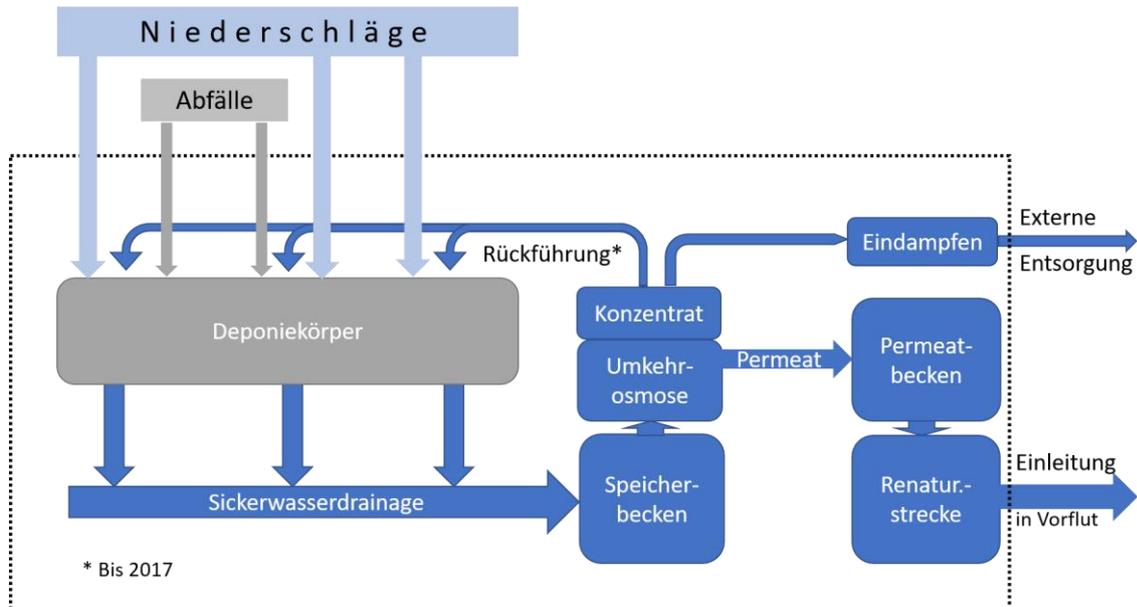


Abbildung 2-3: Schematische Übersicht zur Sickerwasserfassung und Sickerwasserbehandlung. Die gestrichelte Linie markiert den Rand des Systems Deponie.

Beim Abpumpen des Wassers der Sickerwasserspeicherbecken werden Feinstkornanteile ausgefiltert und das Sickerwasser in die Umkehrosmose-Anlage verbracht. In dieser Anlage werden Schadstoffe so effektiv aus dem Wasser entfernt, dass das dabei entstehende Reinwasser (Permeat) fast destilliertem Wasser entspricht. Da allerdings das Wasserstoffisotop Tritium ein Bestandteil der Wassermoleküle ist, wird es durch die Reinigung nicht bzw. nur im Maßstab von geringem Isotopieeffekten zurückgehalten. Die Tritiumkonzentration im Permeat und im Konzentrat sind daher praktisch gleich.

Vor der Ableitung in die Umwelt durchläuft das Reinwasser noch ein Permeatbecken sowie eine Renaturierungsstrecke bestehend aus drei Schönungsteichen. Nach einer Verweilzeit von mehreren Wochen wird das gereinigte, schadstofffreie Wasser kontrolliert an den natürlichen Vorfluter abgegeben.

Bis Juni 2017 wurde das in der Umkehrosmose anfallende Sickerwasserkonzentrat konditioniert und auf die Deponie rückgeführt. Seit Juli 2017 wird das entstehende Sickerwasserkonzentrat eingedampft und als Eindampfkonzentrat extern entsorgt. Nur ein geringer Teil des Eindampfkonzentrats wird noch zur Ascheeinbindung verwendet.

Das Tritiuminventar der Deponie umfasst alles Tritium, das in den in Abbildung 2-3 eingezeichneten Kompartimenten der Deponie vorhanden ist und Kontakt zum Sickerwasser hat, unabhängig davon ob es sich „ruhend“ in Deponieabschnitten befindet oder dynamisch im Prozess der Sickerwasserbehandlung innerhalb der Deponie bewegt wird.

Das Tritiuminventar wird zum einen durch die Ableitung von Permeat in die Vorflut verringert. Die externe Entsorgung von Eindampfkonzentrat trägt nur mit der darüber abgegebenen, relativ geringen Wassermenge zur Abnahme des Tritiuminventars bei. Der einzige Prozess, der innerhalb der Deponie das Inventar von Tritium abnehmen lässt, ist der radioaktive Zerfall.

Bei allen technischen Prozessen, bei denen die Verweilzeit in den Anlagen sehr viel kürzer als die Halbwertszeit von Tritium (12,4 Jahre) ist, bleibt die Tritiumkonzentration trotz des radioaktiven Zerfalls praktisch konstant.

Die Zufuhr von Tritium über den Niederschlag erfolgt mit einer Konzentration von ca. 1 Bq/l. Diese Konzentration liegt derzeit so weit unter den Tritiumkonzentrationen im Sickerwasser der Deponie, dass sie vernachlässigt werden kann. Nicht außer Acht gelassen werden kann die Deponierung von Abfällen, für die grundsätzlich weder ausgeschlossen noch praktikabel kontrolliert werden kann, dass sie technogenes Tritium enthalten, da Konsumgüter mit Tritium auch für die allgemeine Bevölkerung verfügbar waren und verfügbar sind.

2.3 Überwachung der Ableitungen

Die Überwachung der Sickerwässer hinsichtlich der Tritiumkonzentrationen und der damit ggf. in Verbindung stehenden Einflüsse auf die Umgebung erfolgt in einem mehrstufigen System:

- Sickerwasser auf der Deponie
- Tritium im abgeleiteten Reinwasser
- Tritium im Gewässersystem
- Tritium im Grundwasser

Die Messstellen, die zur Überwachung des Permeats und der Oberflächenwässer im Nahbereich der Deponie errichtet wurden, sind in Abbildung 2-2 dargestellt. Messpunkt 1 (OW1) ist eine Probenahmestelle für die Ermittlung der Einleitqualität und erfasst das gereinigte Deponiesickerwasser (Permeat), das das Permeatbecken schon durchlaufen hat. Auf diesen Messpunkt bezieht sich das Modell des Tritiumaustrags aus der Deponie (s. Kapitel 4 und Kapitel 5).

3 Datenzusammenstellung

3.1 Datengrundlagen

Die in diesem Bericht ausgewerteten Daten umfassen alle Messwerte des Parameters Tritium, die seit 2011 an Proben, die von Mitarbeitern der IAG oder von beauftragte Probenehmern entnommen wurden in einem akkreditierten Labor ermittelt wurden. Diese Daten der Eigenüberwachung der IAG sind in Anlage 1 getrennt nach den beprobten Systemen zusammengestellt. Weitere Probenahmen und Messungen wurden von der Landesmessstelle des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) ausgeführt. Im vorliegenden Bericht werden vorrangig die Messergebnisse von Proben, die aus Ableitungen der Deponie und dem angrenzenden Gewässersystem stammen, ausgewertet.

3.2 Tritium im Permeat

Angaben zur Menge des monatlich abgeleiteten Permeats (bis Ende 2019) sind in Anlage 1.4 aufgeführt. Eine Darstellung dieser Daten (s. Abbildung 3-1) zeigt, dass vor allem 2019 eine deutliche Reduzierung bei gleichzeitiger Verringerung der Schwankungsbreite eingetreten ist. Während im Zeitraum 2012/13 die monatliche Ableitmenge an Permeat noch bei etwa 10.000 m³ lag reduzierte sie sich in den folgenden Jahren (mit einem erheblichen innerjährlichen Gang) auf ca. 7000 m³ und betrug im Jahr 2019 etwa 4500 m³. Nach Angaben der IAG hat vor allem die großflächige Abdeckung des Deponiekörpers zu einem reduzierten Anfall von Sickerwasser geführt. Die innerjährlichen Schwankungen sind vor allem durch Witterungseinflüsse bedingt.

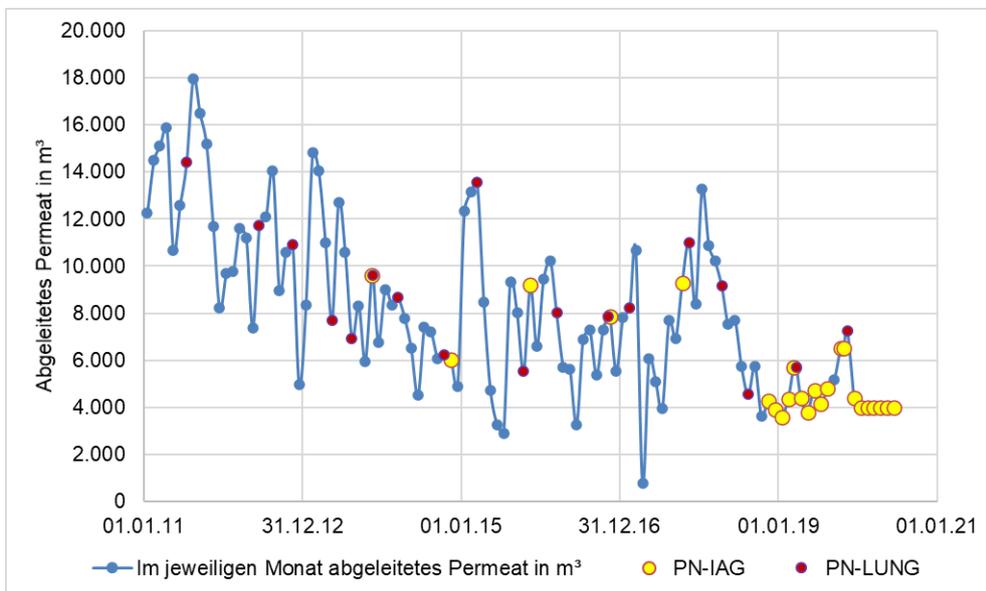


Abbildung 3-1: Ableitungen Permeat (bis Dezember 2019) mit markierten Zeitpunkten der Probenahme (PN) von Tritiumproben durch IAG und LUNG

Das gereinigte Deponiesickerwasser (Permeat) wurde seit 2011 jährlich mindestens zwei Mal hinsichtlich Tritium untersucht. Die Ergebnisse der Eigenüberwachung der IAG sind in Anlage 1.1 dokumentiert. Der um die Messergebnisse des LUNG ergänzte Datensatz aller Messergebnisse (ohne Messunsicherheit) ist in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Messwerte von Tritium im abgeleiteten Permeat

Datum PN	C _{gemess} in Bq/l	Bemerkung	Datum PN	C _{gemess} in Bq/l	Bemerkung
13.07.11	576	LUNG	30.01.19	185	
27.06.12	476	LUNG	12.02.19	187	
13.11.12	400	LUNG	12.03.19	199	
06.05.13	321	LUNG	25.03.19	190	LUNG
15.08.13	250	LUNG	09.04.19	189	
12.11.13	259		14.05.19	192	
21.11.13	309	LUNG	28.06.19	188	
06.03.14	254	LUNG	09.07.19	185	
06.10.14	271	LUNG	13.08.19	188	
18.11.14	272		23.10.19	187	
16.03.15	210	LUNG	28.10.19	182	LUNG
29.10.15	225	LUNG	12.11.19	180	
13.11.15	208		10.12.19	161	
01.03.16	219	LUNG	14.01.20	178	
08.11.16	222	LUNG	11.02.20	178	
17.11.16	174		06.03.20	176	
12.02.17	223	LUNG	07.04.20	175	
10.10.17	168		12.05.20	172	
07.11.17	179	LUNG	09.06.20	166	
10.04.18	153	LUNG			
08.08.18	427	LUNG			
15.11.18	244				
11.12.18	188				

Der aus 13 monatlichen Einzelmesswerten errechnete arithmetische Mittelwert der Tritiumkonzentrationen im Permeat für das Jahr 2019 liegt bei 186 Bq/l, mit einer Standardabweichung von ± 9 Bq/l. Die Messergebnisse des 1. Halbjahres 2020 ergeben einen Mittelwert von (174 ± 5) Bq/l.

Der zeitliche Verlauf der gemessenen Tritiumkonzentrationen im Permeat seit 2011 ist in Abbildung 3-2 dargestellt und die bereits in [1] enthaltenen Modellkurven sind extrapoliert bis 2019 eingezeichnet.

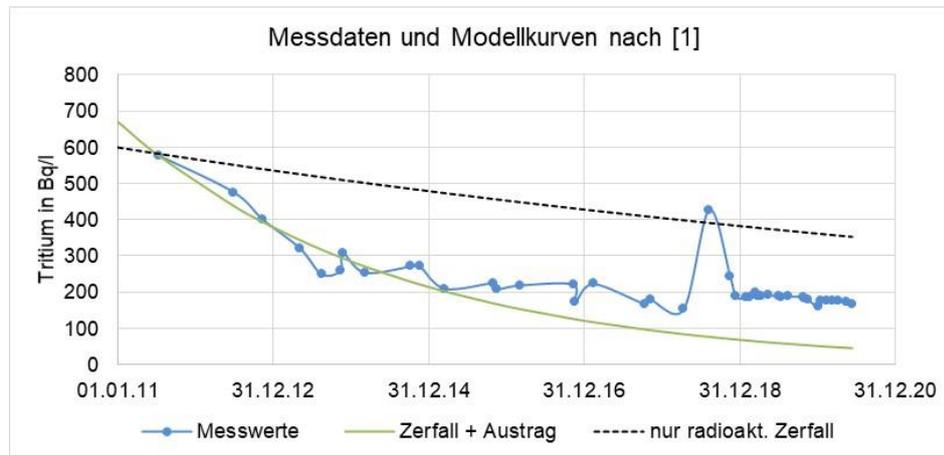


Abbildung 3-2: Zeitlicher Verlauf der bis Juni 2020 gemessenen Tritiumkonzentrationen im Permeat und zugehörige Modellkurven nach Modellen aus [1]

Abbildung 3-2 zeigt, dass die Modellkurven nach [1] die Messwerte bis 2016 noch hinreichend anfitzen, durch die späteren Messwerte aber nicht bestätigt werden. Der 2016 prognostizierte Rückgang der Tritiumkonzentrationen ist nicht wie angenommen eingetreten. Die im August 2018 gemessene deutlich erhöhte Tritiumkonzentration von 427 Bq/l ist im Zeitverlauf als Ausreißer zu bewerten. Sie trat zwar in einem Monat mit einer sehr niedrigen Ableitmenge auf, ist aber, wie die Daten späterer Analysen, deren Proben bei ähnlich niedrigen Ableitungen entnommen wurden, nicht allein durch die geringe Ableitmenge zu erklären. Die im November 2018 entnommene Probe wies mit 244 Bq/l zumindest in Relation zu den Messwerten aus dem Herbst 2017 und den nachfolgenden Messungen des Jahres 2019 einen erhöhten Messwert auf und ist damit als Indiz zu werten, dass der Messwert von August 2018 kein Artefakt war.

In Abbildung 3-3 ist der Verlauf der monatlich mit dem Permeat in die Oberflächengewässer abgeleiteten Tritiumfracht dargestellt. Um einen durchgängigen Datensatz zu erzeugen, wurden die Messwerte der Tritiumkonzentration für die dazwischen liegenden Zeiten ohne Messwert linear interpoliert und danach mit den Monatswerten der Ableitungsmengen multipliziert. Die so ermittelte Zeitreihe der Tritiumfracht legt eine Zweiteilung der Messreihe nahe. In den 3 Jahren von Januar 2011 bis Dezember 2013 nahm die in die Oberflächengewässer eingeleitete Tritiumfracht von 8 bis 10 GBq/Monat auf ca. 2 GBq/Monat ab (parallel zur Abnahme der Tritiumkonzentration vom Maximalwert 576 Bq/l auf 250 Bq/l). Seit 2014 verläuft die Abnahme wesentlich langsamer und hat Ende 2019/Anfang 2020 ein Niveau von ca. 1 GBq/Monat erreicht.

Der im August 2018 gemessene Peak der Tritiumkonzentration im Permeat ist in der Ableitfracht kaum zu erkennen.

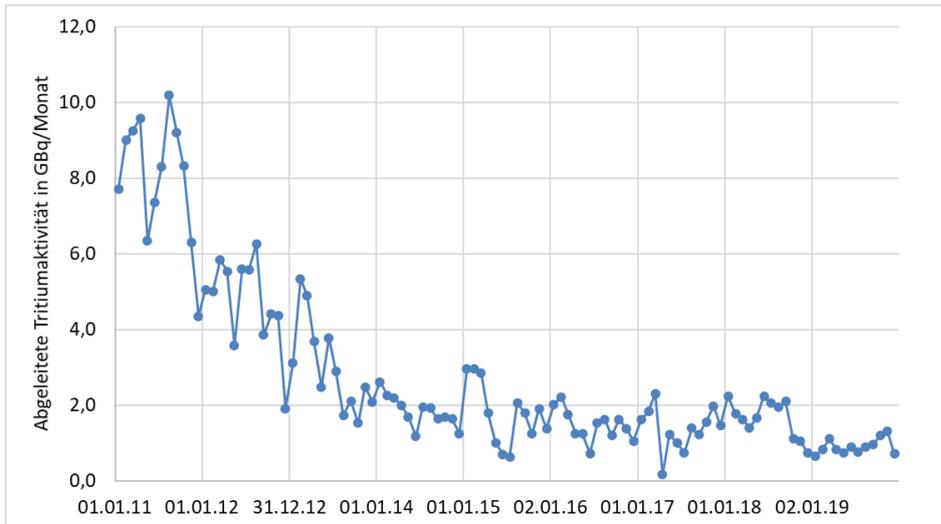


Abbildung 3-3: Zeitlicher Verlauf der mit dem Permeat abgeleitete Tritiumfracht (bis Dezember 2019)

Um die Tritiumaktivität abzuschätzen, die den erhöhten Messwert vom August 2018 erzeugte, kann man annehmen, dass das Permeatbecken durch eine plötzliche Einleitung am 01.08.2018 eine Tritiumkonzentration von ca. 450 Bq/l aufwies. Dieses Tritiuminventar wurde danach mit einem kontinuierlichen Durchlauf von durchschnittlich 150 m³/d ausgewaschen, wobei der Zulauf mit der ansonsten typischen Konzentration von 180 Bq/l erfolgte. Mit diesem (sehr groben) Modell können die Messwerte vom August bis Dezember 2018 plausibel erklärt werden (s. Abbildung 3-4), wenn als zeitweises Speichervolumen ein Wert von $V = 10.000 \text{ m}^3$ angenommen wird. Größere Speichervolumen ergeben (bei gleichem Durchfluss) einen deutlich flacheren Kurvenverlauf und passen nicht zu den Messdaten (s. Kurve C($V=20.000\text{m}^3$) in Abbildung 3-4).

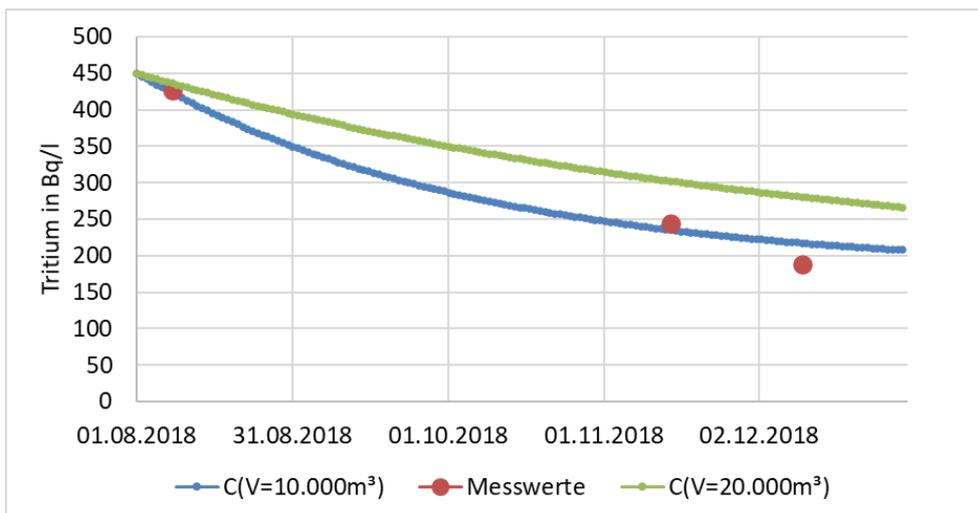


Abbildung 3-4: Modellanalyse zum gemessenen Peak im August 2018 für den Zeitraum August bis Dezember 2018

Legt man das zuvor beschriebene Modell zugrunde, dann ergibt sich eine Aktivität von ca. 2,7 GBq, die Anfang August 2018 kurzzeitig und zusätzlich zum sonstigen Tritium in das Permeatbecken eingetragen wurde. Ob die Ursache dieses Eintrags eine kurz davor erfolgte Deponierung tritiumhaltiger Abfälle oder eine erhöhte Auswaschung aus einem bereits früher abgelagerten Teil des Deponiekörpers war, kann durch das Modell und die wenigen Daten nicht unterschieden werden.

3.3 Ergebnisse von Sickerwasseruntersuchungen in der Deponie

Um die Herkunft des Tritiums einzugrenzen, wurden seit 2013 auch Sickerwässer auf dem Deponiegelände beprobt und auf Tritium untersucht. Die Messergebnisse dieser Untersuchungen sind in Anlage 1.2 dokumentiert und in Tabelle 3-2 zusammengestellt.

Tabelle 3-2: Messergebnisse von Tritium in Sickerwässern auf der Deponie

PN-Stelle	Datum PN	13.08.2013	18.11.2014	15.11.2018	MW
	Entwässerungs- abschnitt	H-3 in Bq/l	H-3 in Bq/l	H-3 in Bq/l	H-3 in Bq/l
SW 18 (S1.9)	(Nordost)	133		48	91
SW 14 (S5.1)	A2	53	27	28	36
SW 15	A2			50	50
SW 11	A3		106	61	84
SW PW C	A4			388	388
SW PW Süd B1.1-1.2	A4 (evtl. auch A5)	234	357	248	280
SW 53	A5			73	73
SW PW Süd BA8	A5	327	164	228	240
SW 46 (GS7.4)	A6	180	973	667	607
SW 51	A6			219	219
SW 52	A6			161	161
GS4.05	A7	93			93
SW 23 (S4C)	A8	118	63	132	104
SW 22	A8		88	48	68

Abbildung 3-5 zeigt ein Diagramm, in dem die Messwerte den jeweiligen Deponieabschnitten zugeordnet dargestellt sind. Die Entwässerungsabschnitte mit den höchsten Tritiumkonzentrationen sind A4, A5 und A6, die im Süden der Deponie liegen (s. Abbildung 2-2). Die höchsten Tritiumkonzentrationen wurden bisher im Abschnitt A6 im südwestlichen Teil der Deponie gemessen.

Bildet man den Mittelwert aller zu einem Zeitpunkt gehörenden Analysenergebnisse, dann errechnen sich die in Tabelle 3-3 aufgeführten Werte. Sie stimmen für die Zeiten November 2014 und November 2018 gut mit den in diesem Zeitraum bestimmten Tritiumkonzentrationen im Permeat überein. Da die Abflussmengen der einzelnen Entwässerungsabschnitte aber nicht bekannt sind, können derzeit keine detaillierteren Aussagen abgeleitet werden.

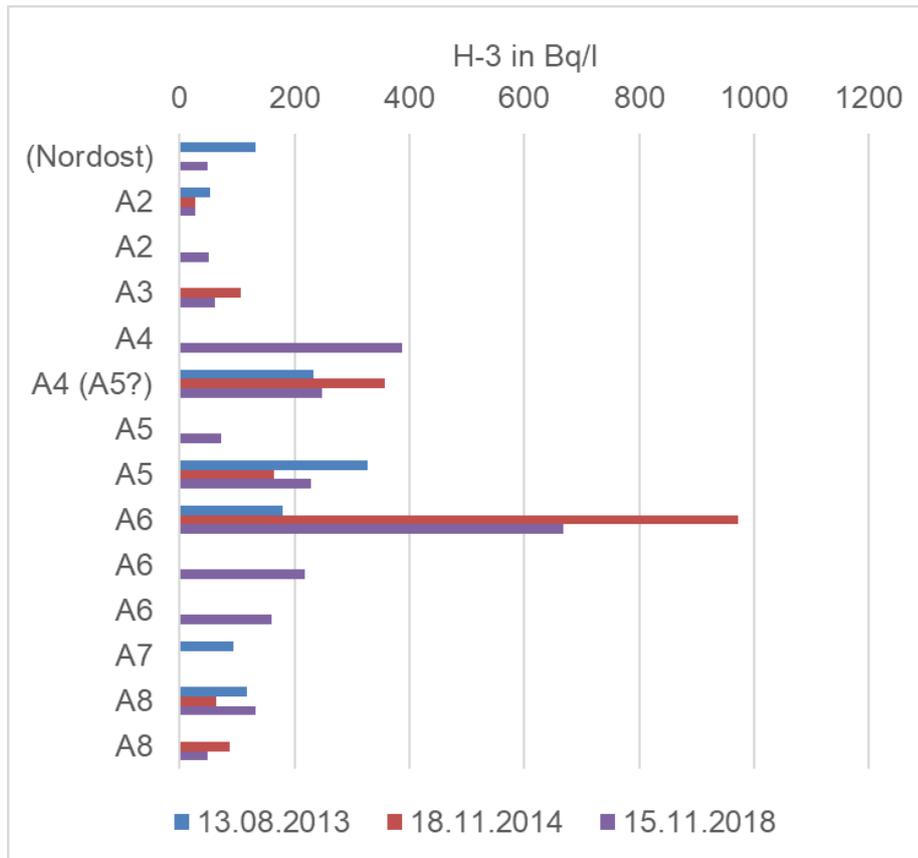


Abbildung 3-5: Tritium im Sickerwasser von Deponieabschnitten

Tabelle 3-3: Mittelwerte von Tritium in Sickerwässern und zugehörige Messwerte von Tritium im Permeat

	August 2013	November 2014	November 2018
	H-3 in Bq/l	H-3 in Bq/l	H-3 in Bq/l
Mittelwert Sickerwasser	163	253	181
Permeat	250	272	188

3.4 Oberflächengewässer außerhalb der Deponie

Die Messergebnisse von Tritium in den Oberflächengewässern im Abstrom der Deponie sind in Anlage 1.1 aufgeführt. Wie bereits im Bericht [1] beschrieben, sind durch die Ableitungen von Permeat die Tritiumkonzentrationen in den unterstromig gelegenen Oberflächengewässern gegenüber dem natürlichen Niveau der Tritiumkonzentrationen erhöht. Da das Tritium als Wassermolekül vorliegt, ist die Konzentration in den Gewässern durch Mischungsanteile des Permeats zu erklären.

Das Gewässersystem ist schematisch in Abbildung 3-6 dargestellt. Die natürliche Tritiumkonzentration kann aus den Messwerten im Rupensdorfer Bach stromoberhalb der Einleitstelle des Ableitungsgrabens mit ca. 0,6 Bq/l abgeschätzt werden.

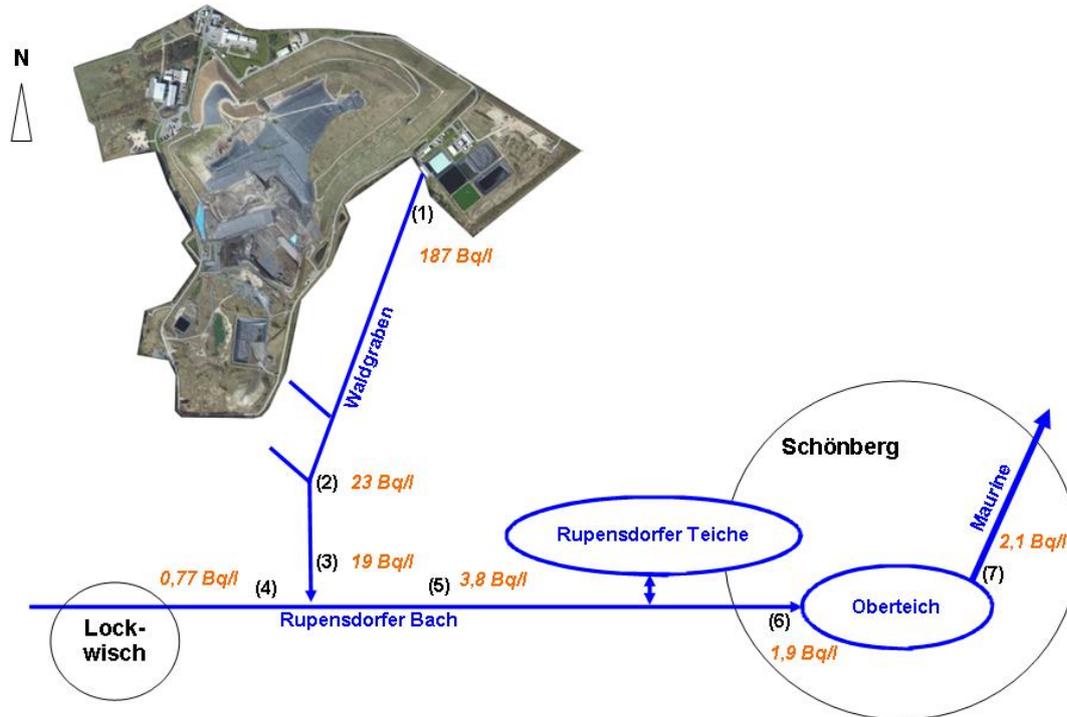


Abbildung 3-6: Gewässersystem im Abstrom der Permeat-Einleitstelle „(1)“ mit Angaben zu Tritiumkonzentrationen zum Stichtag 23.10.2019

Aus den inzwischen aus 7 Stichtagsbeprobungen in 6 Jahren vorliegenden Tritiummesswerten (Anlage 1.1 und Tabelle 3-4) sind in Tabelle 3-5 Mischungsanteile von Permeat in den Oberflächengewässern berechnet.

Tabelle 3-4: Messwerte von Tritium (H-3) in Oberflächengewässern. Messpunkte (1) bis (7) nach Abbildung 3-6

Datum PN	H-3 in Bq/l						
	Ablauf Permeat-becken / OW1 (1)	Ablauf Staats-forst / OW5 (2)	Deponie-wasser vor Eintritt Rupens-dorfer B. (3)	Rupens-dorfer Bach (Misch-wasser) (5)	Zulauf Ober-teich (6)	Ablauf Ober-teich (7)	Rupens-dorfer Bach (unbelast.) (4)
13.08.2013	250	230	140	20			
12.11.2013	259	67	40	11	4,8 *	5,6	0,57 *
13.11.2015	208	36	29	7,2	4	4,6	0,59
17.11.2016	174	33	23	8,2	4,7	3,1	0,29
10.10.2017	168	8,8	4,9	2	1,6	1,7	0,98
11.12.2018	188	42	46	10	5,1	3,4	0,5
23.10.2019	187	23	19	3,8	1,9	2,1	0,77

* PN-Datum 15.11.2013

Als Bezug sind in Tabelle 3-5 auch die Ableitungen von Permeat im jeweiligen Monat der Probenahme angegeben. Da Angaben zur Wasserführung der Gewässer selbst nicht vorlagen, wurden zur orientierenden Bewertung der Abflusssituation aus einem von IAG zur Verfügung gestellten Datensatz (Anlage 1.5) Niederschlagssummen N berechnet, die in den 10 Tagen vor der jeweiligen Probenahmen gefallen waren. Diese Werte sind in Tabelle 3-5 ebenfalls mit aufgeführt.

Tabelle 3-5: Mischungsanteile von Permeat in Oberflächengewässern im Abstrom der Permeat-Einleitstelle

	N (mm in 10 d)	Ableitung (Monats- wert) in m ³	Ablauf Staats- forst / OW5	Deponie- wasser vor Eintritt Rupens- dorfer B.	Rupens- dorfer Bach (Misch- wasser)	Zulauf Ober- teich	Ablauf Ober- teich
13.08.2013	4,8	6938	92%	56%	8,0%		
12.11.2013	52,6	9590	26%	15%	4,0%	1,6%	1,9%
13.11.2015	5,1	9182	17%	14%	3,2%	1,6%	1,9%
17.11.2016	40,0	7846	19%	13%	4,6%	2,5%	1,6%
10.10.2017	86,2	9299	4,7%	2,3%	0,6%	0,4%	0,4%
11.12.2018	51,2	3919	22%	24%	5,1%	2,5%	1,5%
23.10.2019	38,8	6500	12%	10%	1,6%	0,6%	0,7%
Mittelwert (ohne 13.08.13; 10.10.17)			19%	15%	3,7%	1,8%	1,6%
± STABW (ohne 13.08.13; 10.10.17)			5%	5%	1,3%	0,8%	0,5%

Die Daten der Tabelle 3-5 liegen mit Ausnahme der Messwerte vom 13.08.2013 und 10.10.2017 in einem Wertebereich, der eine konsistentes Bild ergibt. Mit dem um die beiden vorgenannten Tage reduzierten Datensatz wurden daher Mittelwerte und Standardabweichungen der Mischungsanteile berechnet (s. Tabelle 3-5).

Die beiden „Ausreißer“ (vom 13.08.2013 und 10.10.2017) sind mit den hier ausgewerteten Daten nicht eindeutig auf die meteorologischen Daten erklärbar. So war zwar im Oktober 2017 nach intensiven Niederschlägen (trotz sehr hoher Ableitmenge) der Anteil des Permeats an den Gewässerabflüssen besonders niedrig, andererseits sind die Anteile des Permeats bei „normalen“ Niederschlagsmengen von ca. 50 mm in 10 Tagen bei sehr geringer monatlicher Ableitmenge im Dezember 2018 relativ hoch.

3.5 Grundwasser

Das Messnetz der Grundwasser-Messstellen im Nahbereich um die Deponie ist in Abbildung 3-7 dargestellt.

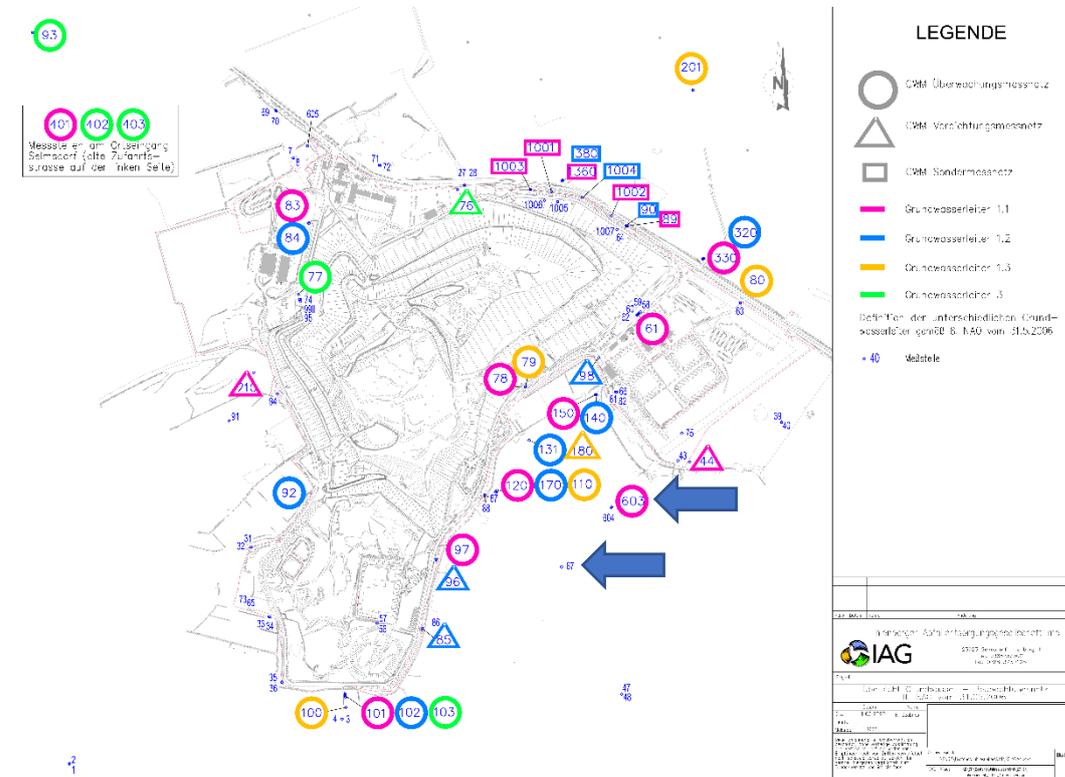


Abbildung 3-7: Grundwassermessstellen im Nahbereich der Deponie Ihlenberg. Die Pfeile verweisen auf die beiden im Text beschriebenen Messstellen (Bildquelle: IAG)

Messwerte von Tritium im oberflächennahen Grundwasser sind in Anlage 1.3 zusammengestellt. Wie aufgrund der inzwischen langjährig niedrigen Tritiumkonzentrationen im Niederschlag zu erwarten, liegen die Messwerte in vier der untersuchten sieben Messstellen unter 1 Bq/l. Diese Konzentration weist auch der aus oberflächennahem Grundwasser gespeiste Rupensdorfer Bach auf (s. Tabelle 3-4). Eine Tritiumkonzentration von 0,5 Bq/l bis 1 Bq/l kann daher als Bezug für die natürliche Tritiumkonzentration im oberflächennahen Grundwasser angesehen werden.

Die in der Nähe des Ableitgrabens positionierte Messstelle(n) GW50/GW603 zeigen seit 2013 eine gegenüber dem unbeeinflussten Grundwasser erhöhte Tritiumkonzentration. Die Messstelle GW603 wurde als Ersatz für die GW50 nur etwa 10 m vom Standort der GW50 und verfiltert im gleichen Teufenbereich errichtet. In Abbildung 3-8 ist der zeitliche Verlauf der Messwerte dieser beiden Messstellen dargestellt. Nach einem von 2013 bis 2017 zu beobachtenden Peak liegt seit 2017 das Konzentrationsniveau bei etwa 10 Bq/l. Diese Konzentration kann unter den lokalen Bedingungen nur durch deponiebürtiges Tritium erklärt werden.

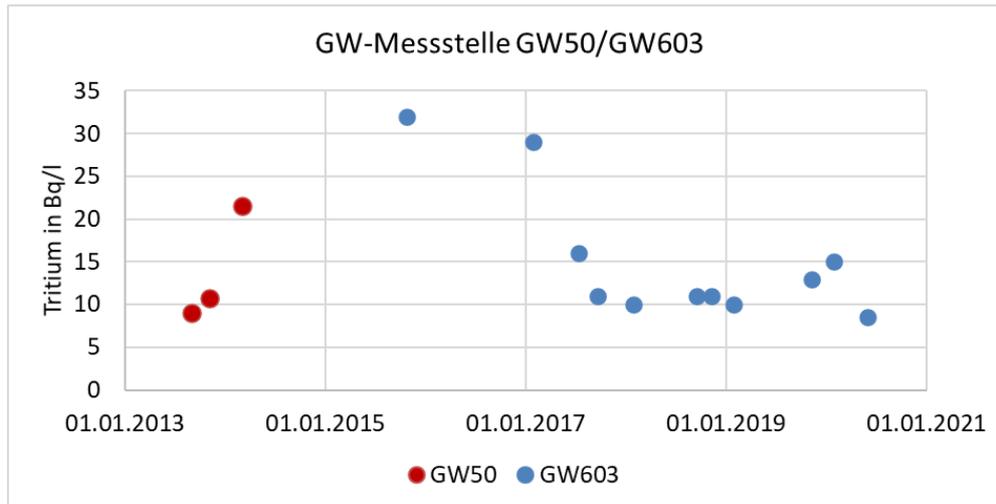


Abbildung 3-8: Zeitlicher Verlauf der Tritiumkonzentration in den Messstellen GW50/GW603

Eine zweite Messstelle, bei der ein schwacher Einfluss der Deponie zu erkennen ist, ist die Messstelle GW67. Hier ergab eine Probe vom 09.04.2018 eine Tritiumkonzentration von 1,5 Bq/l, eine Wiederholungsmessung an einer Probe vom 08.04.2019 eine Konzentration von 2,1 Bq/l. Auch unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten deuten diese beiden Messwerte auf Beiträge deponiebürtigen Tritiums hin.

Eine Auswertung hinsichtlich der Ausbreitung von Tritium im Untergrund ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Generell kann jedoch festgestellt werden, dass alle im Grundwasser gemessenen Tritiumkonzentrationen deutlich unter dem Referenzwert der TrinkwV von 100 Bq/l liegen.

4 Bisherige Modelle

Im Bericht [1] wurden die bis 2016 verfügbaren Messdaten mit folgenden Modellen beschrieben.

Modell 1: Ausschließlicher radioaktiver Zerfall.

Dieses Modell bedeutet implizit, dass das Gesamtinventar an Tritium im Deponiekörper so groß ist, dass der Austrag mit dem Permeat keinen signifikanten Effekt auf das Inventar besitzt. Die Konzentration von Tritium im Sickerwasser C verringert sich in diesem Fall nur durch radioaktiven Zerfall des Tritiums (Zerfallskonstante λ) mit der Zeit t. Die mathematische Formulierung des Modells lautet:

$$C = C_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad \text{Gl. 1}$$

Modellparameter: Zerfallskonstante $\lambda = 0,000153$ 1/d für Tritium;

C_0 = Anfangskonzentration (Tritiumkonzentration zum Zeitpunkt t_0)

Die damit errechnete und an den Messwert vom 13.07.2011 „angehängte“ Kurve (Abbildung 3-2) zeigt ein deutlich geringeres Abfallen der Tritiumkonzentration im Permeat als tatsächlich beobachtet. Die in diesem Modell enthaltene Annahme eines (in Relation zum Austrag) sehr großen Tritiuminventars im Deponiekörper ist folglich nicht geeignet, um den Messwert vom 13.07.2011 zu erklären.

Modell 2: Radioaktiver Zerfall + Auswaschung

Das Modell geht davon aus, dass das Tritiuminventar der Deponie durch die Auswaschung von Tritium mit dem Sickerwasser signifikant verringert wird. Außerdem findet radioaktiver Zerfall statt. Die Auswaschung wird als Kinetik 1. Ordnung mit der Ratenkonstante k modelliert. Die mathematische Formulierung des Modells lautet:

$$C = C_0 \cdot \exp(-(\lambda + k) \cdot t) \quad \text{Gl. 2}$$

Modellparameter k (Auswaschrage).

Der Modellparameter k kann auf λ normiert werden. Das Modell lautet dann

$$C = C_0 \cdot \exp(-\lambda(1 + k/\lambda) \cdot t) \quad \text{Gl. 3}$$

Mit den gleichen Startwerten wie im Modell 1 kann die Modellkurve durch Variation von k/λ an die gemessenen Werte angepasst werden. Ein bester Fit nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ergab sich 2016 für den Parameter $k/\lambda = 4,09$. Die mit diesem Parameterwert berechnete Kurve ist in Abbildung 3-2 als „Modell 2“ eingezeichnet. Bereits 2016 wurde darauf hingewiesen, dass eine detailliertere Betrachtung der Messwerte darauf hindeutet, dass der Austrag von Tritium ab November 2013 deutlich flacher verläuft als vom Modell beschrieben. Dieser Sachverhalt hat sich durch die weiteren Messwerte bestätigt.

Modell 3: Numerisches Bilanzmodell

Da neben den gemessenen Tritiumkonzentrationen auch Angaben zu den abgeleiteten Permeatmengen Q verfügbar sind, können daraus absolute Werte des gesamten vom Zeitpunkt t_0 bis zum Zeitpunkt t_j mit dem Permeat (Index „P“) ausgewaschenen Tritiums A^P errechnet werden. Dafür gilt folgende Gleichung

$$A_{kum}^P(t_j - t_0) = \sum_i^j C_i \cdot Q_i \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad \text{Gl. 4}$$

Um mit diesem Modell und den Angaben zu monatlichen Ableitungsmengen nach Anlage 2 den kumulativen Austrag von Tritium mit dem Permeat quantifizieren zu können, wurden Konzentrationswerte C_i für jeden Monat ohne Messwert durch eine lineare Interpolation zwischen den jeweils zwei Messwerten berechnet.

Zusätzlich ist aber zu berücksichtigen, dass das Inventar A auch durch radioaktiven Zerfall stetig abnimmt. Die durch Zerfall „verschwundene“ Tritiumaktivität kann abgeschätzt werden über

$$A_{kum}^{Zerf}(t_j - t_0) = \sum_i^j A_i \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot (t_i - t_{i-1}))) \quad \text{Gl. 5}$$

Eine Anwendung dieses Modells, bei dem die Abnahme des Tritiuminventars A sowohl mit den Werten der monatlichen Ableitungen von Permeat als auch dem Zerfall des im Deponiekörper verbliebenen Inventars gerechnet wird, ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

Für den Zeitraum vom 01.01.2011 bis zum 31.12.2019 kumuliert sich die abgeleitete Gesamtaktivität auf 290 GBq H-3. Das liegt schon nahe an dem in [1] abgeschätzten Gesamtinventar von 330 GBq H-3 zum Zeitpunkt 01.01.2011. Durch den radioaktiven Zerfall kommt eine weitere Senke hinzu, die (abhängig vom angenommenen Gesamtinventar) mindestens im Bereich von einigen zehn GBq zu veranschlagen ist.

Die Modellrechnungen ergaben, dass für den Anfangszeitpunkt 01.01.2011 das Anfangsinventar höher als der in [1] abgeschätzte Wert von $A_{Dep,0} = 330$ GBq angenommen werden muss, da ansonsten das Inventar ab 2017 negativ berechnet wurde. Eine Anpassung der Messwerte im Permeat war möglich, wenn das Anfangsinventar auf 400 GBq erhöht und die Tritiumkonzentration im Permeat C^P mit einem linearen Ansatz

$$C_{Modell}^P = \kappa \cdot A \quad \text{Gl. 6}$$

an das Inventar gekoppelt wird.

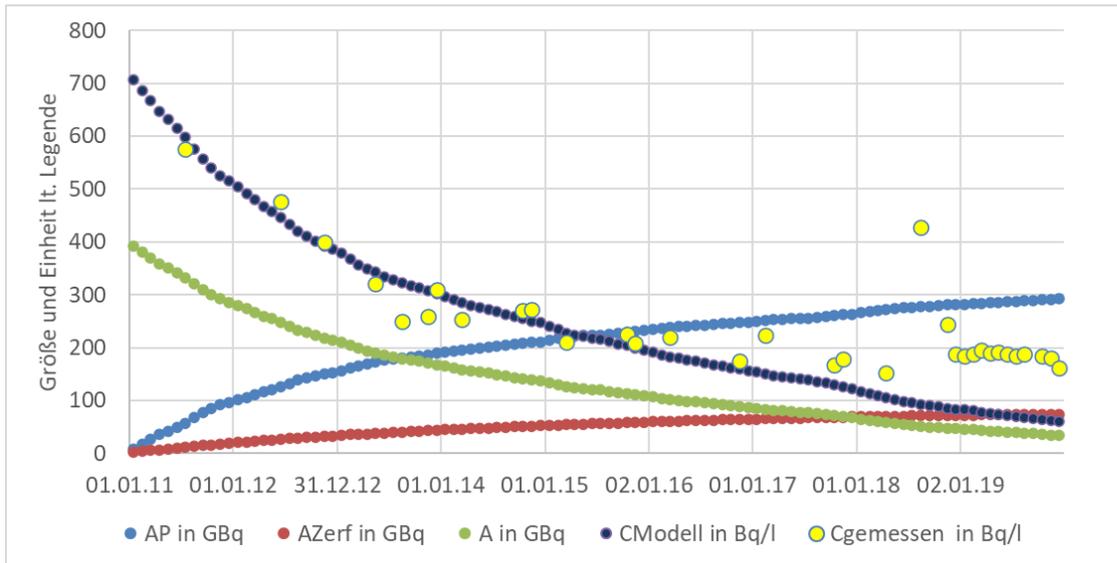


Abbildung 4-1: Zeitliche Veränderung der Tritiuminventare in der Deponie und daraus mit einem linearen Ansatz errechnete Tritiumkonzentrationen im Permeat (Erläuterungen s. Text)

Abbildung 4-1 zeigt das so mit einem Wert $\kappa = 1,8E-06 \text{ m}^{-1}$ durchgerechnete Modell. Für den Zeitraum bis Ende 2017 passt sich dieses Modell gut an die Messwerte an. Danach zeigen sich aber deutliche Abweichungen von Messwerten und Modellwerten. Da andererseits, wie die Messwerte belegen, allein im Jahr 2019 etwa 10 GBq H-3 mit dem Permeat abgeleitet wurden, müssen entweder zusätzliche Einträge von Tritium stattgefunden haben oder es sind mehrere unterschiedlich auswaschbare Tritiuminventare in der Deponie vorhanden.

5 Weiterentwicklung der Modelle

5.1 Modellansätze

Die in den Kapiteln 3 und 4 dargestellten Sachverhalte zeigen, dass die bisherigen Modelle nicht ausreichen, um die seit 2016 ermittelten Messdaten zu beschreiben. Daher ist eine Weiterentwicklung der Modelle nötig. Diese Weiterentwicklung muss die im Kapitel 4 beschriebenen Defizite der bisherigen Modelle, insbesondere das langsamere Abklingen der Tritiumkonzentration im Permeat als nach den bisherigen Modellen erwartet, berücksichtigen.

Zwei unterschiedliche konzeptionelle Ansätze werden im Weiteren betrachtet.

Modell A: Ein-Box-Modell.

In diesem Modell ist das in der Abbildung 3-2 erkennbare geringere zeitliche Abklingen der gemessenen Tritiumkonzentrationen ab 2016 als ein Hinweis auf zusätzlichen (stetige) Zuführungen von Tritium in den Deponiekörper zu interpretieren.

Modell B: Zwei-(oder Mehr-)Box-Modell.

In diesem Modell kann der Messwert 2011 als Beitrag eines Teilbereiches der Deponiekörper interpretiert werden, der relativ stark ausgewaschen wird. Der seit 2016 feststellbare Trend kann dann als Auswaschung eines großen („trägen“) Inventars interpretiert werden.

Die Modelle können mittels einfacher physikalischer Ansätze analytisch umgesetzt werden. In diesem Fall sind Modellkurven an die Messwerte anzupassen. Die Modelle können aber auch mittels numerischer Verfahren unter Bezug auf Messwerte bearbeitet werden.

Die aus den Messdaten ableitbare Information zum Verhalten von Tritium in der Deponie wird durch die Modellauswertung auf wenige Modellparameter reduziert, von denen die Zerfallskonstante von Tritium (bzw. die Halbwertszeit) ein fester physikalischer Parameter ist, der bei Zeiträumen von mehreren Jahren als Einflussgröße nicht außer Acht gelassen werden kann. Aus den Modellparametern können Rückschlüsse auf Größen wie die Gesamtmenge (Inventar) von Tritium in der Deponie und Nachlieferungen von Tritium von außen abgeleitet werden.

Beide Modellansätze sind zunächst nur dafür gedacht, die verfügbaren Messbefunde retrospektiv zu erklären. Da sie keine systembeschreibenden Modelle im engeren Sinne sind, werden damit keine Kausalketten abgebildet und Ursachen für die Messbefunde nachgewiesen. Die Modelle geben Hinweise auf Erklärungsmöglichkeiten, deren Plausibilität anderweitig zu prüfen und zu bewerten ist.

Grundsätzlich können die realen Verhältnisse so beschaffen sein, dass beide Ansätze zu gewissen Anteilen zutreffen. Dazu sind allerdings aus der Zeitreihe der Tritiumkonzentrationen im Permeat keine konkreten Aussagen ableitbar.

5.2 Ein-Box-Modell

5.2.1 Modellbeschreibung

Modell A: Radioaktiver Zerfall + Auswaschung + Nachlieferung

Das Modell geht davon aus, dass durch Deponierung tritiumhaltiger Abfälle eine stetige Nachlieferung von Tritium mit einer zeitlich konstanten Rate J erfolgt. Die Bilanzgleichung für das Tritiuminventar A des (vom Permeat entwässerten) Deponiekörpers lautet damit

$$\frac{dA}{dt} = -\lambda \cdot A - k \cdot A + J \quad \text{Gl. 7}$$

Die Modellparameter sind wie in den Modellen im Kapitel 4

λ - Zerfallskonstante (0,000153 1/d für Tritium)

k - Auswaschräte.

Das Inventar A umfasst das gesamte durch das Sickerwasser erfasste Tritium im gereinigten Deponiewasser. Eine Rückführung von Permeat auf die Deponie verändert das Inventar nur dann, wenn es dabei zu einer signifikanten Verdunstung kommt und wird im Weiteren vernachlässigt.

Die Lösung dieser Differentialgleichung für die Anfangsbedingung $A(t=0) = A_0$ lautet:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-(\lambda+k)t} + \frac{J}{\lambda+k} \cdot (1 - e^{-(\lambda+k)t}) \quad \text{Gl. 8}$$

Durch die (im Modell zeitlich konstante) Zufuhr J stellt sich ein stationärer Gleichgewichtszustand mit einer Aktivität

$$A_S = \frac{J}{\lambda+k} \quad \text{Gl. 9}$$

ein.

Da die Auswaschung des Inventars mit dem Sickerwasser über die Ableitmenge Q und die Tritiumkonzentration im Permeat gemessen werden kann, kann das jeweilige Inventar A über die Bilanzgleichung

$$Q \cdot C = k \cdot A \quad \text{Gl. 10}$$

abgeschätzt werden.

Durch Anpassung der Modellkurve

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-(\lambda+k)t} + C_S \cdot (1 - e^{-(\lambda+k)t}) \quad \text{Gl. 11}$$

An die Messwerte können die Modellparameter C_0 , C_S und k geschätzt und darüber wiederum Aussagen zum Anfangsinventar

$$A_0 = \frac{Q_0 \cdot C_0}{k} \quad \text{Gl. 12}$$

dem stationären Inventar A_S

$$A_S = \frac{Q_S \cdot C_S}{k} \quad \text{Gl. 13}$$

und der stationären Nachlieferungsrate J_s

$$J_s = A_s \cdot (\lambda + k) \quad \text{Gl. 14}$$

abgeleitet werden. Da bei Variation eines Parameters Anpassungen der Messwerte mit anderen Werten der jeweils anderen Parameter möglich sind, ist es faktisch nur möglich, einen Bereich abzugrenzen, in dem die Parameter liegen.

5.2.2 Modellanwendung

Eine Anpassung der Messwerte an das Modell A ist mit unterschiedlichen Parametern möglich. Als stationärer Wert ist nach den derzeit verfügbaren Messwerten (noch) von einer Tritiumkonzentration von ca. 180 Bq/l auszugehen. Die Messdaten des Jahres 2020 zeigen allerdings einen weiter fallenden Trend, der der Annahme eines stationären Gleichgewichtes widerspricht. Daher sollten die Modellergebnisse nur für das Zeitintervall von 2011 bis 2019 als aussagefähig bewertet werden.

Der Anfangswert (im Modell angesetzt zum Stichtag 01.01.2011) kann zum einen so gewählt werden, dass der erste Messwert vom 13.07.2011 gut getroffen wird. Dann liegen die beiden folgenden Messwerte deutlich über der Modellkurve (Modellvariante A-1). Wählt man einen höheren Anfangswert (Modellvariante A-2), dann werden die beiden Messwerte aus dem Jahr 2012 besser getroffen, der erste Messwert liegt aber deutlich tiefer als der Modellwert.

Als Parameter der Fitgüte wird der Mittelwert der relativen Abweichungen von Modell und Messwert genutzt.

$$FG = \text{Mittelwert} \left[\left(\frac{C_{\text{mess}} - C_{\text{modell}}}{C_{\text{mess}}} \right)^2 \right] \quad \text{Gl. 15}$$

Die Modellparameter für vier Modellrechnungen sind in Tabelle 5-1 zusammengestellt. Für die Berechnung der Fitgüte wurden die dem besonderen Peak vom August 2018 zuzurechnenden Messwerte vom 08.08. und 15.11.2018 nicht berücksichtigt. Die beiden Modellvarianten 2a und 2b grenzen den Wertebereich ein, in dem die Modellkurve die Messwerte am besten anfitet. Der mit dem Modellansatz A-2a ermittelte Verlauf der Tritiumkonzentration ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

Mit dem Volumenstrom der mittleren täglichen Ableitung im Jahr 2011 von 458,8 m³/d errechnet sich mit Gl. 8 aus C_0 für die Varianten mit dem besten Fit eine Anfangsaktivität zwischen 232 GBq (Variante A-2a) und 238 GBq (Variante A-2b). Das ist deutlich weniger als in der früheren Abschätzung, die bei 330 GBq lag. Allerdings nimmt das Modell an, dass eine jährliche Nachlieferung von Tritium J stattfindet, die unter Berücksichtigung der jährlichen Ableitungen bis 2016 zu etwa 20 GBq anzusetzen ist und bis 2019 auf ca. 12 GBq gefallen ist.

Tabelle 5-1: Modellparameter für die besten Fits des Modells A

Modellvariante	k/λ	C_0 in Bq/l	C_s in in Bq/l	Fitgüte
A-1	9,0	700	180	0,753 %
A-2a	9,8	760	180	0,720 %
A-2b	10,2	780	180	0,718 %
A-3	11,0	840	180	0,739 %

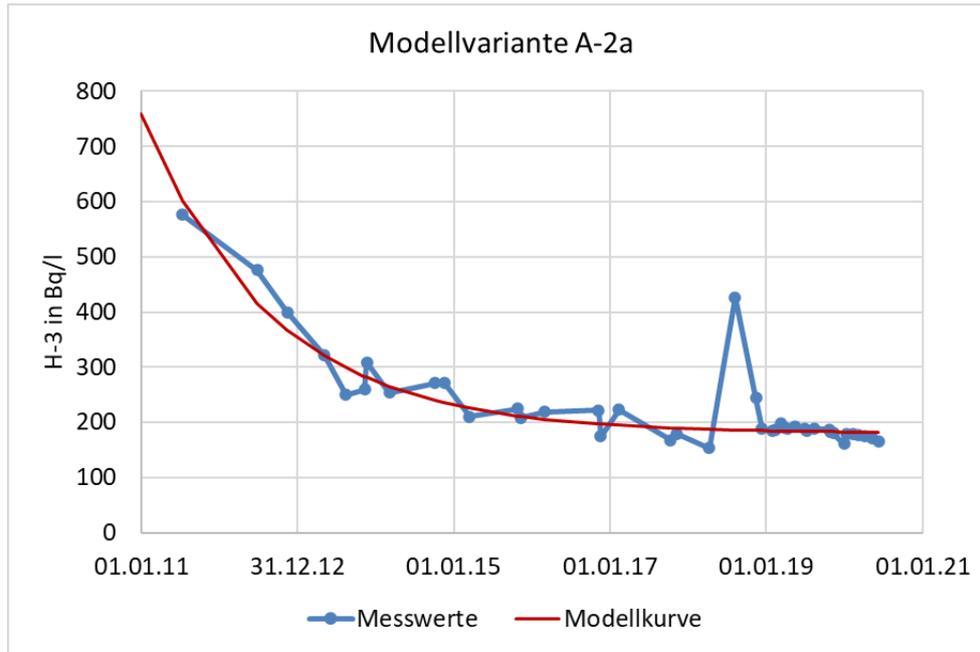


Abbildung 5-1: Messwerte und Modellkurve der Modellvariante A-2a

5.3 Zwei-Box-Modell

5.3.1 Grundkonzept

Wie bereits beschrieben, kann der Verlauf der Messwerte auch als Überlagerung des Tritiumaustrags aus Teilbereichen des Deponiekörpers interpretiert werden, die durch ein unterschiedliches Austragsverhalten gekennzeichnet sind. In diesem Fall ist das abgeleitete Permeat als Mischung aus zwei „Boxen“ aufzufassen, deren Austragsverhalten jeweils dem des Ein-Box-Modells entspricht, wobei das Mischungsverhältnis allerdings nicht exakt bekannt ist. Um diese Mischung zu modellieren, muss ein weiterer Modellparameter eingeführt werden, der aus den Messdaten abzuschätzen ist.

Die Mischungsgleichung für diesen Fall lautet:

$$C_{modell} = (1 - \alpha) \cdot C_{Box1} + \alpha \cdot C_{Box2} \quad \text{Gl. 16}$$

Mit α – Anteil des Volumenstroms von Box2 am Gesamtvolumenstrom Q.

Nimmt man an, dass der erhöhte Messwert des Jahres 2011 und die folgenden Messwerte aus 2012 und 2013 aus einem Teilbereich des Deponiekörpers („Box2“) stammen, der durch intensivere (schnelle) Auswaschung gekennzeichnet ist als der Rest der Deponie, dann kann dieser Teil der Zeitreihe als ein zeitweiser zusätzlicher Eintrag von Tritium aus diesem Teilbereich der Deponie aufgefasst werden. Die Grundbelastung des Permeats mit Tritium ist dann einer „Box1“ zuzuordnen.

5.3.2 Modellierung Box 1

Lässt man die Messwerte aus 2011 bis 2013 sowie den kurzzeitigen Peak im Jahr 2018 zunächst außer Acht, dann können die gemessenen Tritiumkonzentrationen durch eine Kurve gut angepasst werden, die nur den radioaktiven Zerfall („R“) berücksichtigt (Abbildung 5-2, Modell „B1-R“). Das Modell des radioaktiven Zerfalls allein ist allerdings nicht hinreichend, da es die nachgewiesene Auswaschung von Tritium mit dem Sickerwasser außer Acht lässt. Legt man die Messwerte des Jahres 2019 als Zielwert zugrunde, dann erfordert eine Auswaschung („A“) von Tritium (Abbildung 5-2, Modell „B1-R&A“) höhere Messwerte als in der Vergangenheit ermittelt wurden. Die im Abbildung 5-2 eingezeichneten Modellkurven ergeben sich bei einer bestmöglichen Anpassung mit der Fitfunktion nach Gl. 15. Im Modell B-R&A wurde mit einem Parameter $k/\lambda = 0,17$ und einem Anfangswert $C_0 = 310 \text{ Bq/l}$ (=310 kBq/m³) gerechnet. Legt man diese Werte und einen mittleren Abfluss von 450 m³/d zugrunde, dann kann mit Gl. 12 das Tritiuminventar der Box1 zum Anfangszeitpunkt (01.01.2011) zu

$$A_0 = \frac{310 \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3} \cdot 450 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 365 \frac{\text{d}}{\text{a}}}{0,17 \cdot 0,056 \text{ a}^{-1}} = 5,3 \cdot 10^9 \text{ kBq}$$

also ca. 5.000 GBq abgeschätzt werden. Dieses Inventar ist sehr viel größer als das in [1] ausgewiesene Inventar von ca. 330 GBq. Es wäre aber relativ fest in der Deponie eingeschlossen und wird nur geringfügig durch die Sickerwasserausträge verringert.

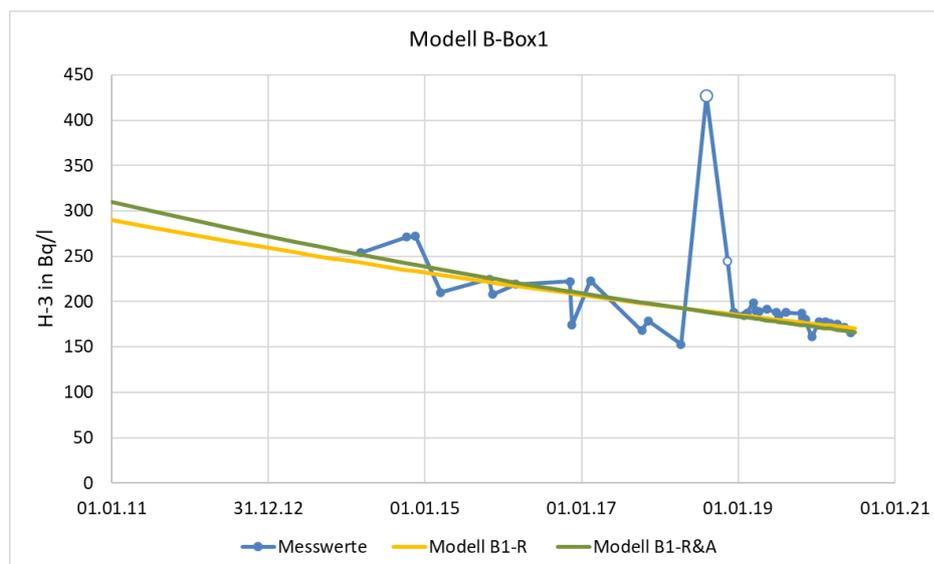


Abbildung 5-2: Modellkurven zur Anpassung der Messwerte ab 2014 als Austräge aus einer Box1 (Erläuterungen s. Text)

Die erhöhten Werte aus 2011 bis 2013 müssen im hier betrachteten Modell als zusätzliche Mischungsbeiträge aus einem schneller ausgewaschenen Bereich der Deponie („Box2“) interpretiert werden.

5.3.3 Modellierung Box2

Zur Anwendung des Modells ist Box2 mit folgenden Algorithmen zu beschreiben:

- Die Tritiumkonzentration im Permeat (C_{Modell}) zum Zeitpunkt t errechnet sich aus dem zugehörigen Modellwert von Box1 unter Anwendung der Mischungsformel Gl. 16 mit einem abzuschätzenden Mischungsanteil α .
- Die Tritiumkonzentration in der Box2 zum Zeitpunkt t wird mit dem Modell 2 nach Kapitel 4 mit den beiden abzuschätzenden Parametern $C_{0,\text{Box2}}$ und k/λ berechnet.
- Die Modellanpassung erfolgt hinsichtlich einer Minimierung der Fitgüte nach Gl. 15.

Für den Parameter k/λ wurden 4 Werte, für $C_{0,\text{Box2}}$ wurden je drei Werte nach einer Sensitivitätsprüfung vorausgewählt. Für die 12 Kombinationen dieser Werte wurden durch Variation von α beste Anpassungen gesucht. Die so erhaltenen Datensätze sind in Tabelle 5-2: aufgeführt. Der beste Fit wurde mit dem in Tabelle 5-2: Parameterwerte zur Modellierung eines „schnellen“ Tritiumaustrags aus einer Box2 hervorgehobenen Parametersatz erhalten. Für diesen Parametersatz ist die Modellkurve in Abbildung 5-3 dargestellt. Eine (rechnerisch mögliche) weitere Präzisierung der Parameter im Sinne einer besseren Fitgüte wurde in Anbetracht der nur relativ wenigen Messwerte nicht ausgeführt, da sie nur Scheingenauigkeiten erzeugt.

Tabelle 5-2: Parameterwerte zur Modellierung eines „schnellen“ Tritiumaustrags aus einer Box2

k/λ	$C_{0,\text{Box2}}$ in Bq/l	α	Fitgüte (FG) in %
5	3000	0,053	3,76
5	5000	0,028	3,89
5	10000	0,013	3,98
10	3000	0,13	1,74
10	5000	0,065	2,16
10	10000	0,028	2,44
15	3000	0,21	1,45
15	5000	0,11	1,27
15	10000	0,048	1,46
20	3000	0,19	3,65
20	5000	0,13	2,01
20	10000	0,064	1,59

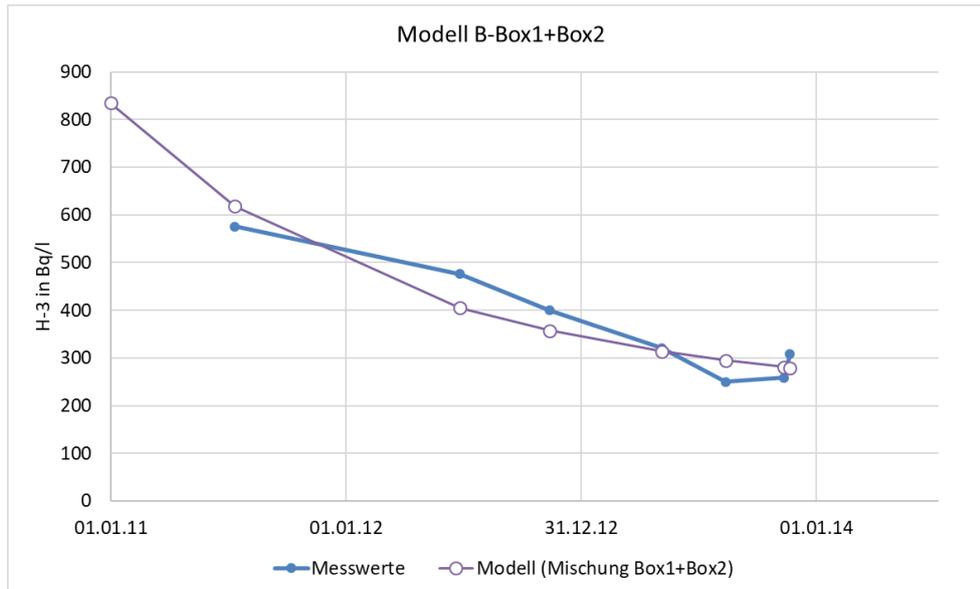


Abbildung 5-3: Modellkurven zur Anpassung der Messwerte 2011 - 2013 als Zumischung einer Box2 mit hohen Tritiumkonzentrationen (Erläuterungen s. Text)

In der Konsequenz führt das Modell zu folgenden weiteren Aussagen:

Die Anfangsaktivität in Box2 betrug (unter der Voraussetzung der Modellannahmen) :

$$A_0 = \frac{5000 \frac{kBq}{m^3} \cdot 0,11 \cdot \frac{450m^3}{d} \cdot \frac{365d}{a}}{15 \cdot 0,056 a^{-1}} = 1,1 \cdot 10^8 kBq$$

also ca. 100 GBq, die über einen Zeitraum von 3 Jahren (Mittlere Verweilzeit durch Auswaschung $1/k = 1,2$ Jahre) weitgehend aus dem Teilbereich der Deponie ausgewaschen wurden. Diese Aktivität passt unter Beachtung der anderen Modellannahmen wiederum gut zu der früheren Schätzung von 330 GBq.

5.4 Numerisches Bilanzmodell

Grundsätzlich können die zuvor beschriebenen Modelle auch numerisch gestützt auf Messdaten angewandt werden. Im Weiteren wird eine solche Auswertung auf der Basis des Ein-Box-Modells und einer darauf aufbauenden Bilanzmodellierung ausgeführt.

Grundlage der Auswertung ist ein diskreter Datensatz mit monatlichen Werten von Abfluss Q und (gemessenen) Tritiumkonzentrationen C^{Mess} . Die Tritiumkonzentrationen an den Stützstellen ohne eigenen Messwert wurden durch lineare Interpolation der Messwerte erzeugt. Da für das Jahr 2020 noch keine Abflussdaten vorlagen, wird die Auswertung auf den Zeitraum bis 2019 beschränkt.

Es wird angenommen, dass die Tritiumkonzentration im Permeat zum Zeitpunkt i proportional zur Tritiumaktivität des durchsickerten Deponiekörpers A zum Zeitpunkt i ist (vgl. Gl. 10).

$$C_i = VK \cdot A_i \tag{Gl. 17}$$

VK – Verteilungskoeffizient

Das Aktivitätsinventar A_i wird geschätzt aus dem, um den radioaktiven Zerfall korrigierten, Inventar zum vorhergehenden Zeitpunkt $i-1$, dem zum vorhergehenden Zeitpunkt abgeleiteten Aktivitätsinventar und einem zur Deponie hinzugeführten Inventar

$$A_i = A_{i-1} \cdot e^{-\lambda \cdot (t_i - t_{i-1})} - Q_{i-1} \cdot C_{i-1} + A_{zu,i} \quad \text{Gl. 18}$$

Das zugeführte Inventar $A_{zu,i}$ wird errechnet aus

$$A_{zu,i} = \frac{C_i^{Mess}}{VK} - A_{i-1} + Q_{i-1} \cdot C_{i-1} \text{ wenn } A_{zu,i} > 0 \quad \text{Gl. 19}$$

Die separate Berechnung der zugeführten Aktivität in Gl. 19 ist nötig, um negative Werte der Zuführungen auszuschließen. Außerdem erlaubt sie es, die Einträge von Tritium in den Deponiekörper direkt auszuweisen.

Eine Anwendung dieses Modells auf den in Anlage 2 dokumentierten Datensatz (bei dem der Peak vom August 2018 nicht berücksichtigt ist) mit unterschiedlichen Anfangswerten A_0 und Verteilungskoeffizienten $VK = C_0^{Mess} / A_0$ ergibt die in Abbildung 5-4 dargestellten Diagramme. Bis zu Anfangsaktivitäten (Tritiuminventar am 01.01.2011) von 250 GBq können die Messwerte gut angepasst werden. Bei höheren Anfangsaktivitäten ist das Modell nicht in der Lage, den von 2011 bis 2014 gemessenen Abfall der Tritiumkonzentrationen zu erklären.

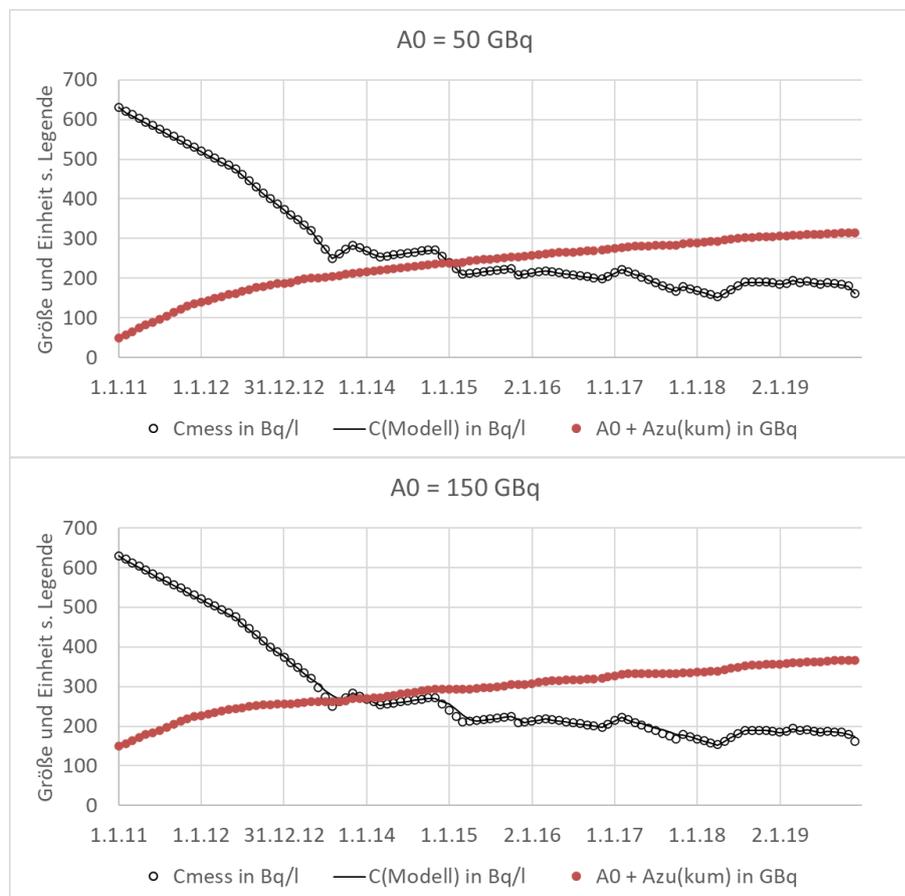
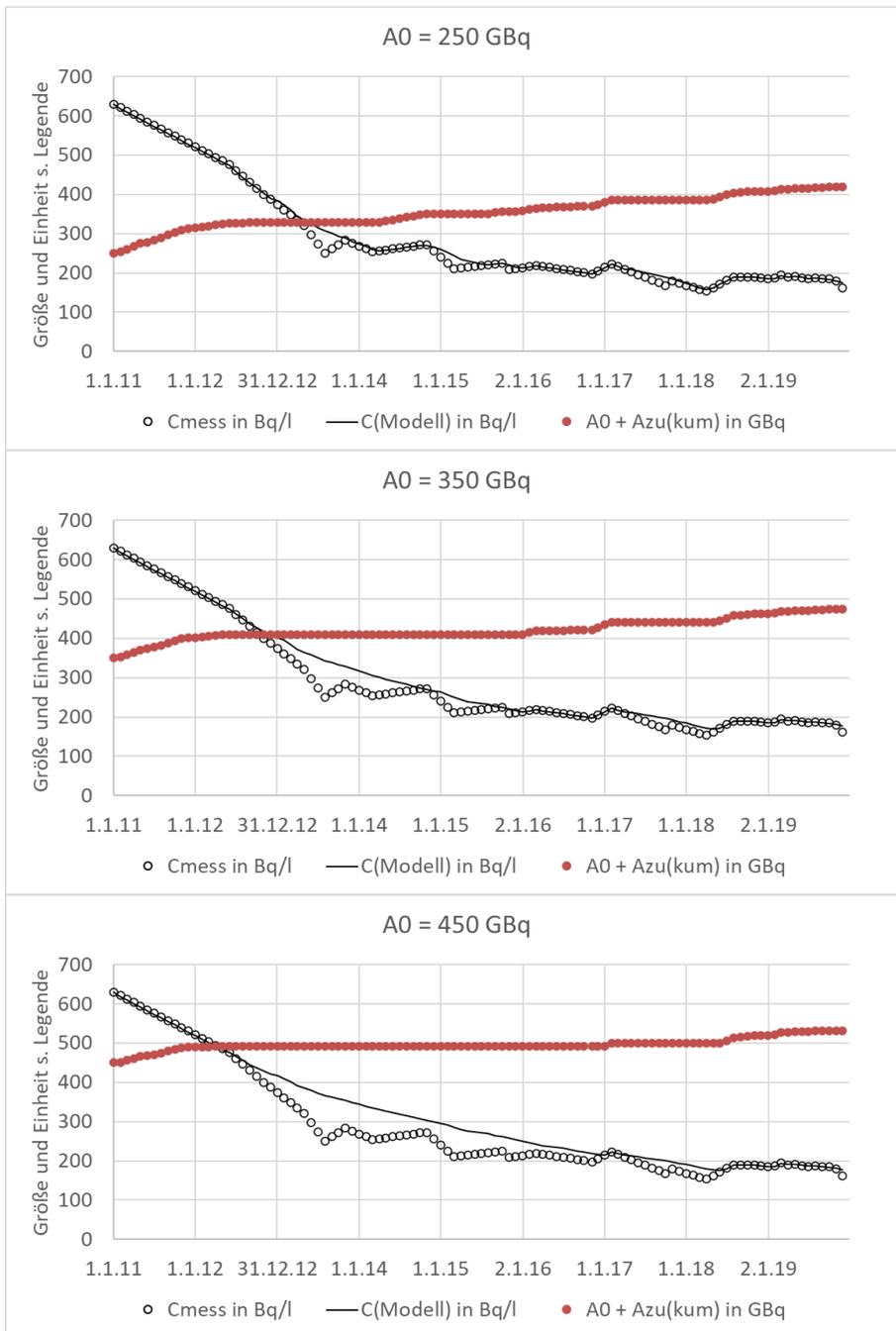


Abbildung 5-4: Ergebnisse der Modellrechnungen zum numerischen Boxmodell (Fortsetzung nächste Seite)



Fortsetzung Abbildung 5-4

Die vom Modell seit Januar 2011 ausgewiesene, kumulativ zugeführte Tritiumaktivität ist abhängig von der Wahl der Anfangsaktivität. Drei Datensätze mit realistischen A_0 -Werten sind in Tabelle 5-3 zusammengestellt.

Tabelle 5-3: Abschätzung von (möglicherweise) zugeführten Tritiumaktivitäten seit Januar 2011

A0	50	150	250	GBq
VK	12,6	4,2	2,5	(kBq/m ³)/GBq
$\Delta A(0a-3a)$	165	120	78	GBq
$\Delta A(3a-9a)$	100	97	89	GBq

Die Daten der Tabelle 5-3 zeigen, dass in der Zeit von Januar 2014 bis Ende 2019 ($\Delta A(3a-9a)$) mit nur geringer Abhängigkeit von Anfangswert ca. 90 GBq – 100 GBq (mobilisierbares) Tritium in den Deponiekörper gelangt sein können. Für die drei Jahre davor ($\Delta A(0a-3a)$) ist der Wert des zugeführten Tritiuminventars stark abhängig vom angenommenen Anfangswert und ist umso geringer je höher die Vorbelastung angenommen wird.

5.5 Bewertung der Modellergebnisse

Ausgehend von den inzwischen vorliegenden Messergebnissen von Tritium im gereinigten Sickerwasser (Permeat) der Deponie Ihlenberg wurde das 2016 entwickelte Modell zum Tritiumaustrag aus der Deponie weiterentwickelt. Dabei wurden zwei unterschiedliche konzeptionelle Modellansätze betrachtet.

Modell A: Ein-Box-Modell mit einer (stetige) Nachlieferung von Tritium durch Ablagerung tritiumhaltiger Abfälle.

Modell B: Zwei-Box-Modell, bei dem eine Box (Box1) ein großes („träges“) Tritiuminventar enthält, das durch die Auswaschung nur wenige verringert wird und eine weitere Box (Box2), mit einer schnellen Auswaschung des Tritiums, die als Quelle der 2011 gemessenen erhöhten Tritiumkonzentrationen angesehen wird.

Beide Modelle erlauben eine Anpassung der Modellkurven an die (meisten) Messwerte. Im Vergleich zu den Modellergebnissen aus dem Bericht [1] ergeben sich folgende Veränderungen:

- Im Modell A ist ein ca. 100 GBq geringeres Tritiuminventar im Jahr 2011 erforderlich als in [1] ermittelt. Allerdings muss angenommen werden, dass durch die Nachlieferung von Tritium in neu abgelagerten Abfällen seit 2011 ca. 100 GBq bis 200 GBq in den Deponiekörper eingebaut wurden.
- Im Modell B ist ein sehr viel größeres Tritiuminventar (15-fach oder mehr) als bisher abgeschätzt in den durchsickerten Deponieabschnitten anzusetzen, das allerdings nur zu geringen Anteilen ausgewaschen wird. Die erhöhten Messwerte der Jahre 2011-13 können unter dieser Voraussetzung durch ein geringes zusätzliches Inventar von nur ca. 100 GBq erklärt werden, das relativ schnell ausgewaschen wurde.
- Das Ein-Box-Modell wurde auch als numerisches Bilanzmodell ausgeführt. Die damit erhaltenen Ergebnisse entsprechen denen, die sich auch mit Anpassung an analytische Lösungen des Ein-Box-Modells ergeben. Allerdings erlaubt dieses Modell, den zeitlichen Verlauf des Tritiumeintrags in die Deponie messwertgestützt detaillierter aufzulösen.

Wie bereits im Kapitel 5.1 beschrieben, geben die Modelle und die daraus ableitbaren Modellparameter Hinweise auf mögliche Erklärungen zu den beobachteten Konzentrationen von Tritium im abgeleiteten Permeat der Deponie Ihlenberg. Welches Modell den realen Verhältnissen entspricht, ist als den Datenanalysen allein nicht ableitbar. Da die Modelle aber in erster Linie auf Stoffbilanzen aufbauen, sind sie hinsichtlich der Modellgrundlagen sehr robust. Der Spielraum möglicher Interpretationen wird dadurch erheblich eingeengt.

6 Radioökologische Dosisabschätzungen

6.1 Bezug

Im Bericht [1] wurden Dosisabschätzungen vorgenommen, um die Strahlenexpositionen von Einzelpersonen der Bevölkerung durch die Ableitung von tritiumhaltigem Permeat quantifizieren zu können. Als Bezug wurde eine Tritiumkonzentration im Permeat von 217 Bq/l gewählt. Dieser Wert entsprach dem Mittelwert aus drei im Jahr 2015 ermittelten Messwerten. Im Jahr 2019 betrug die Tritiumkonzentration im Permeat noch (186 ± 9) Bq/l (ermittelt als arithmetischer Mittelwert von 12 Einzelmessungen aus 11 Monaten) und die Ableitmenge hat sich deutlich verringert. Außerdem liegen mehrjährige Beobachtungsergebnisse vor, die es erlauben, die Verdünnung von Tritium im Gewässersystem besser zu quantifizieren. Aus diesem Grund wird die Dosisabschätzung im Folgenden aktualisiert.

6.2 Einwirkstellen und Verdünnungsfaktoren

Als ungünstigste Einwirkstelle für den lokalen Anbau von Obst und Gemüse wurde im Bericht [1] eine Gartennutzung in der Siedlung Rupensdorf ausgewiesen. Für diese Nutzung wurde eine Berechnung mit Wasser aus dem Ableitungsgraben vor Einleitung in den Rupensdorfer Bach angenommen. Nach den Daten der Tabelle 3-5 liegen die Mischungsanteile von Permeat in diesem Gewässerabschnitt („Einwirkstelle 1“) bei $(15 \pm 5)\%$ und der Verdünnungsfaktor kann mit 5 bis 10, im Mittel mit (gerundet) 7 angegeben werden. Im Bericht [1] wurde noch mit einem (konservativ festgelegten) Wert des Verdünnungsfaktor von 4 gerechnet.

Die Wiesenflächen entlang des Rupensdorfer Baches stromab der Einleitstelle des Ableitgrabens können grundsätzlich als Weideflächen genutzt werden. Diese Flächen werden wie schon im Bericht [1] als ungünstigste Einwirkstellen einer Erzeugung tierischer Produkte (außer Fischfleisch) zugrunde gelegt (Einwirkstelle 2). Die Mischungsanteile von Permeat in diesem Gewässerabschnitt liegen bei $(3,7 \pm 1,3)\%$ und der Verdünnungsfaktor kann mit 20 bis 42, im Mittel (gerundet mit 27) abgeschätzt werden. Das ist nur unwesentlich mehr als der in [1] benutzte Verdünnungsfaktor von 25.

Ein Verzehr von Fischfleisch aus dem Rupensdorfer Bach / Oberteich ist ebenfalls szenarienseitig anzunehmen. Die Tritiumkonzentration des Bachwassers wird aus der Konzentration des Permeats mit einem Verdünnungsfaktor von 25 errechnet. Für den Oberteich als Gewässer mit Fischbesatz (Einwirkstelle 3) beträgt die Verdünnung nach den Angaben der Tabelle 3-5 zwischen 42 und 100, mit einem Mittelwert von 56.

6.3 Referenzpersonen

Die Dosisermittlung in der Radioökologie erfolgt für Referenzpersonen. Referenzpersonen sind Einzelpersonen der allgemeinen Bevölkerung, für die spezifische Berechnungsparameter (Dosiskoeffizienten, Dosiskonversionskoeffizienten, Atemraten, Expositionsorte, Expositionszeiten sowie Verzehr- und Aufnahmeraten) in den strahlenschutzfachlichen Regelwerken festgelegt sind. In der in diesem Bericht ausgeführten Modellierung werden ausschließlich Einzelpersonen der Bevölkerung betrachtet. Für diese Personen gelten die Dosiskoeffizienten für Tritium nach Tabelle 6-1 und die Verzehraten von lokal erzeugten Nahrungsmitteln nach Tabelle 6-2.

Tabelle 6-1: Dosiskoeffizienten von Tritium in Wassermolekülen (HTO) und als organisch gebundenes Tritium (OBT)

Bindungsform	Ingestion					
	Bev. ≤ 1 a	Bev. 1-2 a	Bev. 2-7 a	Bev.7-12a	Bev.12-17a	Bev. >17 a
	[Sv/Bq]	[Sv/Bq]	[Sv/Bq]	[Sv/Bq]	[Sv/Bq]	[Sv/Bq]
HTO	6,4E-11	4,8E-11	3,1E-11	2,3E-11	1,8E-11	1,8E-11
OBT	1,2E-10	1,2E-10	7,3E-11	5,7E-11	4,2E-11	4,2E-11

6.4 Expositionspfade

Tritium führt aufgrund seiner Strahlungseigenschaften (s. Kapitel 1) nur bei Inkorporation zu einer Strahlenexposition. Als einziger effektiver Expositionsweg ist unter den hier zu betrachtenden Standortbedingungen der Verzehr von lokal erzeugten Lebensmitteln wirksam, die als Pflanzen mit Wasser beregnet oder als Vieh mit Wasser getränkt wurden, welches abgeleitetes Permeat enthielt. Der Verzehr solcher Lebensmittel deckt bei realistischer Betrachtung in Deutschland nur einen Teil des gesamten Verzehrs der jeweiligen Lebensmittelgruppe ab. Die Berechnungsgrundlagen Bergbau des BfS (BglBb) [2] sehen daher vor, beim Expositionsszenario „Verzehr lokal erzeugter Lebensmittel“ von den mittleren jährlichen Verzehraten (s. Tabelle 6-2) auszugehen und in der Regel anzunehmen, dass der jährliche Verzehr landwirtschaftlicher Produkte nur zu $p_n = 50\%$ durch Lebensmittel abgedeckt wird, die lokal produziert wurden. Für Getreide ist gemäß der BglBb in der Regel kein Anteil an lokaler Produktion anzunehmen.

Im Unterschied zu den BglBb geht die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV (AVV) [3], die für den Nachweis der Einhaltung von Grenzwerten bei Ableitungen aus einer strahlenschutzrechtlich zugelassenen oder kerntechnischen Anlage zu verwenden ist, von einer vollständigen Eigenversorgung aus (100 % Anteil lokaler Produktion, p_n) und erhöht die Verzehraten durch einen anzuwendenden Faktor (hier als q_n bezeichnet) auf das für deutsche Verzehrgeohnheiten 95%-Perzentil der jeweiligen Produkte.

Tabelle 6-2: Mittlere Verzehraten der Referenzperson von pflanzlichen und tierischen Lebensmitteln in kg/a und anzuwendender Faktor zur Abdeckung des 95 % Perzentils nach Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV [4]

Altersgruppe Lebensmittel	≤ 1 Jahr	1-2 Jahre	2-7 Jahre	7-12 Jahre	12-17 Jahre	> 17 Jahre	Faktor q _n
Milch, Milchprodukte	45	160	160	170	170	130	3
Fleisch, Wurst, Eier	5	13	50	65	80	80	2
Fisch	0,5	3	3	4,5	5	7,5	5
Pflanzliche Produkte	75	138	227	259	271	253	
- Getreide (-produkte)	12	30	80	95	110	110	2
- Obst (-produkte)	25	45	65	65	60	35	3
- Wurzelgemüse	30	40	45	55	55	55	3
- Blattgemüse	3	6	7	9	11	13	3
-Gemüse (-produkte)	5	17	30	35	35	40	3

Um in dieser Studie, die sich auf Expositionen aus künstlich erzeugtem Tritium bezieht, die zur Überprüfung rechtlicher Anforderungen im Strahlenschutz übliche Konservativität einzurechnen, wird angelehnt an die AVV zu § 47 StrlSchV mit 100 % Anteil lokaler Produktion (p_n= 1) und Verzehraten des 95%-Perzentils der jeweiligen Produkte (Werte nach Tabelle 6-2 multipliziert mit q_n) gerechnet. Aufgrund der lokalen Gegebenheiten ist für Getreide und Getreideprodukte nicht von einem Eigenanbau auszugehen.

6.5 Modellgleichungen

Die effektive Jahresdosis einer Referenzperson j durch Verzehr lokal erzeugter pflanzlicher und tierischer Lebensmittel errechnet sich zu

$$E_{Ing,j} = \sum_n q_n \cdot U_{n,j} \cdot \sum_r g_{Ing,r,j} \cdot C_{n,r} \quad (1)$$

C_{n,r} = Spezifische Aktivität in Bq/kg bzw. Aktivitätskonzentration in Bq/l des Radionuklids r im Lebensmittel n

U_{n,j} = Mittlerer Jahresverbrauch des Lebensmittels n durch die Referenzperson j in kg bzw. l

q_n = Wichtungsfaktor zur Abschätzung des 95 % Konfidenzniveaus der Verzehrrate U_n

g_{Ing,r,j} = Ingestionsdosiskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j in Sv/Bq

n = Index zur Kennzeichnung der Lebensmittel (Mi = Milch und Milchprodukte, Fl= Fleisch und Fleischwaren, Fi = Fischfleisch, Gm = Gemüse außer Blatt- und Wurzelgemüse, Bl = Blattgemüse, Wg = Wurzelgemüse, Ob = Obst, MM = Muttermilch)

Für den Pfad Fließgewässer – Beregnung – Pflanze ist gemäß den Erläuterungen in Kapitel 5.5.4 AVV [3] für Tritium in Form tritiierten Wassers die spezifische Aktivität in pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse, in Blattgemüse und in Weidepflanzen, gleich der des Beregnungswassers zu setzen. Der Massenanteil des Wassers in der Pflanze wird in Anlage 4 AVV mit 0,8 angegeben.

Die Berechnung erfolgt nach:

$$C_{H-3}^{Pf} = C_{H-3}^{Fließ} \cdot f_H^{Pf} \quad (2)$$

mit

C_{H-3}^{n-Pf}	Spezifische Aktivität von Tritium in Pflanzen der Gruppe n in Bq/kg
$C_{H-3}^{Fließ}$	Tritiumkonzentration im Gewässer in Bq/l
f_H^{Pf}	Massenanteil des Wassers in der Pflanze (= 0,8)

Die spezifische Aktivität von Milch und Fleisch durch Futter, welches durch Beregnung kontaminiert wurde, berechnet sich (bei Vernachlässigung des radioaktiven Zerfalls) gemäß

$$C_{H-3}^{Mi,Fl} = C_{H-3}^{Fu} \cdot \dot{M}_{Fu} \cdot T_{H-3}^{Mi,Fl} \quad (3)$$

mit

$C_{H-3}^{Mi,Fu}$	Spezifische Aktivität von Tritium in Milch (Mi) bzw. Fleisch (Fl) in Bq/kg
C_{H-3}^{Fu}	Tritiumkonzentration im Viehfutter in Bq/kg
\dot{M}_{Fu}	Tägliche Aufnahme von Futter (Feuchtmasse) (= 65 kg/d)
$T_{H-3}^{Mi,Fl}$	Transferfaktor vom Futter zur Milch bzw. zum Fleisch (= 0,02 d/kg)

Für den Spezialfall Tritium gibt die AVV vor, dass bei Tritium in Form tritiierten Wassers die spezifische Aktivität in Weidepflanzen C^{Wd} bei Beregnung gleich der des Beregnungswassers $C^{Fließ}$ zu setzen ist. Dieser Ansatz wird hier konservativ auch auf Lagerfutter und damit auf das gesamte Jahr ausgedehnt.

Für die spezifische Aktivität von Milch und Fleisch durch Viehtränke aus einem Fließgewässer gilt

$$C_{H-3}^{Mi,Fl} = C_{H-3}^{Fließ} \cdot T_{H-3}^{Mi,Fl} \cdot L \quad (4)$$

wobei außer den schon erläuterten Symbolen

L	Täglicher Wasserkonsum der Kuh (= 75 l/d)
---	---

Mit den Transferfaktoren von 0,02 d/kg und der tägliche Aufnahmemenge von Futter bzw. Wasser der Viehtränke errechnen sich Konzentrationsfaktoren von 1,3 (Futter) bzw. 1,5 (Viehtränke). Eine solche Anreicherung der Konzentration findet bei Tritium in Form von HTO physikalisch nicht statt. Soweit durch Einbau in organische Verbindungen das Tritium als organisch gebunden vorkommt, kann es (theoretisch) zu solchen Aufkonzentrationen kommen. Höhere Konzentrationen sind physikalisch unplausibel. Aus diesem Grund wird die Tritiumkonzentration in Lebensmitteln auf einen Maximalwert von $1,5 \cdot C^{Fließ}$ begrenzt.

Für die spezifische Aktivität von Fischfleisch aus einem Fließgewässer gilt

$$C_{H-3}^{Fi} = C_{H-3}^{Fließ} \cdot T_{H-3}^{Fi} \quad (5)$$

Mit

$$T_{H-3}^{Fi} \quad \text{Transferfaktor vom Wasser zum Fischfleisch (= 1)}$$

Für die Strahlenexposition der Referenzperson „Säugling“ durch Verzehr von Muttermilch wird folgendes Modell benutzt: Die Tritiumkonzentration in der Muttermilch wird als gewogenes Mittel der technologischen Tritiumkonzentrationen in der Nahrung der Mutter gemäß

$$C_{H-3}^{MM} = \frac{C_{H-3}^{Pf} \cdot m^{Pf} + C_{H-3}^{Mi} \cdot m^{Mi} + C_{H-3}^{Fl} \cdot m^{Fl} + C_{H-3}^{Fi} \cdot m^{Fi}}{m^{Pf} + m^{Mi} + m^{Fl} + m^{Fi} + m^W} \quad (6)$$

berechnet, wobei

$$C_{H-3}^n \quad \text{Spezifische Aktivität von Tritium in pflanzlichen Lebensmitteln (Pf), Milch (Mi), Fleisch (FI), Fisch (Fi) in Bq/kg}$$

$$m^n \quad \text{Jahresverzehr von pflanzlichen Lebensmitteln (Pf), Milch (Mi), Fleisch (FI), Fisch (Fi) und Trinkwasser (W) in kg}$$

sind.

6.6 Ergebnisse

Mit den zuvor beschriebenen Modellen und Modellparametern wurden Modellrechnungen für unterschiedliche Parametersätze ausgeführt. Das im Bericht [1] beschriebene Modell wurde dabei um organisch gebundenes Tritium (OBT) erweitert. Die Anteile an OBT spielen nur in den von Personen verzehrten Lebensmitteln eine Rolle. Die Parameter wurden zunächst empirisch festgelegt, wobei für tierische Produkte die rechnerische Anreicherung von Tritiumkonzentrationen dem OBT zugewiesen wurde (s. Kapitel 6.5).

In einer Basisvariante wurde als Permeatkonzentration ein Wert von 186 Bq/l benutzt und die mittleren Verdünnungsfaktoren der Einwirkstellen (EWS) wie im Kapitel 6.2 beschrieben zugrunde gelegt. Diese Modellrechnung ist als Anlage 3 „Musterdokumentation Basisvariante“ dem Bericht beigelegt.

Zur Bestimmung von Extremvarianten wurden die bei den geringsten und höchsten Verdünnungsfaktoren nach Kapitel 6.2 auftretenden Dosiswerte ebenfalls modelliert. Um einen Vergleich mit dem Modell aus 2016 [1] zu ermöglichen, wurde eine Bezugsvariante mit den dort benutzten Parametern berechnet. Eine Zusammenstellung der Modellparameter enthält Tabelle 6-3.

Tabelle 6-3: Modellvarianten

	H-3 im Permeat in Bq/l	Verdünnungsfaktor (Einwirkstelle 1)	Verdünnungsfaktor (Einwirkstelle 2)	Verdünnungsfaktor (Einwirkstelle 3)
Basisvariante	186	7	27	56
Variante Max	186	5	20	42
Variante Min	186	10	42	100
Bezugsvariante 2016	217	4	25	25

Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind in Tabelle 6-4 zusammengestellt. Die Ergebnisse der Bezugsvariante stimmen bei der besonders sensiblen Altersgruppe $\leq 1a$ mit den Ergebnissen aus [1] überein, bei den anderen Altersgruppen fallen sie als Folge der Begrenzung der Tritiumkonzentrationen in den tierischen Produkten etwas niedriger aus.

Tabelle 6-4: Modellergebnisse für Referenzpersonen von der Kategorie „Bevölkerung“

	Bev. $\leq 1 a$ $\mu\text{Sv/a}$	Bev. 1-2 a $\mu\text{Sv/a}$	Bev. 2-7 a $\mu\text{Sv/a}$	Bev. 7-12 a $\mu\text{Sv/a}$	Bev. 12-17 a $\mu\text{Sv/a}$	Bev. $>17 a$ $\mu\text{Sv/a}$
Basisvariante	0,52	0,46	0,34	0,33	0,25	0,22
Variante Max	0,73	0,64	0,48	0,47	0,35	0,31
Variante Min	0,36	0,32	0,24	0,23	0,18	0,16
Bezugsvar. 2016	1,04	0,92	0,68	0,66	0,50	0,45

Die aus den Ableitungen des Permeats resultierenden effektiven Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung werden mit deutlich unter $1 \mu\text{Sv}$ im Kalenderjahr modelliert. Verglichen mit der Bezugsvariante (und den im Bericht [1] ermittelten Dosen) sind die neu abgeschätzten Dosiswerte nur noch ca. halb so groß.

Dosisbestimmende Produkte sind Muttermilch (beim Säugling) und ansonsten Obst und Wurzelgemüse (Abbildung 6-1). Milch, Fleisch und Fisch tragen kaum zur Dosis bei.

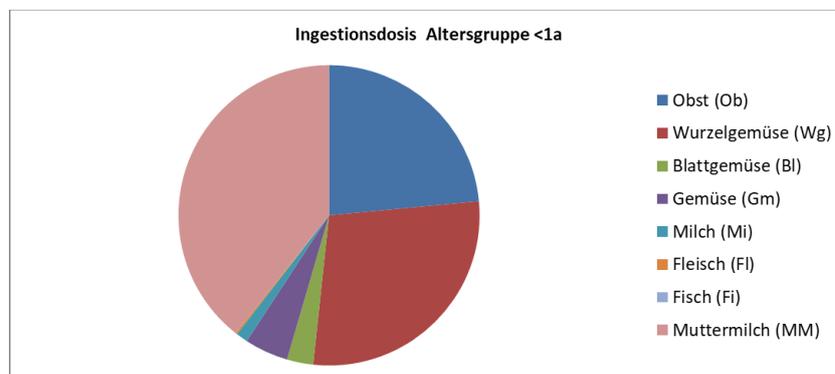


Abbildung 6-1: Relative Dosisbeiträge von Nahrungsmitteln aus lokalem Anbau

Auf die generelle Konservativität der Modellwerte im Vergleich zu den real zu erwartenden Dosen ist hinzuweisen. Ausführliche Erläuterungen dazu wurden im Bericht [1] gegeben.

Aus strahlenschutzfachlicher Sicht sind die Ableitungen des Tritiums mit dem Permeat belanglos.

7 Literatur

- [1] Radioökologische Untersuchung zum Tritium im Deponiesickerwasser der Deponie Ihlenberg. NCC GmbH (R. Gellermann, J. Krägenow, Chr. Ahrens). 25.11.2016
- [2] Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlage – Bergbau). Bundesamt für Strahlenschutz, März 2010. urn:nbn:de:0221-20100329966
- [3] Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung vom 28. August 2012. Bundesanzeiger AT 05.09.2012 B1
- [4] Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 29. November 2018 (BGBl I Nr. 41 S. 2036)

ANLAGEN

Objektname	Proben-Nr	Datum PN	Tritium [Bq/l]
Ablauf Permeatbecken	4013/13	13.08.2013	250
Ablauf Permeatbecken	5926/13	12.11.2013	259
Ablauf Permeatbecken		18.11.2014	272
Ablauf Permeatbecken	8158/15	13.11.2015	208
Ablauf Permeatbecken	8612/16	17.11.2016	174
Ablauf Permeatbecken	6989/17	10.10.2017	168
Ablauf Permeatbecken	11147/18	11.12.2018	188
Ablauf Permeatbecken		30.01.2019	185
Ablauf Permeatbecken		12.02.2019	187
Ablauf Permeatbecken		12.03.2019	199
Ablauf Permeatbecken		25.03.2019	190
Ablauf Permeatbecken		09.04.2019	189
Ablauf Permeatbecken		14.05.2019	192
Ablauf Permeatbecken		28.06.2019	188
Ablauf Permeatbecken		09.07.2019	185
Ablauf Permeatbecken		13.08.2019	188
Ablauf Permeatbecken		23.10.2019	187
Ablauf Permeatbecken		28.10.2019	182
Ablauf Permeatbecken		12.11.2019	180
Ablauf Permeatbecken		10.12.2019	161
Ablauf Permeatbecken		14.01.2020	178
Ablauf Permeatbecken		11.02.2020	178
Ablauf Permeatbecken		06.03.2020	176
Ablauf Permeatbecken		07.04.2020	175
Ablauf Permeatbecken		12.05.2020	172
Ablauf Permeatbecken		09.06.2020	166

Objektname	Proben-Nr	Datum PN	Tritium [Bq/l]
Ablauf Oberteich	5938/13	12.11.2013	5,6
Ablauf Oberteich	8164/15	13.11.2015	4,6
Ablauf Oberteich	8618/16	17.11.2016	3,1
Ablauf Oberteich	7075/17	10.10.2017	1,7
Ablauf Oberteich	11165/18	11.12.2018	3,4
Ablauf Oberteich		23.10.2019	2,1
Ablauf Staatsforst	4004/13	13.08.2013	230
Ablauf Staatsforst	5929/13	12.11.2013	67
Ablauf Staatsforst	8158/15	13.11.2015	36
Ablauf Staatsforst	8613/16	17.11.2016	33
Ablauf Staatsforst	6992/17	10.10.2017	8,8
Ablauf Staatsforst	11150/18	11.12.2018	42
Ablauf Staatsforst		23.10.2019	23
Deponiewasser vor Eintritt Rupen	4015/13	13.08.2013	140
Deponiewasser vor Eintritt Rupen	5938/13	12.11.2013	40
Deponiewasser vor Eintritt Rupen	8158/15	13.11.2015	29
Deponiewasser vor Eintritt Rupen	8614/16	17.11.2016	23
Deponiewasser vor Eintritt Rupen	7071/17	10.10.2017	4,9
Deponiewasser vor Eintritt Rupen	11161/18	11.12.2018	46
Deponiewasser vor Eintritt Rupensdorfer		23.10.2019	19
Rupensdorfer Bach (Mischwasser)	4016/13	13.08.2013	20
Rupensdorfer Bach (Mischwasser)	5938/13	12.11.2013	11
Rupensdorfer Bach (Mischwasser)	8157/15	13.11.2015	7,2
Rupensdorfer Bach (Mischwasser)	8615/16	17.11.2016	8,2
Rupensdorfer Bach (Mischwasser)	7072/17	10.10.2017	2
Rupensdorfer Bach (Mischwasser)	11163/18	11.12.2018	10
Rupensdorfer Bach (Mischwasser)		23.10.2019	3,8
Rupensdorfer Bach (unbelastet)	5938/13	15.11.2013	0,57
Rupensdorfer Bach (unbelastet)	8162/15	13.11.2015	0,59
Rupensdorfer Bach (unbelastet)	8616/16	17.11.2016	0,29
Rupensdorfer Bach (unbelastet)	7073/17	10.10.2017	0,98
Rupensdorfer Bach (unbelastet)	11162/18	11.12.2018	0,5
Rupensdorfer Bach (unbelastet)		23.10.2019	0,77
Zulauf Oberteich	5938/13	15.11.2013	4,8
Zulauf Oberteich	8163/15	13.11.2015	4
Zulauf Oberteich	8617/16	17.11.2016	4,7
Zulauf Oberteich	7074/17	10.10.2017	1,6
Zulauf Oberteich	11164/18	11.12.2018	5,1
Zulauf Oberteich		23.10.2019	1,9

Datum PN	13.08.2013	18.11.2014	26.04.2017	15.11.2018
PN-Stelle	C in Bq/l	C in Bq/l	C in Bq/l	C in Bq/l
SW 0			264	246
SW 1		253		244
SW 11		106		61
SW 14 (S5.1)	53	27		28
SW 15				50
SW 18 (S1.9)	133			48
SW 20 Konz.		246		289
SW 22				48
SW 23 (S4C)	118	63		132
SW 46 (GS7.4)	180	973		667
SW 51				219
SW 52				161
SW 53				73
SW PW Süd E	327	164		228
SW PW Süd E	234	357		248
SW PW C				388
GS4.03		88		
GS4.05	93			

Kurzbezeichnung	Filter von [m.u. GOK]	Filter bis [m.u.GOK]	Probenname	Datum	Tritium [Bq/l]
GW 100	63	68	0903/14	03.03.2014	<0,12
GW 1001	36,1	41,1	0064/14	08.01.2014	0,96
GW 210	36	40	2917/14	26.05.2014	0,53
GW 50	11,7	13,7	4435/13	02.09.2013	9
GW 50	11,7	13,7	5733/13	06.11.2013	10,8
GW 50	11,7	13,7	0939/14	05.03.2014	21,5
GW 603	12	14	7645/15	27.10.2015	32
GW 603	12	14	0686/17	30.01.2017	29
GW 603	12	14	0009/17	14.07.2017	16
GW 603	12	14	0014/17	20.09.2017	11
GW 603	12	14	0783/18	31.01.2018	10
GW 603	12	14	8245/18	17.09.2018	11
GW 603	12	14		12.11.2018	11
GW 603	12	14		30.01.2019	10
GW 67	10	14	2628/18	09.04.2018	1,5
GW 67	10	14		08.04.2019	2,1
GW 98	30	34	2629/18	09.04.2018	0,69
GW 98	30	34		24.04.2019	0,78

Jahr	Niederschlag	Siwa zulauf	Permeat	Konzentrat	Konzentrat	Konzentrat
		netto	eingeleitet	erzeugt	verfestigt	Fremd m ³
	mm	m ³				
1993	945	255777	259855	30000	21269	0
1994	897	297320	300504	34882	24316	0
1995	611	193583	215989	40260	36923	0
1996	430	109800	76779	22408	24827	0
1997	557	143420	102729	21951	19874	766
1998	865	235560	185152	31042	32762	2500
1999	621	184592	163985	33553	36998	4654
2000	667	167889	163746	30517	33959	4080
2001	697	175013	137583	25640	29515	2537
2002	990	267875	222488	32829	31455	1805
2003	467	121736	113797	34236	37578	0
2004	701	145789	135614	31860	27706	0
2005	508	113885	101072	12334	13970	307
2006	551	132030	100426	28516	10456	1907
2007	881	181315	151219	34444	33193	2861
2008	668	153963	112458	48317	44809	5945
2009	650	142698	97476	42695	42869	5887
2010	846	218970	144221	51693	53742	3550
2011	758	202695	167473	43192	43529	0
2012	610	142703	124508	36099	36182	0
2013	637	129982	117720	33632	34778	0
2014	643	121183	84664	22278	16936	0
2015	662	117014	97965	18297	19049	0

Monate	SW-Zulauf in m ³	in der SWBA gereinigtes SW in m ³	In die Vorflut abgeleitetes Permeat in m ³
Jan 11	26.557,00	16.370,00	12.239,00
Feb 11	23.612,00	19.241,00	14.520,00
Mrz 11	12.077,00	20.270,00	15.105,00
Apr 11	8.522,00	21.458,00	15.897,00
Mai 11	9.224,00	16.883,00	10.673,00
Jun 11	18.845,00	17.918,00	12.568,00
Jul 11	16.010,00	17.210,00	14.418,00
Aug 11	30.086,00	20.890,00	17.982,00
Sep 11	15.632,00	20.177,00	16.499,00
Okt 11	9.764,00	18.743,00	15.175,00
Nov 11	9.914,00	13.692,00	11.694,00
Dez 11	22.452,00	7.813,00	8.205,00
Jan 12	23.206,00	10.683,00	9.693,00
Feb 12	9.859,00	12.591,00	9.765,00
Mrz 12	8.299,00	15.525,00	11.623,00
Apr 12	9.490,00	15.496,00	11.218,00
Mai 12	9.683,00	11.459,00	7.375,00
Jun 12	9.958,00	15.094,00	11.742,00
Jul 12	13.061,00	15.861,00	12.086,00
Aug 12	10.129,00	16.431,00	14.061,00
Sep 12	7.228,00	14.053,00	8.949,00
Okt 12	12.312,00	12.755,00	10.600,00
Nov 12	9.765,00	13.638,00	10.920,00
Dez 12	19.713,00	7.021,00	4.949,00
Jan 13	17.472,00	11.556,00	8.346,80
Feb 13	15.650,00	17.882,00	14.828,20
Mrz 13	11.037,00	17.978,00	14.052,70
Apr 13	11.300,00	14.247,00	11.014,20
Mai 13	18.302,00	12.816,00	7.714,20
Jun 13	10.105,00	14.463,00	12.726,50
Jul 13	9.496,00	14.322,00	10.595,50
Aug 13	9.162,00	9.706,00	6.938,40
Sep 13	8.294,00	11.315,00	8.319,30
Okt 13	8.433,00	8.690,00	5.939,60
Nov 13	15.468,00	12.214,00	9.589,70
Dez 13	11.225,00	7.760,00	6.758,00
Jan 14	14.911,00	11.418,00	9.004,30
Feb 14	10.128,00	10.340,00	8.334,20
Mrz 14	7.565,00	11.116,00	8.657,30
Apr 14	8.669,00	10.067,00	7.791,50
Mai 14	8.520,00	9.511,00	6.507,30
Jun 14	8.732,00	7.000,00	4.498,70
Jul 14	8.742,00	10.487,00	7.395,70
Aug 14	9.564,00	9.733,00	7.195,60
Sep 14	7.784,00	7.882,00	6.066,20
Okt 14	8.458,00	7.370,00	6.230,50
Nov 14	7.569,00	7.614,00	6.021,20
Dez 14	20.541,00	4.404,00	4.874,90

Jan 15	17.526,00	13.595,00	12.336,80
Feb 15	7.114,00	14.726,00	13.153,20
Mrz 15	8.921,00	15.447,00	13.569,60
Apr 15	7.393,00	10.645,00	8.465,40
Mai 15	6.836,00	6.703,00	4.725,60
Jun 15	5.328,00	6.167,00	3.252,80
Jul 15	8.630,00	5.075,00	2.905,10
Aug 15	10.519,00	11.289,00	9.338,20
Sep 15	6.846,00	9.688,00	8.002,40
Okt 15	6.414,00	7.185,00	5.516,90
Nov 15	14.906,00	10.080,00	9.182,50
Dez 15	10.477,00	6.414,00	6.579,10
Jan 16	9.129,00	10.919,00	9.436,70
Feb 16	13.230,00	10.476,00	10.228,60
Mrz 16	7.784,00	10.716,00	8.010,90
Apr 16	5.487,00	7.098,00	5.703,00
Mai 16	6.483,00	6.752,00	5.609,70
Jun 16	8.769,00	6.031,00	3.252,80
Jul 16	8.602,00	8.208,00	6.890,00
Aug 16	7.728,00	8.723,00	7.267,90
Sep 16	4.889,00	7.331,00	5.375,30
Okt 16	8.507,00	8.325,00	7.288,20
Nov 16	11.557,00	9.283,00	7.846,20
Dez 16	10.279,00	7.212,00	5.529,10
Jan 17	10.252,00	8.358,94	7.814,00
Feb 17	8.859,00	10.704,94	8.211,00
Mrz 17	8.854,00	11.435,94	10.656,00
Apr 17	5.851,00	4.589,94	773,80
Mai 17	6.531,00	6.910,94	6.070,00
Jun 17	8.450,00	5.982,94	5.105,00
Jul 17	18.076,00	4.794,94	3.929,00
Aug 17	7.405,00	9.932,94	7.682,00
Sep 17	11.688,00	7.963,94	6.933,80
Okt 17	18.207,00	10.010,94	9.298,80
Nov 17	13.109,00	12.048,94	11.006,60
Dez 17	13.028,00	8.255,94	8.377,40
Jan 18	14.782,00	13.681,54	13.281,70
Feb 18	8.166,00	11.049,32	10.853,10
Mrz 18	13.928,00	10.566,45	10.221,40
Apr 18	9.801,00	10.557,18	9.153,70
Mai 18	5.616,00	10.153,62	7.516,10
Jun 18	5.845,00	10.556,34	7.712,90
Jul 18	5.833,00	10.090,78	5.738,70
Aug 18	7.166,00	9.030,05	4.536,70
Sep 18	5.410,00	8.361,41	5.747,30
Okt 18	4.621,00	7.071,59	3.627,00
Nov 18	4.654,00	6.415,26	4.290,80
Dez 18	7.667,00	3.674,72	3.918,90
Jan 19			3.560,30
Feb 19			4.360,10
Mrz 19			5.683,40

Apr 19			4.383,50
Mai 19			3.794,80
Jun 19			4.734,30
Jul 19			4.141,20
Aug 19			4.797,50
Sep 19			5.152,70
Okt 19			6.500,20
Nov 19			7.245,60
Dez 19			4.410,70

Zeit	In die Vorflut abgeleitetes Permeat in m ³	Q in m ³ /d	Cmess in Bq/l	Cmess (interpol.) in Bq/l	Aab in GBq	Azu	A1	C(Model) in Bq/l	A0 + Azu(kum) in GBq
Jan 11	12.239,00	394,81		629,9	7,71		50,00	629,87	50,00
Feb 11	14.520,00	518,57		620,6	9,01	6,98	49,03	617,66	56,98
Mrz 11	15.105,00	487,26		612,3	9,25	8,59	48,40	609,67	65,56
Apr 11	15.897,00	529,90		603,1	9,59	8,73	47,64	600,20	74,29
Mai 11	10.673,00	344,29		594,2	6,34	9,11	46,95	591,40	83,40
Jun 11	12.568,00	418,93		584,9	7,35	5,83	46,21	582,13	89,23
Jul 11	14.418,00	465,10	576	576	8,30	6,86	45,51	573,33	96,09
Aug 11	17.982,00	580,06		566,8	10,19	7,78	44,78	564,06	103,87
Sep 11	16.499,00	549,97		557,5	9,20	9,67	44,05	554,88	113,55
Okt 11	15.175,00	489,52		548,6	8,33	8,70	43,35	546,08	122,25
Nov 11	11.694,00	389,80		539,4	6,31	7,79	42,61	536,81	130,05
Dez 11	8.205,00	264,68		530,5	4,35	5,80	41,91	528,00	135,85
Jan 12	9.693,00	312,68		521,2	5,05	3,82	41,18	518,74	139,67
Feb 12	9.765,00	336,72		512,0	5,00	4,52	40,45	509,55	144,18
Mrz 12	11.623,00	374,94		503,4	5,85	4,51	39,78	501,12	148,69
Apr 12	11.218,00	373,93		494,2	5,54	5,30	39,04	491,78	153,99
Mai 12	7.375,00	237,90		485,2	3,58	5,02	38,34	482,97	159,01
Jun 12	11.742,00	391,40	476	476,0	5,59	3,03	37,60	473,71	162,04
Jul 12	12.086,00	389,87		461,1	5,57	4,59	36,43	458,93	166,63
Aug 12	14.061,00	453,58		445,7	6,27	4,52	35,21	443,53	171,15
Sep 12	8.949,00	298,30		430,3	3,85	5,22	33,99	428,20	176,37
Okt 12	10.600,00	341,94		415,4	4,40	2,83	32,82	413,44	179,20
Nov 12	10.920,00	364,00	400	400,0	4,37	3,34	31,60	398,04	182,54
Dez 12	4.949,00	159,65		386,9	1,91	3,48	30,57	385,08	186,02
Jan 13	8.346,80	269,25		373,4	3,12	0,99	29,49	371,55	187,01
Feb 13	14.828,20	529,58		359,8	5,34	2,19	28,43	358,09	189,20
Mrz 13	14.052,70	453,31		347,6	4,89	4,51	27,47	346,09	193,70
Apr 13	11.014,20	367,14		334,1	3,68	3,93	26,39	332,45	197,63

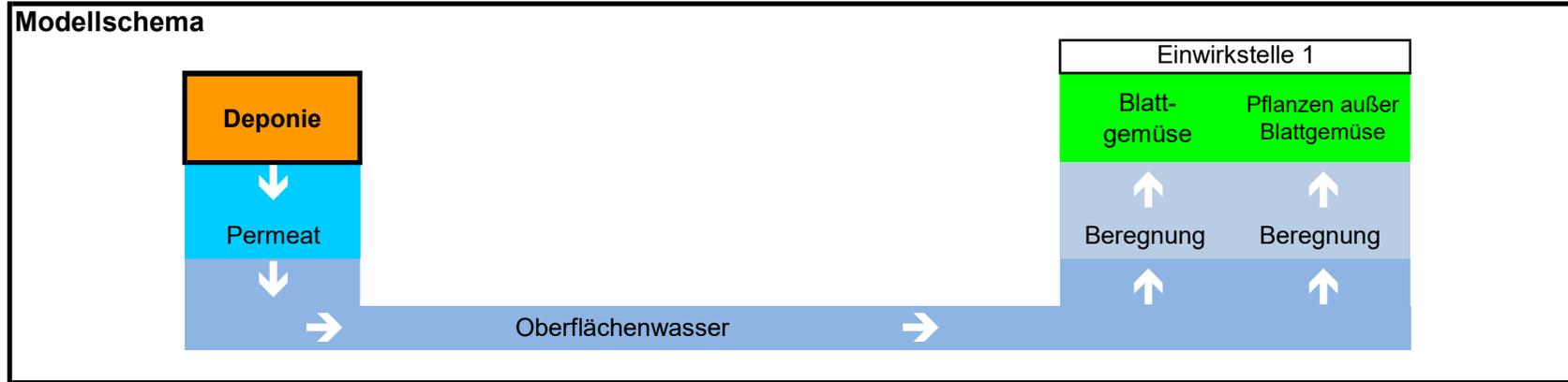
'=A0

Zeit	In die Vorflut abgeleitetes Permeat in m ³	Q in m ³ /d	Cmess in Bq/l	Cmess (interpol.) in Bq/l	Aab in GBq	Azu	A1	C(Model) in Bq/l	A0 + Azu(kum) in GBq
Mai 13	7.714,20	248,85	321	321,0	2,48	2,77	25,36	319,48	200,40
Jun 13	12.726,50	424,22		297,1	3,78	0,70	23,46	295,56	201,10
Jul 13	10.595,50	341,79		273,9	2,90	2,06	21,64	272,57	203,17
Aug 13	6.938,40	223,82	250	250,0	1,73	1,11	19,74	248,71	204,28
Sep 13	8.319,30	277,31		261,5	2,18	2,75	20,66	260,28	207,02
Okt 13	5.939,60	191,60		272,5	1,62	3,15	21,54	271,35	210,17
Nov 13	9.589,70	319,66	284	284,0	2,72	2,62	22,44	282,71	212,79
Dez 13	6.758,00	218,00		276,5	1,87	2,23	21,85	275,20	215,02
Jan 14	9.004,30	290,46		268,8	2,42	1,36	21,23	267,45	216,38
Feb 14	8.334,20	297,65		261,0	2,18	1,91	20,62	259,73	218,29
Mrz 14	8.657,30	279,27	254	254,0	2,20	1,72	20,07	252,89	220,01
Apr 14	7.791,50	259,72		256,5	2,00	2,48	20,26	255,26	222,49
Mai 14	6.507,30	209,91		258,8	1,68	2,28	20,45	257,68	224,77
Jun 14	4.498,70	149,96		261,3	1,18	1,97	20,65	260,09	226,75
Jul 14	7.395,70	238,57		263,7	1,95	1,46	20,84	262,50	228,21
Aug 14	7.195,60	232,12		266,2	1,92	2,24	21,03	264,91	230,45
Sep 14	6.066,20	202,21		268,6	1,63	2,21	21,22	267,36	232,66
Okt 14	6.230,50	200,98	271	271,0	1,69	1,92	21,42	269,77	234,58
Nov 14	6.021,20	200,71	272	272,0	1,64	1,87	21,49	270,72	236,44
Dez 14	4.874,90	157,25		256,5	1,25	0,51	20,26	255,26	236,95
Jan 15	12.336,80	397,96		240,5	2,97	0,08	18,99	239,27	237,03
Feb 15	13.153,20	469,76		224,5	2,95	1,79	17,73	223,33	238,82
Mrz 15	13.569,60	437,73	210	210,0	2,85	1,89	16,59	209,04	240,71
Apr 15	8.465,40	282,18		212,2	1,80	3,10	16,76	211,18	243,81
Mai 15	4.725,60	152,44		214,3	1,01	2,04	16,93	213,31	245,85
Jun 15	3.252,80	108,43		216,4	0,70	1,26	17,10	215,44	247,11
Jul 15	2.905,10	93,71		218,6	0,63	0,95	17,27	217,56	248,07
Aug 15	9.338,20	301,23		220,7	2,06	0,89	17,44	219,69	248,95

Zeit	In die Vorflut abgeleitetes Permeat in m ³	Q in m ³ /d	Cmess in Bq/l	Cmess (interpol.) in Bq/l	Aab in GBq	Azu	A1	C(Model) in Bq/l	A0 + Azu(kum) in GBq
Sep 15	8.002,40	266,75		222,9	1,78	2,32	17,61	221,86	251,27
Okt 15	5.516,90	177,96	225	225,0	1,24	2,03	17,78	223,98	253,30
Nov 15	9.182,50	306,08	208	208,0	1,91	0,00	16,45	207,29	253,30
Dez 15	6.579,10	212,23		210,7	1,39	2,18	16,65	209,78	255,48
Jan 16	9.436,70	304,41		213,5	2,02	1,69	16,87	212,55	257,17
Feb 16	10.228,60	352,71		216,4	2,21	2,32	17,10	215,36	259,49
Mrz 16	8.010,90	258,42	219	219,0	1,75	2,50	17,31	218,05	261,99
Apr 16	5.703,00	190,10		216,4	1,23	1,63	17,10	215,38	263,61
Mai 16	5.609,70	180,96		213,9	1,20	1,12	16,90	212,93	264,73
Jun 16	3.252,80	108,43		211,3	0,69	1,07	16,70	210,32	265,81
Jul 16	6.890,00	222,26		208,8	1,44	0,57	16,50	207,87	266,37
Aug 16	7.267,90	234,45		206,3	1,50	1,31	16,29	205,27	267,68
Sep 16	5.375,30	179,18		203,7	1,09	1,37	16,09	202,69	269,06
Okt 16	7.288,20	235,10		201,2	1,47	0,97	15,90	200,24	270,03
Nov 16	7.846,20	261,54	198	198,0	1,55	1,29	15,63	196,84	271,32
Dez 16	5.529,10	178,36		204,8	1,13	2,18	16,20	204,07	273,50
Jan 17	7.814,00	252,06		213,9	1,67	1,91	16,90	212,92	275,41
Feb 17	8.211,00	293,25	223	223,0	1,83	2,47	17,62	221,99	277,88
Mrz 17	10.656,00	343,74		216,6	2,31	1,41	17,12	215,69	279,29
Apr 17	773,80	25,79		209,6	0,16	1,82	16,56	208,57	281,11
Mai 17	6.070,00	195,81		202,8	1,23	0,00	16,32	205,57	281,11
Jun 17	5.105,00	170,17		195,7	1,00	0,45	15,46	194,75	281,56
Jul 17	3.929,00	126,74		188,9	0,74	0,54	14,93	188,02	282,10
Aug 17	7.682,00	247,81		181,9	1,40	0,25	14,37	180,97	282,35
Sep 17	6.933,80	231,13		174,8	1,21	0,91	13,81	173,96	283,26
Okt 17	9.298,80	299,96	168	168,0	1,56	0,74	13,27	167,20	284,00
Nov 17	11.006,60	366,89	179	179,0	1,97	2,50	14,15	178,21	286,50
Dez 17	8.377,40	270,24		173,8	1,46	1,62	13,73	173,02	288,12

Zeit	In die Vorflut abgeleitetes Permeat in m ³	Q in m ³ /d	Cmess in Bq/l	Cmess (interpol.) in Bq/l	Aab in GBq	Azu	A1	C(Model) in Bq/l	A0 + Azu(kum) in GBq
Jan 18	13.281,70	428,44		168,5	2,24	1,10	13,31	167,68	289,22
Feb 18	10.853,10	387,61		163,2	1,77	1,88	12,89	162,36	291,10
Mrz 18	10.221,40	329,72		158,3	1,62	1,45	12,51	157,64	292,55
Apr 18	9.153,70	305,12	153	153,0	1,40	1,25	12,09	152,25	293,80
Mai 18	7.516,10	242,45		162,1	1,22	2,18	12,81	161,40	295,98
Jun 18	7.712,90	257,10		171,5	1,32	2,02	13,55	170,74	298,00
Jul 18	5.738,70	185,12		180,6	1,04	2,11	14,27	179,82	300,11
Aug 18	4.536,70	146,35	190	190,0	0,86	1,84	15,01	189,15	301,95
Sep 18	5.747,30	191,58		190,0	1,09	0,93	15,01	189,10	302,88
Okt 18	3.627,00	117,00		190,0	0,69	1,16	15,01	189,13	304,05
Nov 18	4.290,80	143,03	190	190,0	0,82	0,76	15,01	189,10	304,80
Dez 18	3.918,90	126,42	188	188,0	0,74	0,73	14,85	187,13	305,53
Jan 19	3.560,30	114,85	185	185,0	0,66	0,57	14,62	184,11	306,10
Feb 19	4.360,10	155,72	187	187,0	0,82	0,89	14,78	186,13	306,99
Mrz 19	5.683,40	183,34	194,5	194,5	1,11	1,48	15,38	193,70	308,47
Apr 19	4.383,50	146,12	189	189,0	0,83	0,73	14,93	188,08	309,20
Mai 19	3.794,80	122,41	192	192,0	0,73	1,14	15,17	191,14	310,34
Jun 19	4.734,30	157,81	188	188,0	0,89	0,48	14,85	187,09	310,82
Jul 19	4.141,20	133,59	185	185,0	0,77	0,72	14,62	184,14	311,54
Aug 19	4.797,50	154,76	188	188,0	0,90	1,07	14,85	187,13	312,61
Sep 19	5.152,70	171,76		186,3	0,96	0,83	14,71	185,36	313,45
Okt 19	6.500,20	209,68	184,5	184,5	1,20	0,89	14,58	183,65	314,34
Nov 19	7.245,60	241,52	180	180,0	1,30	0,91	14,22	179,13	315,25
Dez 19	4.410,70	142,28	161	161,0	0,71	0,00	12,85	161,88	315,25

Berechnung der zusätzlichen Strahlenexposition durch Verzehr pflanzlicher Produkte



Modellteil 1: Parameter Einwirkstellen

Permeat
Eingabewert
C
Bq/l
H-3 (HTO) 186

Verdünnungsfaktor

Einwirkstelle 1	
7	Untergrundwert
C	C ^U
Bq/l	Bq/l
2,65E+01	6,00E-01

Modellteil 2: (zusätzliche) spezifische Aktivität in pflanzlichen Produkten

f^{Pf} Massenanteil des Wassers in der Pflanze 0,8

Verhältnis OBT/HTO

HTO
OBT

Standardwert

Ob	WG	BI	Gm
0,2	0,2	0,2	0,2
C-C ^U	C-C ^U	C-C ^U	C-C ^U
Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
1,70E+01	1,70E+01	1,70E+01	1,70E+01
4,24E+00	4,24E+00	4,24E+00	4,24E+00

Modellteil 3: Ingestionsdosis (Pflanzl. Produkte)

p_n			Obst	Wurzelgem.	Blattgemüse	Gemüse
1			(Ob)	(Wg)	(Bl)	(Gm)
	Relevanz		ja	ja	ja	ja
Faktor Sp. 8			3	3	3	3
Bev. <= 1 a	U_n [kg/a]		75	90	9	15
	E_{ing} [mSv/a]		1,20E-04	1,43E-04	1,43E-05	2,39E-05
Bev. 1-2 a	U_n [kg/a]		135	120	18	51
	E_{ing} [mSv/a]		1,78E-04	1,59E-04	2,38E-05	6,74E-05
Bev. 2-7 a	U_n [kg/a]		195	135	21	30
	E_{ing} [mSv/a]		1,63E-04	1,13E-04	1,75E-05	2,50E-05
Bev. 7-12 a	U_n [kg/a]		195	165	27	105
	E_{ing} [mSv/a]		1,23E-04	1,04E-04	1,70E-05	6,63E-05
Bev. 12-17 a	U_n [kg/a]		180	165	33	105
	E_{ing} [mSv/a]		8,70E-05	7,97E-05	1,59E-05	5,07E-05
Bev. >17 a	U_n [kg/a]		105	165	39	120
	E_{ing} [mSv/a]		5,07E-05	7,97E-05	1,88E-05	5,80E-05

Berechnung der zusätzlichen Strahlenexposition durch Verzehr tierischer Produkte



Modellteil 1a - Parameter Einwirkstellen

Permeat
Eingabewert
C
Bq/l
H-3 (HTO)
186

Verdünnungsfaktor

	Einwirkstelle 2	Einw.-stelle3	
	27	56	
Beregnung Weidegras	Tränke	Fisch	Untergrundwert
C	C	C	C ^U
Bq/l	Bq/l	Bq/l	Bq/l
6,87	6,87	3,31	0,60

Modellteil 1b Radioökologische Parameter

f^{Pf}	Massenanteil des Wassers in der Pflanze	1	
M_{Fu}	Weidefutter in kg/d	65	
L	Wasserkonsum in l/d		75

Transferfaktoren

	Einwirkstelle 2	Einw.-stelle3
Futter zu Milch, Fleisch	Tränkwasser zu Milch, Fleisch	Wasser - Fisch
$TM_{i,FI}$	T_{FI}	T_{FI}
d/kg	d/kg	l/kg
2,E-02	2,E-02	1

Modellteil 2: (zusätzliche) spezifische Aktivität in tierischen Produkten

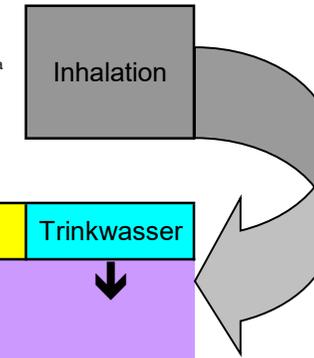
			Einwirkstelle 2		Einwirkstelle 3	
			Weidepflanzen	Milch	Fleisch	Fisch
Verhältnis OBT/HTO			0,03	0,2	0,2	
			C^{Wd}	C^{Mi}	C^{Fi}	C^f
			Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
HTO			6,87	6,87	6,87	2,65
OBT				0,21	1,37	0,66

Modellteil 3: Ingestionsdosis (Tierische Produkte)

P_n			Einwirkstelle 2		Einwirkstelle 3
			Milch, M-Prod.	Fleisch	Fisch
1					
	Relevanz		ja	ja	ja
Bev. <= 1 a	U_n [kg/a]		22,50	2,50	0,25
	E_{ing} [mSv/a]		1,04E-05	1,51E-06	6,22E-08
Bev. 1-2 a	U_n [kg/a]		80	6,5	1,5
	E_{ing} [mSv/a]		2,83E-05	3,21E-06	3,10E-07
Bev. 2-7 a	U_n [kg/a]		80	25	1,5
	E_{ing} [mSv/a]		1,82E-05	7,83E-06	1,96E-07
Bev. 7-12 a	U_n [kg/a]		85	32,5	2,25
	E_{ing} [mSv/a]		1,44E-05	7,68E-06	2,22E-07
Bev. 12-17 a	U_n [kg/a]		85	40	2,5
	E_{ing} [mSv/a]		1,12E-05	7,25E-06	1,89E-07
Bev. >17 a	U_n [kg/a]		65	45	3,75
	E_{ing} [mSv/a]		8,60E-06	8,16E-06	2,83E-07

Berechnung der zusätzlichen Strahlenexposition durch den Verzehr von Muttermilch

$$C_{MM,r} = \frac{T_{MM,r}}{360} \sum_n p_n (C_{n,r} - C_{n,r}^U) \cdot U_{n,>17a} + \frac{T_{MM,inh,r}}{360} \cdot \dot{V}_{>17a} \cdot \sum (C_{Luft,s,r} - C_{Luft,r}^U) \cdot a_{Luft,s} \cdot t_{Exp,>17a}$$



Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel inkl. Trinkwasser

Obst	Wurzelgemüse	Blattgemüse	Gemüse	Milch	Fleisch	Fisch	Trinkwasser
↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓							
Muttermilch							
Un (>17 a)				Un (>17 a)		Un (>17 a)	
105,00				165,00		39,00	
kg/a				kg/a		kg/a	

Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel

Transferfaktor Muttermilch		Obst		Wurzelgemüse		Blattgemüse		Gemüse	
Eingabewerte	Allgemeine Werte	C _{Ob}	C _{MM}	C _{Wg}	C _{MM}	C _{Bl}	C _{MM}	C _{Gm}	C _{MM}
T _{MM,r}	T _{MM,r}								
d/kg	d/kg	Bq/kg							
HTO	0,5	16,95	2,47	16,95	3,88	16,95	0,92	16,95	2,83
OBT	0,5	4,24	0,62	4,24	0,97	4,24	0,23	4,24	0,71

Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel

Un (>17 a)							
65,00		45,00		3,75		350	
kg/a		kg/a		kg/a		l/a	

Transferfaktor Muttermilch		Milch		Fleisch		Fisch		Trinkwasser	
Eingabewerte	Allgemeine Werte	C _{Mi}	C _{MM}	C _{Fl}	C _{MM}	C _n	C _{MM}	C _n	C _{MM}
T _{MM,r}	T _{MM,r}								
d/kg	d/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/l	Bq/kg
HTO	0,5	6,87	0,62	6,87	0,43	2,65	0,01		0,00E+00
OBT	0,5	0,21	0,02	1,37	0,09	0,66	0,00		

Modellierung nach AVV

Tritiumdominierter Nuklidvektor

pn=1	Bev. <= 1 a mSv/a	Bev. 1-2 a mSv/a	Bev. 2-7 a mSv/a	Bev. 7-12 a mSv/a	Bev. 12-17 a mSv/a	Bev. >17 a mSv/a
Obst (Ob)	1,20E-04	1,78E-04	1,63E-04	1,23E-04	8,70E-05	5,07E-05
Wurzelgemüse (Wg)	1,43E-04	1,59E-04	1,13E-04	1,04E-04	7,97E-05	7,97E-05
Blattgemüse (Bl)	1,43E-05	2,38E-05	1,75E-05	1,70E-05	1,59E-05	1,88E-05
Gemüse (Gm)	2,39E-05	6,74E-05	2,50E-05	6,63E-05	5,07E-05	5,80E-05
Milch (Mi)	1,04E-05	2,83E-05	1,82E-05	1,44E-05	1,12E-05	8,60E-06
Fleisch (Fi)	1,51E-06	3,21E-06	7,83E-06	7,68E-06	7,25E-06	8,16E-06
Fisch (Fi)	6,22E-08	3,10E-07	1,96E-07	2,22E-07	1,89E-07	2,83E-07
Muttermilch (MM)	2,06E-04					
Summe [mSv/a]	5,19E-04	4,60E-04	3,44E-04	3,33E-04	2,52E-04	2,24E-04

