



# Eignet sich die AVV zu Risikoabschätzungen bei der Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle?

Dr. Michael Mehnert

05.12.2013





Eine **stark vereinfachte Biosphäre** mit dem Ziel der Nachweisführung über die Einhaltung von Grenzwerten für die Strahlenexposition während einer **50jährigen Betriebsphase** einer kerntechnischen Anlage oder Einrichtung ist in der **Allgemeinen Verwaltungsvorschrift** [AVV. /BMU 90, BfS 01/] festgelegt. Rechenprogramme zur Durchführung von Berechnungen nach der AVV enthalten dementsprechend nicht alle Optionen, die sich bei der Untersuchung der Konsequenzen aus den während der Nachbetriebsphase eines Endlagers möglichen Umweltbedingungen ergeben.

Röhlig (ed.), K.-J., B. Baltes, et al.(2003). Untersuchungen zur Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle nach ihrem Verschluss, BMU. S. 80





## Sieben Ernährungsgruppen: AVV-Entwürfe 2002/2003/2005

1. 17 a
2. 12-17 a
3. 7-12 a
4. 2-7 a
5. 1-2 a
6. < 1 a Muttermilch
7. < 1 a Fertignahrung





In der AVV nicht vorgesehen:

- Aufenthalt auf Feldern und Weiden sowie in Treibhäusern nach Beregnung mit radionuklidhaltigem Wasser,
- Inhalation von resuspendierten Bodenteilchen bei der Feldarbeit und von Wasserdampf im Treibhaus,
- Ingestion von Erde

Röhlig (ed.), K.-J., B. Baltes, et al.(2003). Untersuchungen zur Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle nach ihrem Verschluss, BMU. S. 80



Als besonders sensitiv für die Höhe der Strahlenexposition stellten sich die Höhe der notwendigen Beregnung der Feldfrüchte, das Langzeitverhalten der Radionuklide im Boden und die Inhalation im Treibhaus heraus.

Röhlig (ed.), K.-J., B. Baltes, et al.(2003). Untersuchungen zur Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle nach ihrem Verschluss, BMU.



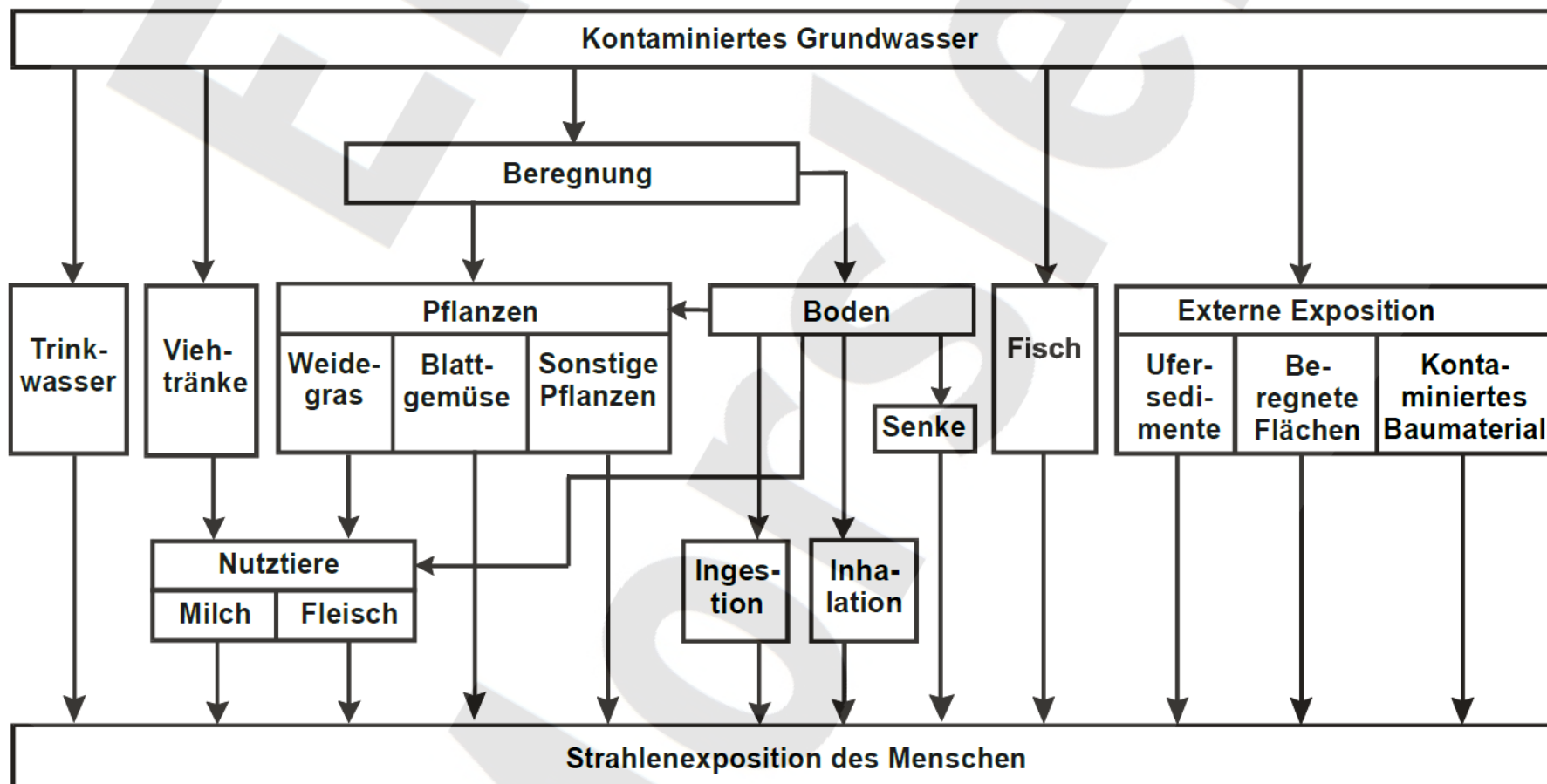
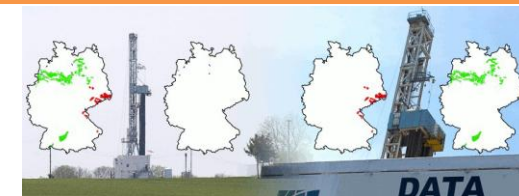


Abbildung 1: Modell zur Abschätzung der potentiellen Strahlenexposition durch radioaktiv kontaminiertes Grundwasser.

Pröhl, G. und F. Gering.(2002). Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen der Planfeststellung. S. 4



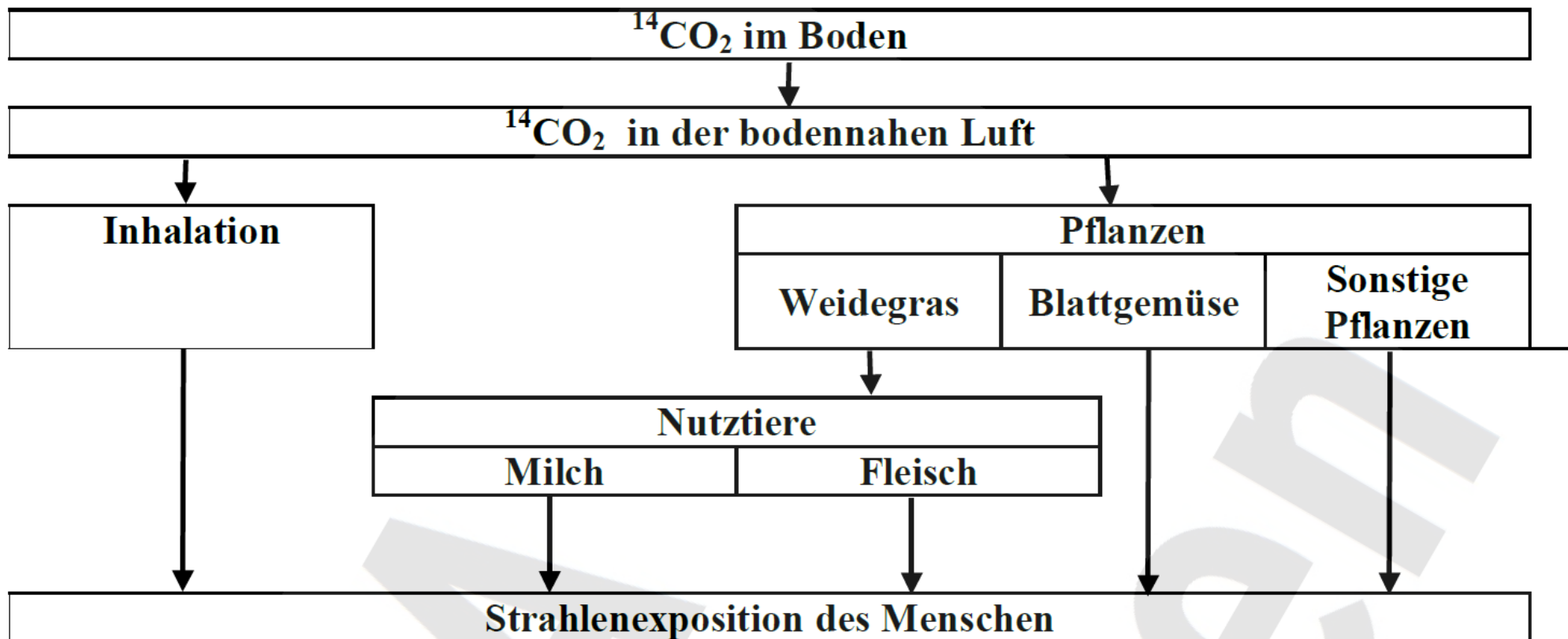


Abbildung 2: Modell zur Berechnung der Strahlenexposition durch aus dem Boden freigesetztes  $^{14}\text{CO}_2$

Pröhl, G. und F. Gering.(2002). Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen der Planfeststellung. S. 30





Die im Einzugsbereich eines Endlagers während der Nachbetriebsphase lebende Bevölkerung ist hinsichtlich ihrer Strahlenexposition ebenso schutzwürdig wie die heutige Bevölkerung, ihre Lebensumstände sind jedoch unbekannt. Ihre Strahlenexposition wird daher auf der Grundlage einer fiktiven Biosphäre berechnet, die hinsichtlich der Strahlenexposition abdeckend sein soll. Diese Biosphäre wird **Referenzbiosphäre** genannt.

A. Becker.(2003). Beitrag zur Erstellung einer Referenzbiosphäre zur Berechnung der in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Stoffe hervorgerufenen potentiellen Strahlenexposition unter Berücksichtigung des Einflusses des Klimas, BMU. S. 1



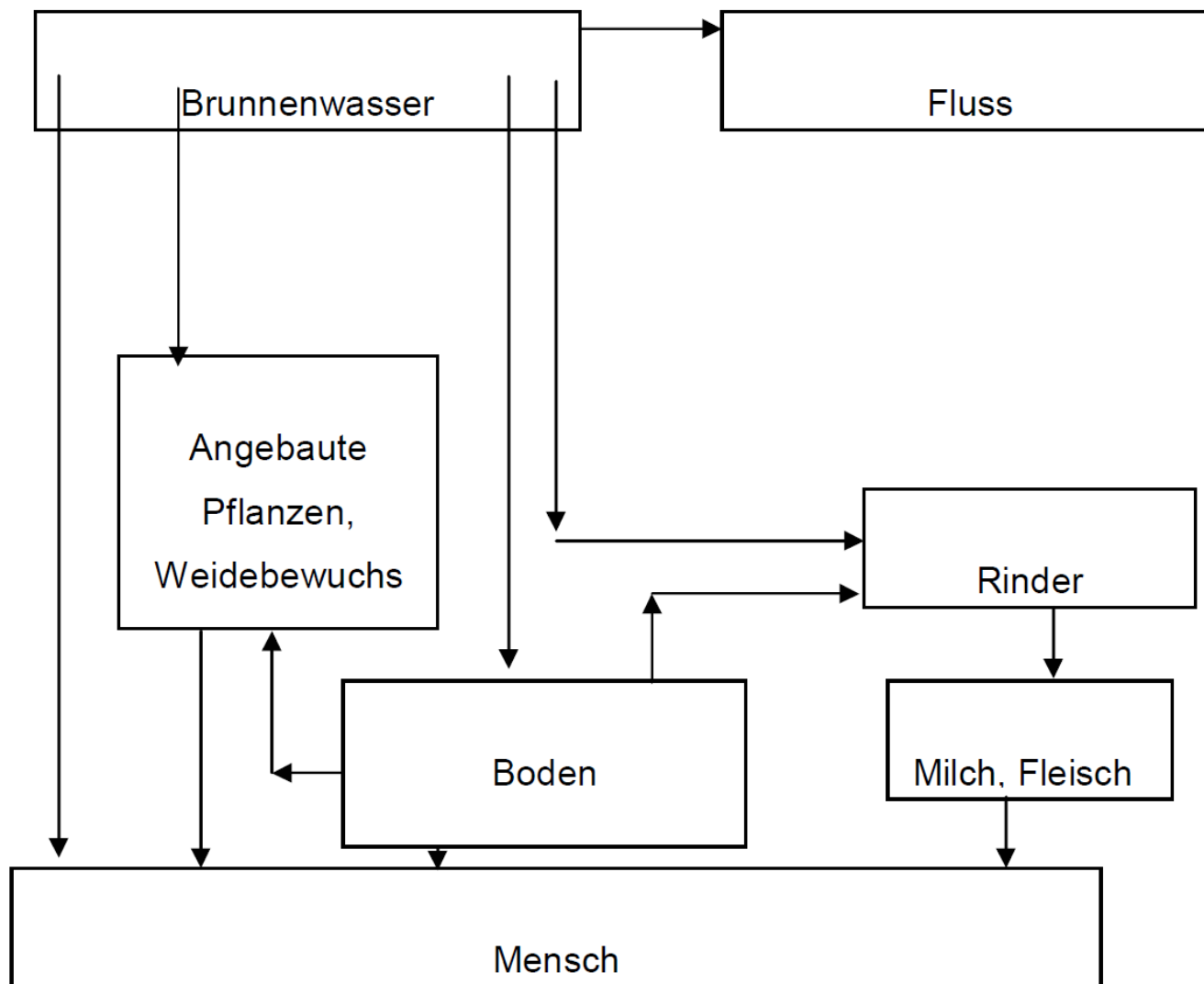




Die Ergebnisse zeigen, dass mehrere Szenarien zu einer Strahlenexposition in gleicher Größenordnung führen. Dabei ist das Szenario mit der maximalen Strahlenexposition radionuklidabhängig. Es wird als Referenzbiosphäre eine Biosphäre mit Mittelmeerklima vorgeschlagen, in der die Ernährung überwiegend auf pflanzlicher Basis beruht.

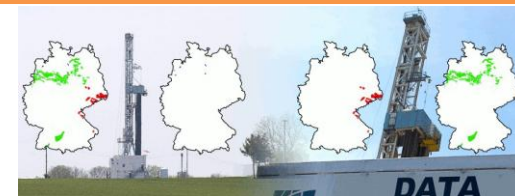
A. Becker.(2003). Beitrag zur Erstellung einer Referenzbiosphäre zur Berechnung der in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Stoffe hervorgerufenen potentiellen Strahlenexposition unter Berücksichtigung des Einflusses des Klimas, BMU. S. 198





## Modell Etesienklima

A. Becker.(2003). Beitrag zur Erstellung einer Referenzbiosphäre zur Berechnung der in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Stoffe hervorgerufenen potentiellen Strahlenexposition unter Berücksichtigung des Einflusses des Klimas, BMU. S. 64





## Probabilistischer Ansatz notwendig.

Pröhl, G., G. Olyslaegers, et al. (2005). "Development and comparison of five site-specific biosphere models for safety assessment of radioactive waste disposal." in: J. Radiol. Prot. 25: 343–373.





Weiterhin sind zu berücksichtigen:

## Intensive Kreislaufwirtschaft

### Ernährung mit Halophyten

Die Idee, salztolerante Gewächse anzubauen, ist nicht neu. Seit Jahren laufen weltweit viele Projekte, derartige Pflanzen zu züchten. Dabei könnte man auf die Pflanzen zurückgreifen, die sich bereits an einen unwirtlichen Lebensraum angepasst haben –die sogenannten Halophyten. Es bestehen viele Forschungsanstrengungen, herkömmliche Nutzpflanzen durch die Halophyten zu ersetzen.





Die nach AVV abgeschätzte effektive Dosisrate ist lediglich ein Indikator. Sowohl geologische und hydrogeologische Gegebenheiten als auch die Anthropos- und Biosphäre werden sich in einer Weise ändern, was selbst mit großen Fehlerbandbreiten auf wissenschaftlicher Ebene nicht prognostizierbar ist und sein wird. Der schwächste Punkt ist da eindeutig das menschliche Verhalten.





Es geht bei der Frage der Endlagerung auch um die Schaffung einer breiteren Vertrauensbasis in der Öffentlichkeit, um eine fundierte gesellschaftliche Entscheidung herbeiführen zu können. Um dieses zu erreichen, sollten bei einem konkreten Projekt alle verfügbaren Indikatormodelle angewendet werden. Nur durch einen „pluralistischen“ Ansatz ist die Beurteilung des komplexen Problems „Endlager in der Nachbetriebsphase“ - das sich mit den exakten Naturwissenschaften Physik und Chemie, mit der beschreibenden Wissenschaft Geologie und mit weiteren Wissenschaften wie der Soziologie nicht eindeutig abbilden lässt - in Approximation durchführbar. Ein „singularistischer“ Ansatz ist wenig hilfreich.





*.....Da wir es bei einem radioaktiven Endlager mit Unsicherheiten verschiedenen Typs über lange Zeitperioden zu tun haben (die wir einzuschätzen haben und die glaubwürdig zu kommunizieren sind), ist es ratsam, den Sicherheitsnachweis als «bewegliches Ziel» mit verschiedenen Ansätzen anzuvisieren....:*

Flüeler, T.(2002). Radioaktive Abfälle in der Schweiz - Muster der Entscheidungsfindung in komplexen soziotechnischen Systemen.  
S. 73





Aufgrund der erkenntnistheoretischen Rahmenbedingung ist die Aufzählung der Indikatormodelle nie als abschließend zu betrachten. Jedes weitere sinnvolle Indikatormodell kann neue Aspekte aufzeigen, die mit den bisherigen nicht vollständig abgedeckt werden konnten.

Konsequenterweise ist für ein Endlagerprojekt ein möglichst umfassender Satz von Eingangsdaten zu erarbeiten, sodass jeder beliebige Indikator abgeschätzt und auf Nachfrage auch weitere sinnvolle Indikatorvorstellungen numerisch bedient werden können. Ein Sicherheitsnachweis/-beweis im rein wissenschaftlichen Sinne ist unmöglich und ein Versuch hätte Ähnlichkeit mit den sog. Gottesbeweisen, die bei der Entwicklung der mathematischen Logik und der Erkenntnistheorie eine wesentliche Rolle spielten.





*....The system characteristics of radioactive waste lead to the fact that longterm safety of waste disposal intrinsically cannot be mathematically demonstrated. The hypothesis is investigated that a "convincing set of arguments" (NEA 1999b, [G182:11]) can only be given in an extensive stepwise process and consists of technical elements (barriers), scientific methods (e.g. uncertainty analyses) and comprehensive procedural aspects.....*

Flüeler, T.(2005). Decision Making for Complex Socio-Technical Systems - Robustness from Lessons Learned in Long-Term Radioactive Waste Governance.S. X



Im Zusammenhang mit Sondermülldeponien ist Ähnliches erarbeitet worden:

*...But apparently, this is not much different in the scientific community. It so happens that officials in the Netherlands laugh about the ridiculous idea of co-disposal, whereas their UK counterparts consider waste separation equally ridiculous.....The only solution to the problem of lack of stability and disagreements in science would seem to be openness about these issues. I have seen very clear and frank admittance of uncertainties in the Kaliwaal case and in the Canadian low-level radioactive waste process. Such admittance is somewhat tricky in the sense that the great discursive power of science is abandoned, in return for uncertainty. However, the increasing scientific literacy of the population in combination with the fact that science can really not pretend to be able to predict every consequence of a project for an extensive period of time (such prtetence is false), necessitate it....*

Huitema, D.(2002). Hazardous Decisions - Hazardous Waste Siting in the UK, The Netherlands and Canada - Institutions and Discourses, Springer. S. 466



Bei Nichtberücksichtigung dieser Gegebenheiten kann es im öffentlichen Verwaltungsverfahren leicht zu Verwerfungen kommen, die das gesamte Verfahren gefährden können. Entsprechende Erfahrungen sind bereits an vielen Stellen gemacht worden:

*...For one thing, we have learned - contrary to expert assertions - that people are not necessarily irrational in their assessments of risk. Citizens, we discover, do not ignore the technical facts, rather they tend to combine and process them with a different form of logic, especially in the face of risk and uncertainty. Confronted with uncertainties that science cannot answer, lay people turn to more normative forms of rationality - what can be called "socio-cultural rationality" (Plough/Krimsky 1987; Fischer 2000)....*

Fischer, F. (2006). Integrating Deliberation and Analysis in Radioactive Waste Policy - Lessons from Participatory Assessment in the USA and Canada, in: P. Hocke und A. Grunwald (Hrsg.), Wohin mit dem radioaktiven Abfall? - Perspektiven für eine sozialwissenschaftliche Endlagerforschung, edition sigma: S. 149.

und gut dokumentiert im Fall Deep River, Ontario, Kanada.

Huitema, D.(2002). Hazardous Decisions - Hazardous Waste Siting in the UK, The Netherlands and Canada - Institutions and Discourses, Springer. S. 357ff





# Indikatorenmodelle

1. **Effective dose rate [Sv/y]**
2. Collective dose rate [person-Sv/y]
3. Dose rate to animals and plants [Gy/y]
4. Individual risk [1/y]
5. Societal risk [1/y]
6. Radiotoxicity concentration in groundwater [Sv/ m<sup>3</sup>]
7. **Radiotoxicity concentration in biosphere water [Sv/ m<sup>3</sup>]**
8. Concentration in soil [Sv/kg]
9. Concentration in air [Sv/ m<sup>3</sup>]
10. Radiotoxicity release [Sv/y]
11. **Radiotoxicity flux from geosphere [Sv/y]**
12. **Time-integrated radiotoxicity flux from geosphere [Sv]**
13. **Radiotoxicity outside geosphere [Sv]**



- 14. Relative activity concentration in biosphere water [-]**
- 15. Relative activity flux from geosphere [-]**
16. (Relative) activity flux through compartment boundaries [Bq/y or 1/y]
17. Radionuclide distribution in the disposal system [-]
18. Compartment / barrier effectiveness [-]
- 19. Activity in compartments [Bq]**
- 20. Activity flux from compartments [Bq/y]**
- 21. Time-integrated activity flux from compartments [Bq]**
- 22. Activity outside compartments [Bq]**
- 23. Radiotoxicity in compartments [Sv]**
- 24. Radiotoxicity flux from compartments [Sv/y]**
- 25. Time-integrated radiotoxicity flux from compartments [Sv]**
- 26. Radiotoxicity outside compartments [Sv]**
- 27. Activity concentration in compartment water [Bq/ m<sup>3</sup>]**
- 28. Radiotoxicity concentration in compartment water [Sv/ m<sup>3</sup>]**



29. Transport time through compartments [y]
30. Proportion of not totally isolated waste [-]
31. Time-integrated flux from geosphere / initial inventory [-]
32. Concentration in biosphere water / waste package water [-]

Becker, D.-A., D. Buhmann, et al.(2003). Testing of safety and performance indicators (SPIN), European Commission.



Im Planfeststellungsverfahren Konrad wurde zum Vergleich von Chemo- und Radiotoxizität ein

## Toxizitätsindex [a]

verwendet.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).(1990). Plausibilitätsbetrachtung zur Chemotoxizität radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.





Ältere Literatur wurde im SPIN-Projekt offensichtlich nicht ausgewertet. So fehlen z. B. der

## 1. Geotoxic Hazard Index [GHI].

Smith, C. F., J. J. Cohen, et al. (1980). "A Hazard Index for Underground Toxic Material." in: **UCRL-52889**. S. 3-10

und weitere in SMITH 1980 aufgeführten Indizes:

2. Simple Indices (Volumen, Konzentration etc.)
3. Lethal Dose (LD)
4. Maximum Permissible Concentration (MPC)
5. Drinking Water Standard (DWS)
6. Maximum Permissible Intake (MPI)
7. Relative Hazard





8. Hazard Index (HI)
9. Modified Hazard Index
10. Number of Lethal Doses
11. Relative Toxicity Index (RTI)
12. Potential Hazard Index (PHI)
13. Smith`s Modified Hazard Index
14. Hazard Available Index (HA)
15. Environmental Radiation Dose Commitment (ERDC)
16. Cumulative Exposure Index (CUEX)
17. Radionuclide Importance Index (RII)
18. Radiological Environmental Concern Index (RECI)
19. Isolation Time ( $T_i$ )
20. Somatic Dose Index (ID)
21. Specific Risk Factor
22. Index of Hazard for Radioactive Waste (HIWM)
23. Risk-Perception Quantification Methodology



24. Environmental Quality Index (EQI)
25. Chemical Hazard Ranking System
26. Environmental Stress Importance Index
27. Biological Indices of Pollution (drei Varianten)
28. Index of Risk for Inhalation Hazard
29. ICRP Index of Harm
30. Index of Harm

Smith, C. F., J. J. Cohen, et al. (1980). "A Hazard Index for Underground Toxic Material." in: **UCRL-52889**. S. A3-A45





Beachtenswert ist weiterhin der

## Biosphere Toxic Index [BTI] [mSv/t SM]

Kirchner, G. (1985). Ein neuer Toxizitätsindex zur Ermittlung des Gefährdungspotentials endgelagerter radioaktiver Abfälle. Bremen, Germany.

Kirchner, G. (1990). "A New Hazard Index for the Determination of Risk Potentials of Disposed Radioactive Wastes." in: Journal of Environmental Radioactivity 11: 71-95.

Kirchner, G. (1995). Isolationszeiträume für die Endlagerung radioaktiver Abfälle., in: IPPNW (International Physicians for the Prevention of Nuclear War/Internationale Ärzte für die Verhinderung des Atomkriegs; Deutsche Sektion) (Hrsg.), Die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Leipzig, S. Hirzel: S. 85-97.

Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) (2000). Umweltgutachten 2000 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen - Schritte ins nächste Jahrtausend. Deutscher Bundestag Drucksache 14/3363. Randnummer

Mit Hilfe dieses Indikators wird z. B. hergeleitet, dass auf der Grundlage der Planung von 1987 für das Abfallinventar Schacht Konrad die notwendige Isolationszeit  $10^7$  a beträgt. Bei Verzicht auf Einlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen und Abfällen aus der MOX-Brennstoffherstellung reduziert sich diese auf  $3 \times 10^4$  a.



## Der Indikator BTI wird in

Flüeler, T.(2005). Decision Making for Complex Socio-Technical Systems - Robustness from Lessons Learned in Long-Term Radioactive Waste Governance. S. 59

in folgender Weise aufgegriffen:

*...."Toxicity" approach: Independent of a disposition design and a geological location, Kirchner 1985passim proposes a toxicity index by the necessary isolation periods and retention factors may be calculated solely from waste properties.....*



In

*Chapman, N. und C. McCombie.(2003). Principles and Standards for the Disposal of Long-lived Radioactive Wastes, Elsevier. S. 113*

sind drei Toxizitätsindizes angeführt, die auf

*Liljenzin, J.-O. und J. Rydberg.(1996). Risks from Nuclear Waste, Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI).*

zurückgehen:

1. Hazard Index-ALI
2. Hazard Index-MPBBs
3. Hazard Index-MPCw



Speziell zum Vergleich von Radio- und Chemotoxizität werden in

*Pieper, Resele, et al.(2002). Vergleich Untertagedeponie - Endlager; Vergleichende Untersuchungen zu Gefährdungspotential, Deponiesicherheit und regulatorischen Anforderungen bei der Endlagerung radioaktiver und chemotoxischer Abfälle. S. 24*

und in

*Colenco, Zerna; Köpper Partner Ingeniergesellschaft für Bautechnik mbh, et al.(2001). Vergleich UTD / Endlager: Zwischenbericht betreffend Teilprojekt 2: Maßstäbe Gefährdungspotential.*

folgende 6 Indikatoren hergeleitet:

1. Toxizitätsindikator-tb-ub [a]
2. Toxizitätsindikator-tb-LD [1]



3. Toxizitätsindikator-GW-Tw [ $\text{m}^3$  Wasser]
4. Toxizitätsindikator-GW-Luft [ $\text{m}^3$  Luft]
5. Toxizitätsindikator-aH [ $\text{m}^3$  Boden]
6. Toxizitätsindikator-nH [ $\text{m}^3$  Erdkruste]

Mit diesen Indikatoren soll eine quantitative Aussage darüber gemacht werden können, welche theoretisch mögliche toxikologische und ggf. ökologische Auswirkung von einem Abfall ausgehen kann. Diese Größen werden nur durch die Schadstoffgehalte im Abfall quantifiziert. Damit erlauben sie einen standortunabhängigen Vergleich verschiedener Abfälle.



Im Anhang des Teilprojektberichts 2 zu dieser Studie wird der BTI erwähnt, aber bei der Auswertung mit folgender Argumentation nicht weiter benutzt:

*....[Kirchner 1985] führt einen TI zur Ermittlung des Gefährdungspotentials endgelagerter radioaktiver Abfälle ein, der Transportfaktoren (und verschiedene Pfade berücksichtigt). Kirchner weist jedoch darauf hin, dass die Töchter der betrachteten Radionuklide für eine sinnvolle Berechnung berücksichtigt werden müssen (siehe auch [Smith et al.]. Auf eine eingehende Diskussion dieses umfassenden Ansatzes wird hier verzichtet, da Kirchners TI Aspekte beinhaltet, die für die TI im Rahmen dieses Projektes ausdrücklich ausgeschlossen wurden.....*

Colenco, Zerna; Köpper Partner Ingeniergesellschaft für Bautechnik mbh, et al.(2001). Vergleich UTD / Endlager: Zwischenbericht betreffend Teilprojekt 2: Maßstäbe Gefährdungspotential. S. 110





Auf ähnlicher Basis wie das SPIN-Projekt kommen

*Kemakta Konsult AB, JA Streamflow AB, et al.(2004). Sicherheitsindikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle.*

zu einer Liste von Indikatoren. Eine Zusammenfassung ist in

*Bundesamt für Strahlenschutz (BfS).(2005). Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wirtsgesteine im Vergleich - Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz. S. 51*

zu finden:

1. Individuelles Risiko
2. Individualdosis
3. Kollektivdosis



4. Dosisleistung von Fauna/Flora
5. Durchfluss der freigesetzten Toxizität
6. Toxizitätsfreisetzungsraten
7. Radionuklidfreisetzungsraten
8. Radionukliddurchfluss
9. Schadstoffkonzentration
10. Isolationsfaktor
11. Isolationszeit
12. Freisetzungsdauer
13. Radionuklidtransportzeit
14. Verdünnung
15. Toxizität
16. Quellterm (Gesamtaktivität)



Schwerpunkt der Studie ist die Bewertung der Indikatoren nach unterschiedlichen Kriterien wie

- Zeitbereich der Anwendung,
- räumliche Anwendbarkeit,
- Eignung zum Nachweis der Schutzziele,
- **Unsicherheiten**,
- Relevanz für verschiedene geologische Barrieren und geologische Medien,
- Relevanz für verschiedene Abfallarten,
- Anwendbarkeit auf spezielle Fälle,
- **Eignung** für verschiedene Zwecke wie Planung, Standortwahl, Optimierung, **Vergleiche**,
- **Vermittelbarkeit und Verständlichkeit für die Öffentlichkeit**





# Und was steht in den Sicherheitsanforderungen?

BMU.(2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010.

*6.2 Für die Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert<sup>1</sup> im Jahr auftreten kann. Dabei sind Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.*



**7.2.2 Radiologische Langzeitaussage:**.....Eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage ohne Modellierung einer Ausbreitung von Stoffen im Deck- und Nebengebirge ist zulässig, falls die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe für die Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen führen. Hierdurch wird sichergestellt, dass nur sehr geringe Gesamtmengen an radioaktiven Schadstoffen freigesetzt werden können. Diese Personen-Millisievert sind anhand eines für Betrachtungen zur Langzeitsicherheit anerkannten generischen Expositionsmodells zu ermitteln, für das anzunehmen ist, dass



- *die betrachtete Referenzgruppe 10 Personen umfasst, die während ihrer Lebenszeit den gesamten für die Ernährung (Trinken, Tränken, Beregnen) notwendigen jährlichen Wasserbedarf aus einem Brunnen deckt und*
- *dieses Brunnenwasser sämtliche aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in dem jeweiligen Jahr ausgetretenen Radionuklide enthält. Dabei ist die Verdünnung des Brunnenwassers auf einen Mineralgehalt zu berücksichtigen, der die Nutzung des Brunnenwassers als Trinkwasser zuließe.*





# Das reicht nicht aus!

## PS: Gesundheits- und Umweltrisiken außer Krebsrisiken?

Beyea, J. (2012). "Special issue on the risks of exposure to low-level radiation." in: Bulletin of the Atomic Scientists **68**(3): 10-12.

