Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Einsatz partikelfiltrierender Halbmasken im Notfallschutz

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 300. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 27./28. Juni 2019

INHALT

Vorwort **3**
1 Hintergrund **3**
2 Beratungsauftrag **4**
3 Empfehlungen **5**
4 Wissenschaftliche Begründung **7**
4.1 Eigenschaften und Wirksamkeiten von partikelfiltrierenden Halbmasken .. 7
4.2 Exposition durch Inhalation in verschiedenen Unfallszenarien 9
4.3 Wirksamkeit der Iodblockade der Schilddrüse 17
4.4 Schutz der Schilddrüse durch die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ .18
4.5 Schutz durch Atemschutzmasken im radiologischen Notfall.....19
4.5.1 Allgemeines 19
4.5.2 Allgemeine Bevölkerung – Kinder.....19
4.5.3 Allgemeine Bevölkerung – Erwachsene 19
4.5.4 Einsatz- und Hilfskräfte.....20
4.5.5 Beantwortung der Fragen des Beratungsauftrags 20
5 Literatur **23**
6 Glossar **27**

Vorwort

Frühe Maßnahmen des Notfallschutzes, d. h. Evakuierung, Aufenthalt in Gebäuden und Iodblockade, werden ergriffen, um bei einem radiologischen Notfall, insbesondere bei einem schweren Kernkraftwerksunfall, deterministische Schäden zu vermeiden und die Wahrscheinlichkeit stochastischer Schäden zu reduzieren. Die vorliegende Empfehlung befasst sich mit der Frage, ob und unter welchen Umständen das Instrumentarium der frühen Schutzmaßnahmen um die Anwendung von handelsüblichen partikelfiltrierenden Halbmasken erweitert werden sollte.

Die Strahlenschutzkommission (SSK) beantwortet mit dieser Empfehlung einen Teil der Fragen, die 2018 im Rahmen eines Beratungsauftrages des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) zu speziellen Aspekten des Notfallschutzes gestellt wurden.

An ihrer Erarbeitung haben als Mitglieder einer Arbeitsgruppe des Ausschusses „Notfallschutz“ mitgewirkt:

- Herr Dipl.-Ing. Steffen Birkefeld, PreussenElektra GmbH, Hannover
- Herr Dr. Florentin Lange, Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Köln (i. R.)
- Herr Prof. Dr. Rolf Michel, Universität Hannover (i.R.)
- Herr Hans Springer, Ministerium für Inneres, Digitalisierung und Migration, Baden-Württemberg
- Herr Dipl.-Chem. Christoph Thelen, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin
- Frau Dipl.-Ing. Natalie Zander, Bundesamt für Strahlenschutz, Neuherberg

Prof. Dr. Rolf Michel	*Dipl.-Phys. Jürgen Kopp*	*Prof. Dr. Joachim Breckow*
Vorsitzender der Arbeitsgruppe „Radiologischer Notfallschutz“	Vorsitzender des Ausschusses "Notfallschutz"	Vorsitzender der Strahlenschutzkommission

1 Hintergrund

Frühe Maßnahmen des Notfallschutzes, d. h. Evakuierung, Aufenthalt in Gebäuden und Iodblockade, werden ergriffen, um bei einem radiologischen Notfall, hier einem schwerem Kernkraftwerksunfall, deterministische Schäden zu vermeiden und die Wahrscheinlichkeit stochastischer Schäden zu reduzieren. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat deshalb in der Notfall-Dosiswerte-Verordnung in Übereinstimmung mit der Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK) zu den Radiologischen Grundlagen (SSK 2014) Dosiswerte für frühe Schutzmaßahmen festgelegt (NDWV 2018). Von besonderer Bedeutung ist bei den frühen Schutzmaßnahmen die Vermeidung hoher Schilddrüsendosen bei Kindern, Jugendlichen und Schwangeren als Folge der Inhalation radioaktiver Iodisotope. Die Erfahrungen des Unfalls von Tschernobyl haben gezeigt, dass hohe Schilddrüsendosen in der Folge besonders bei Personen, die zum Zeitpunkt des Unfalls Kleinkinder und Kinder waren, zu einem Anstieg von Schilddrüsenkrebs führen, z. B. UNSCEAR (2000, 2018). Die Iodblockade der Schilddrüse durch Einnahme von Tabletten mit stabilem Kaliumiodid stellt eine wirksame Methode zur Vermeidung hoher Schilddrüsendosen durch Inhalation von radioaktiven Iodisotopen dar (SSK 2011).

Die vorliegende Empfehlung befasst sich damit, ob und unter welchen Umständen das Instrumentarium der frühen Schutzmaßnahmen um die Anwendung von handelsüblichen partikelfiltrierenden Halbmasken (im Folgenden Atemschutzmasken genannt) erweitert werden sollte. Partikelfiltrierende Atemschutzmasken schützen in drei unterschiedlichen FFP-Klassen vor wässrigen und öligen Aerosolen, Feinstaub sowie Rauch. Diese partikelfiltrierenden Halbmasken sind gemäß der DIN EN 149 (2009) genormt und werden in FFP 1, FFP 2 und FFP 3 unterteilt.

Das Kürzel FFP steht dabei für „Filtering Face Piece“. Die Klassifizierung ergibt sich neben der Filterleistung der Maske auch anhand der maximal zulässigen Leckage. Diese ergibt sich aus der Durchlässigkeit des Filtermaterials und Öffnungen an Stellen, an denen die Maske nicht genau auf dem Gesicht aufsitzt.

In dieser Empfehlung steht die Frage nach der Wirksamkeit solcher Masken zu Reduzierung der Schilddrüsendosis im Vergleich zur Wirksamkeit der Iodblockade im Vordergrund. Die Frage nach der Wirksamkeit von Atemschutzmasken bei sonstigen radiologischen Notfällen wird am Rande mitbetrachtet, da Kernkraftwerksunfälle infolge der betrachteten Szenarien und Nuklidvektoren die Thematik der partikelfiltrierenden Halbmasken auch für andere radiologischen Notfälle abdecken.

2 Beratungsauftrag

Am 23. Januar 2018 beauftragte das BMU die SSK die Zweckmäßigkeit einer möglichen Bevorratung von handelsüblichen partikelfiltrierenden Halbmasken (Atemschutzmasken) zur Reduzierung der in einem radiologischen Notfall anfallenden Dosisbelastung durch Inhalation von luftgetragener Kontamination zum Schutz der Bevölkerung in radiologischen Notfällen einschließlich der Empfehlung zu deren Nutzung zu bewerten. Dabei sollten insbesondere folgende Einzelaspekte betrachtet werden:

a. Wie sind die Filterwirkung verschiedener infrage kommender Atemschutzmaskentypen (z. B. FFP1-3) bzw. die zu erwartende Verringerung der inhalationsbedingten effektiven Dosis und Schilddrüsendosis bei Tragen einer solchen Atemschutzmaske auch in möglicher Abhängigkeit vom vorliegenden Nuklidvektor und dessen chemischer Form zu beurteilen?

b. Für welche Bevölkerungs- und Altersgruppen ist das Tragen der infrage kommenden Atemschutzmasken grundsätzlich zumutbar oder nicht zumutbar und welche maximalen Tragedauern sind anzunehmen?

c. Wie ist die Wirksamkeit von Atemschutzmasken in Verbindung mit den üblichen Schutzmaßnahmen in der Frühphase radiologischer Notfälle wie z. B. dem „Aufenthalt in Gebäuden“ zu bewerten? Welche Kombinationen mit anderen Schutzmaßnahmen erscheinen sinnvoll?

d. Für den Fall, dass Sie sich generell für eine entsprechende Nutzung von Atemschutzmasken aussprechen sollten, an welche radiologischen oder nicht radiologischen Kriterien sollte eine mögliche Maßnahme „Empfehlung zum Tragen von Atemschutzmasken“ geknüpft werden und welche möglichen Planungsgebiete ergeben sich für diese Maßnahme?

e. Wie viele Atemschutzmasken sollten pro zu versorgendem Bundesbürger und pro Einsatzkraft eingeplant werden?

3 Empfehlungen

Die nachstehenden Empfehlungen beziehen sich auf die Eignung von Atemschutzmasken zum Einsatz bei radiologischen Notfällen im Allgemeinen und insbesondere als Schutzmittel zur Reduzierung der Schilddrüsendosis als Folge der Inhalation von radioaktiven Iodisotopen nach Freisetzungen bei Kernkraftwerksunfällen. Die Strahlenexposition der Schilddrüse durch die Inhalation von radioaktiven Iodisotopen ist bei Kernkraftwerksunfällen eine der kritischsten Aspekte im Hinblick auf Spätschäden.

Empfehlung 1: Bei radiologischen Notfällen kann die Inhalation von partikelgetragenen Radionukliden durch FFP 3-Atemschutzmasken effizient reduziert werden (Schutzfaktor 30). FFP 3-Atemschutzmasken können daher sinnvoll sein, wenn eine Exposition durch partikelgetragene Radioaktivität anzunehmen ist. Da eine arbeitsmedizinische Pflicht-Vorsorgeuntersuchung für den Einsatz von FFP3-Atemschutzmasken nicht mehr erforderlich ist, ist FFP3-Atemschutzmasken der Vorzug vor FFP 1- und FFP 2-Atemschutzmasken zu geben, da letztere deutlich geringe Schutzfaktoren (FFP 1: 4; FFP 2: 10) aufweisen. Keine der FFP-Atemschutzmasken bietet jedoch relevanten Schutz gegen gasförmige Radionuklide, insbesondere gegen gasförmiges oder organisch gebundenes radioaktives Iod. Die SSK empfiehlt daher einen differenzierten Einsatz von FFP 3-Atemschutzmasken gemäß den Empfehlungen 2 bis 5.

Empfehlung 2: Von besonderer Bedeutung im Notfallschutz bei Kernkraftwerksunfällen ist die Inhalation von radioaktiven Iodisotopen wegen der damit verbundenen Strahlenexposition der Schilddrüse. Nach derzeitigem Wissensstand ist davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der freigesetzten Iodisotope in der Umwelt bei den betrachteten Kernkraftwerksunfällen gasförmig als I_2 oder als organisch gebundenes Iod vorliegen wird.

Da die Iodblockade die Schilddrüse sowohl gegen partikelgebundene als auch gegen gasförmige und organisch gebundene radioaktive Iodisotope schützt, empfiehlt die SSK ihr in einem Kernkraftwerksunfall eindeutig der Vorzug vor FFP 3-Atemschutzmasken zu geben, da letztere nur einen auf Partikel begrenzten Schutz bieten. In Bezug auf den Schutz der Schilddrüse

kann der Einsatz von FFP 3-Atemschutzmasken in diesem Fall sogar ein falsches Gefühl der Sicherheit vermitteln.

Empfehlung 3: Für **Kleinkinder und Kinder** gibt es derzeit in Europa keine qualifizierten FFP 3-Atemschutzmasken. Im Handel frei erhältliche Atemschutzmasken können in ihrer Schutzwirkung nicht verlässlich eingeschätzt werden. Außerdem kann nicht damit gerechnet werden, dass Kinder solche Atemschutzmasken über längere Zeit anforderungsgemäß tragen. Bei Kleinkindern erscheint dies sogar unmöglich und eine mögliche Gefährdung durch Einschränkung der Atmung ist nicht auszuschließen (siehe Abschnitt 4.5.2). Insbesondere hier ist den Schutzmaßnahmen „Iodblockade“ und/oder „Aufenthalt in Gebäuden“ eindeutig der Vorzug zu geben und vom Einsatz von FFP 3-Atemschutzmasken aufgrund der möglichen Gesundheitsgefährdung für Kleinkinder und Kinder abzuraten.

Empfehlung 4: Für **Jugendliche und Erwachsene** der allgemeinen Bevölkerung ist der zusätzliche Einsatz von FFP 3-Atemschutzmasken bei bestehenden Schutzmaßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“ und „Iodblockade“ nicht zu empfehlen, da die zusätzliche Schutzwirkung vernachlässigbar ist.

Für den Fall, dass sich erwachsene Mitglieder der allgemeinen Bevölkerung FFP 3-Atemschutzmasken dennoch selbst besorgen, wird auf den begrenzten Schutz der Schilddrüse durch FFP 3-Atemschutzmasken hingewiesen. Außerdem haben Atemschutzmasken nur eine begrenzte Lagerdauer und müssen in regelmäßigen Zeitabständen erneuert werden.

Empfehlung 5: Für **Einsatz- und Hilfskräfte**, die in der Benutzung von FFP 3-Atemschutzmasken unterwiesen oder geschult sind, sind FFP 3-Atemschutzmasken sinnvoll anwendbar, wenn mit partikelgetragener Radioaktivität zu rechnen ist. Dies gilt z. B. während des Durchzugs einer radioaktiven Wolke und bei stark staubenden Reinigungs- oder Sanierungsmaßnahmen. Die Inhalation von resuspendierten Partikeln ist bei Kontamination mit beta- und gammastrahlenden Radionukliden unter normalen Umweltbedingungen kein relevanter Expositionspfad. FFP3- Atemschutzmasken ersetzen allerdings bei Kernkraftwerksunfällen auch für Einsatz- und Hilfskräfte nicht die u. U. erforderliche Schutzmaßnahme „Iodblockade“.

4 Wissenschaftliche Begründung

4.1 Eigenschaften und Wirksamkeiten von partikelfiltrierenden Halbmasken

Im Rahmen der Beratungen des Ausschusses „Notfallschutz“ wurde die Verwendung von handelsüblichen partikelfiltrierenden Halbmasken (im Folgenden Atemschutzmasken genannt) zur Reduzierung der in einem radiologischen Notfall anfallenden Dosisbelastung durch Inhalation von luftgetragener Kontamination diskutiert.

Atemschutzmasken können die inhalative Exposition durch Gase und Partikel vermindern. Atemschutzmasken sind neben Kombinationsmasken mit aufschraubbarem Filter sowie Pressluftatmern und Sauerstoffselbstrettern im Arbeitsschutz eingeführte und vielfach verwendete Schutzmittel. Hier werden gemäß dem Beratungsauftrag ausschließlich partikelfiltrierende Halbmasken (im Folgenden Atemschutzmasken genannt) betrachtet.

Bei diesen Atemschutzmasken ist die gesamte Atemschutzmaske das Filtermedium. Die eingeatmete Luft kann über die gesamte Oberfläche der Atemschutzmaske auf die Atemseite strömen. Dabei passiert sie filtrierende Schichten, typischerweise aus einem elektrostatisch aufgeladenen Polymer, die Partikel zurückhalten. Ursache für die Abscheidung am Filtermaterial sind Trägheit, Diffusion, Sperreffekt (Interzeption) und eben Elektrostatik. Welcher Effekt die Hauptwirkung darstellt, hängt von der Partikelgröße ab.

Am Markt verfügbar sind zwei Varianten. Es gibt Modelle ohne und Modelle mit Ausatemventil. Hinsichtlich der Schutzwirkung ergibt sich für die Atemschutz tragende Person kein Unterschied. Eine Minderung der körperlichen Belastung für den Träger erfolgt bei Modellen mit Ausatemventil durch den geringeren Ausatemwiderstand und eine verminderte Luftfeuchte im Atembereich.

Die europäische Verordnung 2016/425 (EU 2016) regelt die Bedingungen für die Bereitstellung von partikelfiltrierenden Halbmasken als Persönliche Schutzausrüstung (PSA) auf dem europäischen Markt. Spezifiziert werden die Anforderungen in der harmonisierten europäischen Norm EN 149 (auch DIN EN 149:2009). Die Bestätigung, dass die Anforderungen erfüllt werden, erfolgt durch eine Benannte Stelle (Notified Body) und wird in einer Baumusterprüfbescheinigung dokumentiert (Zertifizierung).

Atemschutzmasken werden nach DIN EN 149:2009 in drei Schutzklassen unterteilt: FFP 1, FFP 2 und FFP 3 (FFP: Filtering Face Piece). Die Anforderung an die Leckage sind nach DIN EN 149:2009, Abschnitt 7.9.1 als „gesamte nach innen gerichtete Leckage“ formuliert. Die Prüfung erfolgt in einer partikulären NaCl-Atmosphäre als % Massenanteil. Die Anforderungen an die Leckage sind 25 % für FFP1, 11 % für FFP2 und 5 % für FFP3. Die Anforderungen an den Durchlass für das Material nach DIN EN 149:2009, Abschnitt 7.9.2 lauten für FFP1 20 %, für FFP2 6 % und für FFP3 1 %. Die maximale Atemwiderstände sind in DIN EN 149:2009, Abschnitt 7.16 festgelegt: bei Einatmung von 95 L/min für FFP1 2,1 mbar, für FFP2 2,4 mbar und für FFP3 3,0 mbar.

Für den Bereich der Unfallversicherungen hat die Deutsche gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) die „*Auswahl und die Benutzung von Atemschutzgeräten für Arbeit und Rettung sowie für Fluchtzwecke*“ beschrieben (DGUV 2011). Dort werden den Atemschutzmasken FFP1 ein Schutzfaktor von 4, FFP 2 ein Schutzfaktor von 10 und FFP 3 ein Schutzfaktor von 30 zugewiesen (Tabelle 1).

Auch für die Einsatzbedingungen von Atemschutzmasken im beruflichen Umfeld gibt es einschlägige Regeln (DGUV 2011). Danach muss das gewünschte Schutzniveau (FFP1/2/3) von fachkompetenten Personen bestimmt werden und vor dem Einsatz muss eine Schulung erfolgen. In der Regel DGUV-R 112-190 (DGUV 2011) findet sich der Hinweis:

„3.2.4.1 Allgemeines Der Unternehmer hat nach § 3 Abs. 1 „PSA-Benutzungsverordnung“ (PSA-BV) in Verbindung mit § 31 Unfallverhütungsvorschrift „Grundsätze der Prävention“ (BGV/G UV-V A1) dafür zu sorgen, dass die Versicherten anhand der Betriebsanweisung vor der ersten Benutzung (Erstunterweisung) und danach wiederholt nach Bedarf (Wiederholungsunterweisung), mindestens jedoch einmal jährlich, in einer theoretischen Unterweisung und praktischen Übungen unterwiesen werden.“

Ebenso in der PSA-Verordnung (EU 2016) der Hinweis zu Atemschutzgeräten: „*3.10.1. Atemschutz (…) Auf den PSA müssen die besonderen Eigenschaften der Ausrüstung, die zusammen mit der Anleitung einen geschulten und qualifizierten Nutzer zum korrekten Einsatz der PSA befähigen, ausführlich angegeben sein. (..)“*

Es wird darauf abgestellt, dass ein Nutzer von Atemschutz unterwiesen, geschult und qualifiziert sein muss. Ist dies nicht der Fall, kann es zu Fehlanwendung führen, die typischerweise mit einer Senkung des Schutzniveaus einhergeht.

Bei der Benutzung sind zwei Handlungen von besonderer Bedeutung: das richtige Anlegen des Atemschutzes, aber auch in besonderem Maße das Ablegen. Eine außen mit Partikeln kontaminierte Atemschutzmaske bietet bei falscher Handhabung die Option, diese Partikel über Hände und Kleidung in Bereiche zu verschleppen, die sonst vielleicht gefahrstofffrei sein könnten. Dies gilt noch einmal mehr für Schutzkleidung oder die Kombination von Schutzkleidung und Atemschutz. Dieses Ablegen sollte geübt und an einem geeigneten Ort stattfinden.

Die europäische Norm DIN EN 149:2009 wurde erarbeitet und wird betreut vom CEN TC 79. Die Norm führt aus: „*Diese Europäische Norm legt Mindestanforderungen für filtrierende Halbmasken als Atemschutzgeräte zum Schutz gegen Partikeln, außer für Fluchtzwecke, fest.*“ Der Arbeitsauftrag des CEN TC 79 lautet „*To prepare European Standards for respiratory protective devices for use in the work place and for firefighting and for rescue purposes, where there exists a risk to health from inhaling dusts, fumes, gases, vapours or from oxygen deficiency, as well as European Standards for underwater breathing apparatus*.“ Das entsprechende deutsche Gremium ist der DIN NA 027-02-04 AA (Atemgeräte für Arbeit und Rettung). *„Der Arbeitsausschuss NA 027-02-04 AA Atemgeräte für Arbeit und Rettung entwickelt mit seinen Arbeitskreisen Normen (…).“*

Diese Arbeitsaufträge haben zur Folge, dass alle in Europa auf Basis von harmonisierten Normen zugelassenen Atemschutzgeräte für Menschen im arbeitsfähigen Alter konzipiert sind und von Menschen in diesem Alter in Zulassungsprüfungen getestet werden. Atemschutzgeräte für Kinder sind auf der Basis von harmonisierten Normen in Europa nicht verfügbar.

Durch den weltweiten Handel können auch in Deutschland Produkte, die als Atemschutz ausgelobt aber nach PSA-Benutzungsverordnung (PSA-BV 1996) nicht zulassungsfähig sind, erstanden werden. Dies bedeutet aber nicht, dass ihr Einsatz zulässig oder ungefährlich ist. Neben der zweifelhaften Schutzwirkung sei hier auf die Grenzwerte für Kohlendioxid im Atembereich und den Atemwiderstand hingewiesen. Die physiologischen und medizinischen Bedingungen eines (Klein-)kindes sind bei einer solchen Nutzung zu beachten. Zurzeit sind diese in Europa jedoch nicht Gegenstand einer Prüfung oder Zertifizierung

In Deutschland ist die Produktion von partikelfiltrierenden Halbmasken auf weniger als fünf Betriebe beschränkt. Aus den Erfahrungen bei (mutmaßlichen) Ereignissen zeigt sich, dass es für Produzenten oft nicht sinnvoll ist eine kurzfristige Kapazitätserweiterung durch Aufbau zusätzlicher Produktionslinien zu erreichen. Das Zeitfenster ist zu klein und die Investitionskosten zu hoch, der Aufbau eines qualifizierten Mitarbeiterkollektivs nicht möglich. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass über die normale Produktion hinaus sehr hohe Stückzahlen kurzfristig verfügbar gemacht werden können.

Tab. 1: Nominelle Schutzfaktoren/zugeteilte Schutzfaktoren im europäischen Regelwerk: Auszug aus DGUV-Regel 112-190 „Benutzung von Atemschutzgeräten“ (DGUV 2011)

Geräteart	Schutzfaktor
Halb-/ Viertelmaske mit P1-Filter, partikelfiltrierende Halbmaske FFP 1	4
Halb-/Viertelmaske mit P2-Filter, partikelfiltrierende Halbmaske FFP 2	10
Halb-/ Viertelmaske mit P3-Filter, partikelfiltrierende Halbmaske FFP 3	30

Eine arbeitsmedizinische Pflicht-Vorsorgeuntersuchung für den Einsatz von FFP3-Atemschutzmasken ist nicht mehr erforderlich, Daher ist FFP3-Atemschutzmasken der Vorzug vor FFP 1- und FFP 2-Atemschutzmasken zu geben, da letztere deutlich geringere Schutzfaktoren aufweisen.

4.2 Exposition durch Inhalation in verschiedenen Unfallszenarien

Die Inkorporation durch Inhalation nach Freisetzungen von radioaktivem Iod ist von besonderer Bedeutung für die Strahlenexposition der Schilddrüse. Insbesondere bei Kernkraftwerksunfällen ist mit einer hohen Aktivität von Iodisotopen zu rechnen. Für die Schilddrüsendosis sind es vor allem die Iodisotope I-131 ($T_{1/2}$ = 8,02 d) und I-132, das zwar nur eine relativ kurze Halbwertszeit von 2,6 h hat, aber durch den längerlebigen Vorläufer Te-132 ($T_{1/2}$ = 76,3 h) nachgebildet wird. Während für Te-132 partikelgebundener atmosphärischer Transport angenommen werden kann, sind bei den Iodisotopen neben partikelgebundenem Iod auch elementares I_2 und organisch gebundenes Iod (RI, meist Methyliodid) in Gasform zu berücksichtigen.

Die Inhalation von anderen Radionukliden spielt im Allgemeinen bei Reaktorunfällen nur eine untergeordnete Rolle für die effektive Dosis der Exponierten im ersten Jahr. Für diese effektive Dosis ist die externe Strahlung der am Boden abgelagerten Radionuklide dominierend.

Bei den hier betrachteten Kernschmelzunfällen wird nach den Modellrechnungen Iod überwiegend in der Form von partikelförmigem CsI aus dem Brennstoff freigesetzt, nur in geringem Maße entsteht I_2. Die chemische Zusammensetzung des in die Umwelt freigesetzten Iods wird durch Wechselwirkung der aus dem Brennstoff freigesetzten Iod-Spezies mit der Atmosphäre im Sicherheitsbehälter, mit den vorhandenen Wasservorlagen und den Oberflächen des Sicherheitsbehälters bestimmt. Auch die Dauer dieser Wechselwirkung spielt eine Rolle.

Auch während des atmosphärischen Transports verändert sich die Speziation der Iodisotope. Durch photochemische Oxidation werden I_2 und RI in I^-, IO, HOI und IO_3^- umgewandelt, die ihrerseits an Partikel angelagert werden können.

Während die Schutzwirkung der Schilddrüsenblockade durch Einnahme von stabilem Iod unabhängig von der Speziation ist, gilt dies nicht für Atemschutzmasken, die lediglich das partikelgebundene Iod zurückhalten.

Um die Wirksamkeit von Atemschutzmasken mit der Schutzwirkung der Iodblockade zu vergleichen, müssen verschiede Szenarien betrachtet werden. Die SSK hat sich deshalb mit folgenden für den Vergleich relevanten Fragen befasst:

1. Wie lange dauert ein Venting? Der Hintergrund zu dieser Frage ist der Kontext zwischen Atemschutzmasken und eventuell erforderlicher wiederholter Einnahme von Iodtabletten.
2. Welcher Nuklidvektor wird beim gefilterten und ungefilterten Venting angenommen?
3. Wie sieht der Nuklidvektor bei Containment-Versagen aus?
4. Welche Iod-Spezies liegen bei der Freisetzung vor?
5. Welche Iod-Spezies wurden in der Umwelt nach Kernkraftwerksunfällen beobachtet?

Zu 1. Wie lange dauert ein Venting?

Die Druckentwicklung eines repräsentativen deutschen Druckwasserreaktors (DWR) der 1300-MW-Klasse mit einem Venturi-Nassfilter ist im nachfolgenden Diagramm abgebildet (Abbildung 1). Durch die fehlende Abfuhr der Nachzerfallsleistung aus dem Containment baut sich in diesem stetig ein Druck auf, welcher 2 bis 4 Tage (je nach Szenario) nach dem Eintritt des Kernschadens den Auslegungsdruck des Reaktorsicherheitsbehälters (RSB) (6,3 bar-abs) überschreitet.

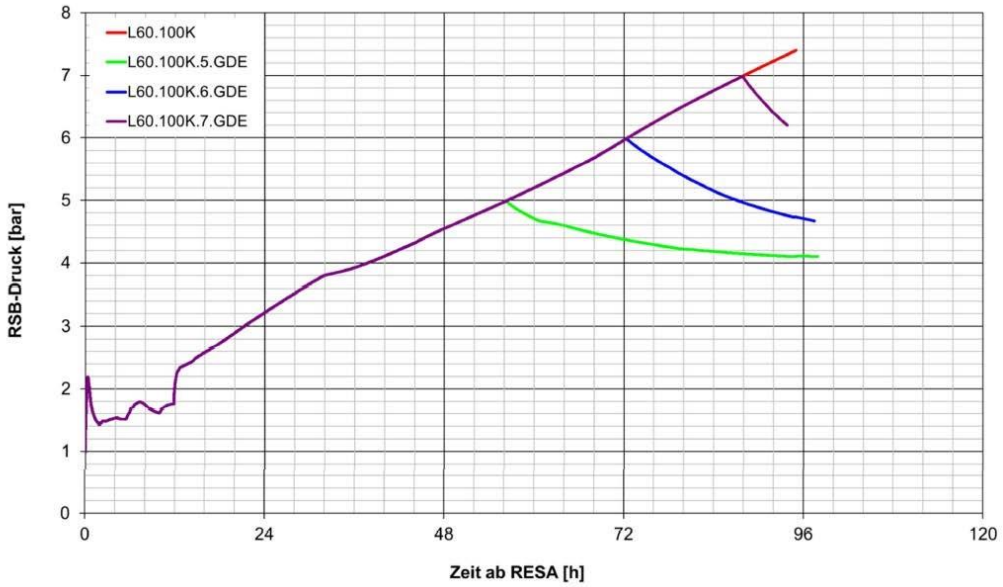

Abb. 1: Exemplarischer zeitlicher Verlauf des Druckaufbaus im Containment im Rahmen eines Kernschmelzunfalls und der Einfluss gefilterter Druckentlastungen (Venting) auf den Druck im Containment (Grafik: Framatome GmbH, Safety and Process Engineering, Dr. Matthias Braun).

Der Druckaufbau wird zwischen Auslegungsdruck und RSB-Prüfdruck (7.7 bar-abs) mit der Einleitung der RSB-Druckentlastung (im Diagramm bei 5 bar-abs, 6 bar-abs und 7 bar-abs als Variationsrechnungen) beendet, und der RSB-Druck fällt wieder ab. Entsprechend den Notfallprozeduren soll die Druckentlastung beendet werden, wenn der halbe Prüfdruck erreicht wird, d. h. bei 0.5 × 6.7 bar-ü = 3.4 bar-ü = 4.4 bar-abs.

Durch die Druckentlastung werden etwa 5 kg/s Dampf aus dem Containment abgeführt, was zu einer Kühlleistung von circa 10 MW führt. Die Geschwindigkeit des Druckabbaus ist dabei dadurch bestimmt, wieviel Dampf innerhalb des Containments nachgebildet wird, d. h.

- Gibt es siedende Wasservorlagen im RSB?
- Wird Nachzerfallsleistung durch die Zersetzung von Fundamentbeton durch Schmelze-Beton-Wechselwirkung gebunden?
- Wie lange nach Reaktorschnellabschaltung (RESA) ereignete sich die Freisetzung, wie groß ist die Nachzerfallsleistung?

– Wird Kaltwasser in das Containment eingespeist?

Als typische Zeitskala eines Druckentlastungszyklus kann man jedoch mehrere Stunden bis Tage annehmen. Die Empfehlung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) für die Einführung der gefilterten Druckentlastung bei deutschen DWR lautet,

– dass eine „Druckbegrenzung bei Druckentlastung ohne Wasserzufuhr in den Sicherheitsbehälter“ und

– dass eine „Druckminderung auf etwa halben Prüfdruck in ca. 2 Tagen (Richtwert) bei Druckentlastung mit Wasserzufuhr in den Sicherheitsbehälter“ erreicht wird (RSK 1986).

Zu 2. Welcher Nuklidvektor wird beim Venting angenommen?

Bei einem Venting wird der Spaltprodukt-Vektor primär durch die Wirksamkeit des Notfallfilters gegeben. Edelgase können nicht zurückgehalten werden. Der Dekontaminationsfaktor für Iodverbindungen liegt (konservativ über Elementariod und Organoiod gemittelt) in etwa bei 10. Luftgetragene Aerosole werden mit einem Dekontaminationsfaktor zwischen 1 000 (Auslegung) und 100 000 (bester Schätzwert) zurückgehalten.

Daraus ergibt sich, basierend auf einer KORIGEN-Rechnung für einen typischen End Of Cycle-Gleichgewichtskern eines DWR der 1300-MW-Klasse, ein konservativer in die Umgebung abgegebener Isotopenvektor nach vier Tagen von:

Edelgase
- Xe-133 1E19 Bq
- Kr-85 1E17 Bq

Iod
- I-131 2E15 Bq
- I-132 2E15 Bq

Aerosole
- Te-132 1E11 Bq
- Cs-134 1E10 Bq
- Cs-137 1E10 Bq
- Mo-99 1E10 Bq
- Ba-140 3E10 Bq
- Nb-95 2E10 Bq
- Summe restlicher aerosolbildender Isotope ~1E11 Bq

Beim ungefilterten Venting kann davon ausgegangen werden, dass um den Faktor 10 mehr Iod und um den Faktor 1 000 mehr Cs-Isotope freigesetzt werden.

Zu 3. Wie sieht der Nuklidvektor bei Containment-Versagen aus?

Bei einem Containment-Versagen kommt es primär darauf an, wann und zu welchem Grade der Reaktorsicherheitsbehälter (RSB) versagt hat. Im Falle eines intakten Containments setzt sich etwa die Hälfte der Masse an luftgetragenen Aerosolen etwa alle vier Stunden nach Eintritt des Kernschadens im Containment ab. Das bedeutet, je länger die durchschnittliche Verweilzeit der Aerosole in der RSB-Atmosphäre ist, desto geringer sind die Aerosolfreisetzungen.

Als typische Freisetzung bei einer frühen Containment-Leckage kann man, basierend auf dem Reaktorunfall von Fukushima oder typischen PSA 2 Resultaten von DWRs, von einer Freisetzung von einigen Prozent des Kerninventars von Iod und Cäsium ausgehen. Zum Vergleich, die Freisetzung des Reaktorunfalls von Tschernobyl setzte circa 30 % des Cäsiums- und 50 % des Iod-Kerninventars frei. Basierend auf dieser Freisetzungshypothese kann der Nuklidvektor wie folgt grob abgeschätzt werden:

Edelgase (unverändert im Vergleich zum gefilterten Venting)

- Xe-133 1E19 Bq
- Kr-85 1E17 Bq

Iod

- I-131 3E16 Bq
- I-132 5E16 Bq

Aerosole

- Te-132 5E16 Bq
- Cs-134 5E15 Bq
- Cs-137 5E15 Bq

Es ist zu beachten, dass schwerer flüchtige Isotope wie Barium oder Niob in geringerem Anteil freigesetzt werden, als man es durch eine lineare Skalierung des Venting-Quellterms erwarten würde, da diese erst recht spät im Unfallablauf, insbesondere während der Schmelze-Beton-Wechselwirkung, freigesetzt werden und daher bei späten Freisetzungsszenarien wie eben dem Venting überproportional in der Containment-Atmosphäre vorkommen.

Angesichts der Unsicherheiten der Quelltermprognosen sind die hier genannten Quellterme in guter Übereinstimmung mit der Quellterm-Klassifizierung der Empfehlung der SSK zu Quellterm und frühen Schutzmaßhamen bei Kernkraftwerksunfällen bei unklarer Lage (SSK 2019), die für die Anwendung des HERCA/WENRA-Konzepts vorgeschlagen wird.

Zu 4. Welche Iod-Spezies liegen bei der Freisetzung vor?

Iod kommt primär im RSB gebunden in Aerosolform vor, sowie in kleinen Massenanteilen als Organoiod (CH_3I) oder Elementariod. Während Aerosole sich im RSB auf Oberflächen absetzen und in Wasservorlagen gebunden werden, ist der Siedepunkt von Organoiod und Elementariod so niedrig, dass diese innerhalb des Containments als praktisch gasförmig angesehen werden. Somit nimmt die Konzentration von Organoiod und Elementariod in der Atmosphäre des RSB mit der Zeit nicht im selben Maßstab ab, wie es bei den Aerosolen der Fall ist. Damit ergeben sich folgende Situationen:

1. Im Falle einer gefilterten Druckentlastung wird Organoiod den Quellterm in die Umgebung dominieren. Dies wird durch den Umstand verursacht, dass die Wirksamkeit der Venting-Filter sehr groß für Aerosole ist und nur eingeschränkt für Organoiod.
2. Im Falle eines Containment-Versagen mit großer Freisetzung von Aerosolen zu rechnen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Iod-Chemie im Containment, d. h. der Übergang zwischen Elementariod, Organoiod und partikelförmige Iodverbindungen, bis heute nur eingeschränkt simuliert werden kann und von vielen Einflussparametern (Wechselwirkung mit Dekontaminationsanstrichen) beeinflusst wird. Daher kann eine Iodspezifikation generell nur mit entsprechenden Unsicherheiten vorhergesagt werden und es kann lediglich auf Messungen der Iodspeziationen in der Umwelt zurückgegriffen werden. Diese zeigen einen überwiegenden Anteil von gasförmigen und organisch gebundenen Iod (Abbildungen 3 und 4).

Die Vorhersage der Anteile von gasförmigem und partikelgebundenem Iod bei Freisetzungen nach Kernschmelzunfällen ist ein weitgehend ungelöstes Problem. Während klar zu sein scheint, dass bei einer Kernschmelze Iod in der Form von CsI freigesetzt wird, können die Prozesse in der Dampfatmosphäre des Sicherheitsbehälters sowie in der Wasservorlage des Sumpfes bisher nicht detailliert modelliert werden. Aussagen über die Anteile der Iod-Spezies bleiben allgemein, wie in der vorstehenden Aufzählung. Die Zahlenangaben sind jedoch nicht belastbar.

Ishikawa et al. (2015) haben den Unfallablauf von Block 3 des Kernkraftwerks in Fukushima Dai-ichi mit Hilfe des THALES2 Codes untersucht. Das Programm wurde mit dem Kiche Code

(Moriyama et al. 2010) zur Beschreibung der Iod-Chemie in der wässrigen Phase gekoppelt. Die Autoren berichten, dass die Berücksichtigung der Iod-Chemie in der wässrigen Phase dazu führte, dass wesentlich höhere Anteile gasförmigen und organischen Iods aus der Wasservorlage des „Suppression Pools“ in das Venting-System freigesetzt wurden als ohne Berücksichtigung der Iod-Chemie in der wässrigen Phase (Abbildung 2). Nach dieser Arbeit können die freigesetzten gasförmigen Iod-Spezies 1 bis 2 Größenordnungen häufiger als CsI sein.

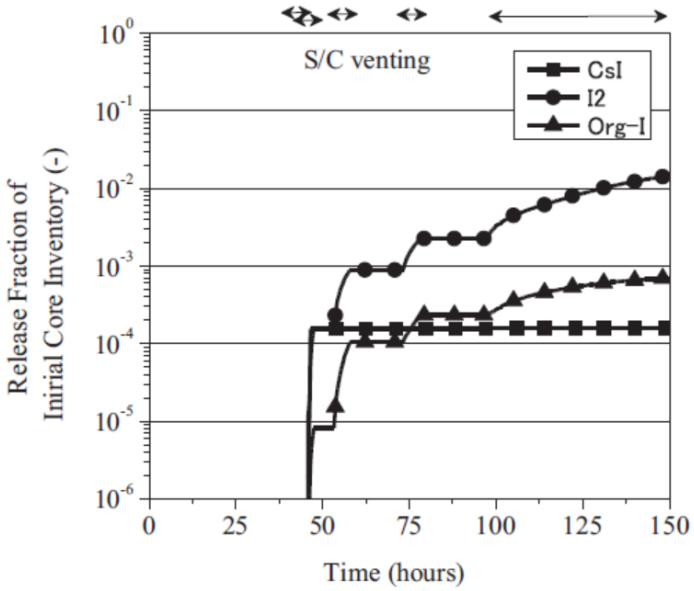

Abb. 2: Freisetzung verschiedener Iod-Spezies aus dem Containment in dem von den Autoren betrachteten Basisfall für den Unfall in Block 3 von Fukushima Dai-ichi (Ishikawa et al. 2015).

Die Anteile der verschiedenen Iod-Spezies nach der Freisetzung werden im Verlauf des atmosphärischen Transports verändert. Partikelgebundenes Iod kann sedimentieren oder ausgewaschen werden. I_2 und RI werden photochemisch oxidiert und die Reaktionsprodukte können sich an Aerosolpartikel anlagern.

Zu 5. Welche Iod-Spezies wurden in der Umwelt nach Kernkraftwerksunfällen beobachtet?

Die Ergebnisse von Messungen luftgetragener Iodisotope nach den Unfällen von Tschernobyl und Fukushima Dai-ichi zeigen Anteile von gasförmigem Iod und partikelgebundenem Iod, die stark von den für die Freisetzung vorhergesagten abweichen.

Für das partikelgebundene Iod wurden atmosphärische Aufenthaltszeiten von drei bis fünf Tagen über dem Nordpazifik gemessen; die charakteristische Zeitkonstante für die Gas-zu-Partikel-Umwandlung wurde zu circa 12 Tagen ermittelt (Uematsu et al. 1988). Die Autoren berichten, dass mehr als 60 % des gesamten aus Tschernobyl freigesetzten I-131 gasförmig vorlag (Aoyama et al. 1986; Bondietti und Brantley 1986). Ayoma et al. (1986) selbst schätzten, dass 65 % bis 70 % des Iods noch 8 oder 9 Tage nach der Freisetzung gasförmig war. Cambray et al. (1987) beobachteten in Chilton ein Verhältnis von Gesamtiod zu partikelgebundenem Iod von etwa 4, was ebenfalls etwa 75 % gasförmigem Iod entspricht.

Nach dem Unfall von Fukushima Dai-ichi wurden etwa 120 km südlich von Fukushima Dai-ichi am Nuclear Science Research Institute (NSRI) der Japan Atomic Energy Agency (JAEA) in Tokai-mura, Ibaraki ab dem 15. März 2011 Messungen der Aktivitätskonzentrationen in der bodennahen Luft von gasförmigem und partikelgebundenen Iod-Radionukliden durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die Zeitreihen bis zum 30. März 2011 sowie die beobachteten Verhältnisse der Aktivitätskonzentrationen von gasförmigem I-131 zum gesamten I-131.

Die Aktivitätskonzentrationen zeigen ausgeprägte Maxima, die dem Durchzug unterschiedlich kontaminierter Luftmassen zuzuschreiben sind. Die Anteile gasförmigem I-131 zeigen starke Schwankungen und liegen zwischen 34 % und 93 %. Die niedrigsten Anteile von gasförmigem I-131 sind bei den höchsten I-131-Aktivitätskonzentrationen zu finden. In der Summe der Aktivitätskonzentrationen, die als Näherung für das Wirkungsintegral der Inhalationsdosis angesehen werden kann, beträgt der Anteil des gasförmigen I-131 50 %.

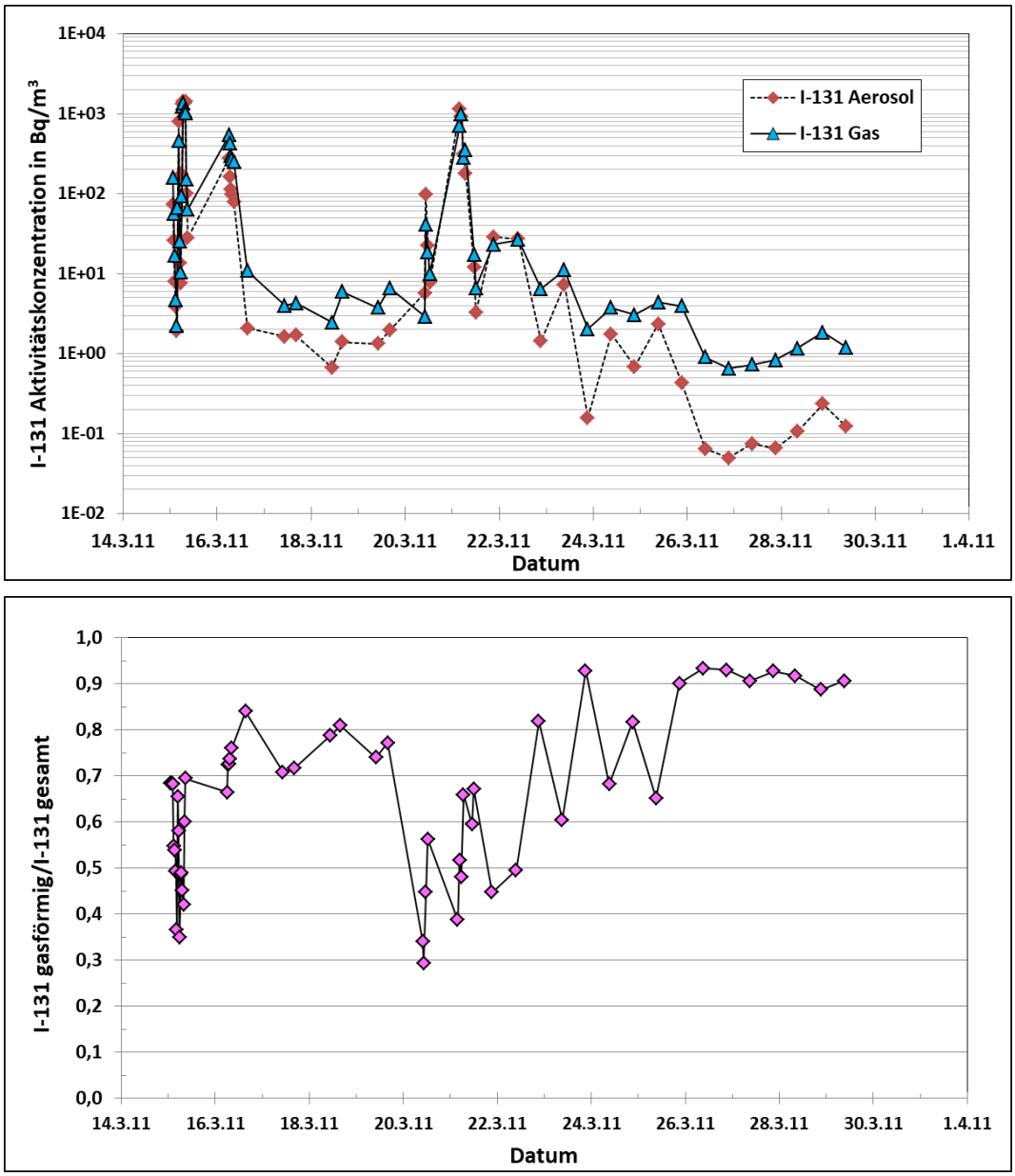

Abb. 3: Zeitreihen der I-131-Aktivitätskonzentrationen für gasförmiges und partikelgebundenes Iod (obere Abbildung) und des Verhältnisses I-131 gasförmig zu I-131 gesamt (untere Abbildung) in der bodennahen Luft am Nuclear Science Research Institute (NSRI) der Japan Atomic Energy Agency (JAEA) in Tokai-mura, Ibaraki. Die Daten wurden der Arbeit von Ohkura et al. (2012) entnommen.

Auch in Europa wurden nach dem Unfall von Fukushima Dai-ichi hohe Anteile gasförmigen I-131 beobachtet (Masson et al. 2011). Auf der Grundlage von etwa 210 gepaarten Messungen im Zeitraum bis 12. April 2011 wurde ein mittleres Verhältnis von gasförmigem zum totalen I-131 von $77{,}2\,\% \pm 13{,}6\,\%$ ermittelt (Abbildungen 4 und 5). Diese Autoren berichten auch, dass Messungen auf der Anlage in Fukushima Dai-ichi für den Zeitraum vom 22. März 2011 bis

zum 4. April 2011 ein mittleres Verhältnis von partikelgebundenem zu gasförmigem I-131 von 0,46 ± 0,17 ergaben, d. h. ein Verhältnis von gasförmigem zu Gesamtiod von 71 % ± 11 %.

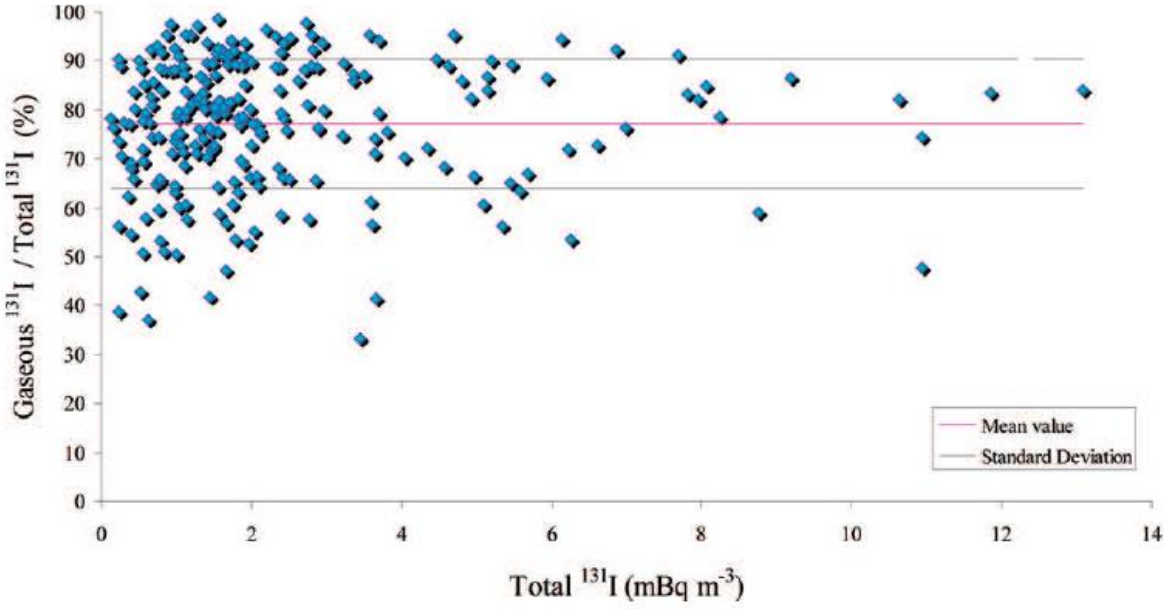

Abb. 4: Verhältnisse von gasförmigem Iod zu Gesamtiod in der Atmosphäre in Europa nach dem Unfall von Fukushima Dai-ichi (abgedruckt mit Genehmigung von O. Masson, A. Baeza, J. Bieringer, et al., Tracking of Airborne Radionuclides from the Damaged Fukushima Dai-Ichi Nuclear Reactors by European Networks. Environ Sci Technol. 2011 Sep 15;45(18):7670. Copyright © 2011 American Chemical Society (Masson et al. 2011)).

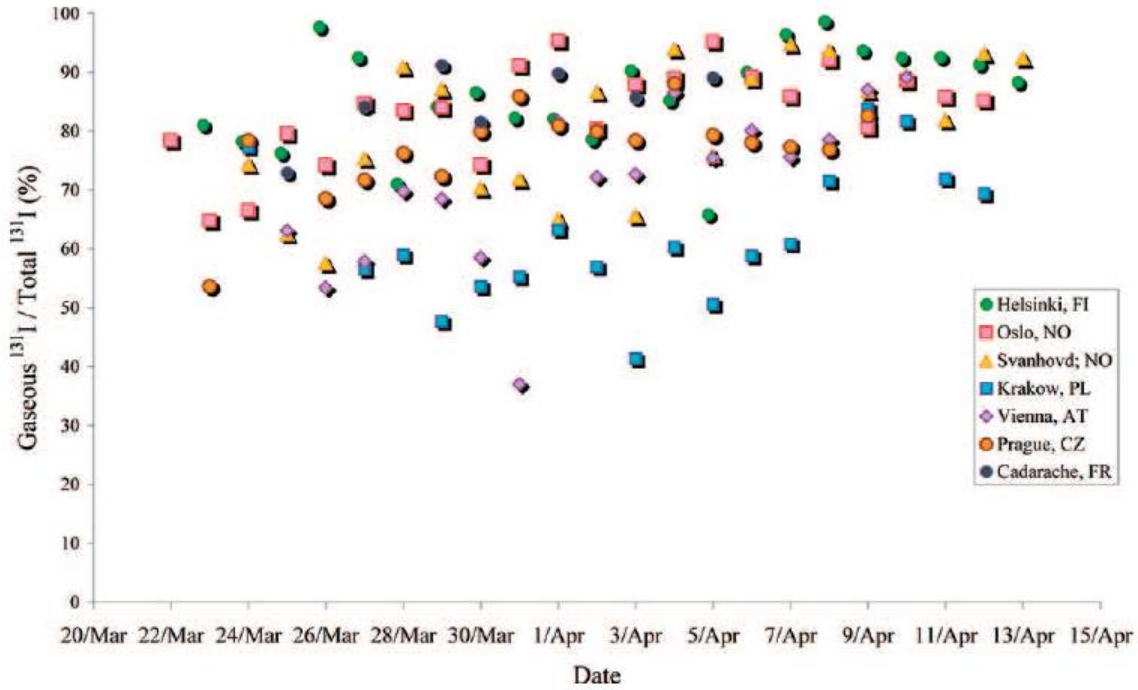

Abb. 5: Zeitliche Veränderung der Verhältnisse von gasförmigem Iod zu Gesamtiod in der Atmosphäre in Europa nach dem Unfall von Fukushima Dai-ichi (abgedruckt mit Genehmigung von O. Masson, A. Baeza, J. Bieringer, et al., Tracking of Airborne Radionuclides from the Damaged Fukushima Dai-Ichi Nuclear Reactors by European Networks. Environ Sci Technol. 2011 Sep 15;45(18):7670. Copyright © 2011 American Chemical Society (Masson et al. 2011)).

UNSCEAR hat in seinem Report zum Unfall von Fukushima Dai-ichi ein Verhältnis von gasförmigem zum partikelgebunden I-131 von eins angenommen, hat aber darauf hingewiesen, dass dieses Verhältnis eine Unsicherheit von bis zu einem Faktor zwei hat (UNSCEAR 2013).

Man kann davon ausgehen, dass weite Transportwege des Iods die Anteile des gasförmigen Iods verändern, da

1. die Depositionsgeschwindigkeiten von gasförmigen Iod-Spezies und partikelgebundenem Iod deutlich unterschiedlich sind,

die Konversion von I_2 und RI zu partikelgebundenem Iod langsamer abläuft als die Deposition der Partikel. Eine quantitative Beschreibung dieser durch gegenläufige Prozesse verursachten Veränderungen ist derzeit nicht möglich. Trincal et al. (2015) haben eine Übersicht über die für den atmosphärischen Transport relevanten Prozesse gegeben. Die Autoren kommen zu dem Schluss: "*Significant differences between measurements and modeling of iodine radiation levels resulting from the Fukushima nuclear accident could be at least partially explained by the fact that the IRSN dispersion tool does not consider chemical transformation during transport in the atmosphere. To improve this, in a first time, a chemical mechanism of gas phase reactions, including photolysis reactions, coming from a detailed literature review, has been implemented in 0D simulation software. Results analysis revealed that several parameters are able to influence the iodine speciation, such as the pollutant levels (O_3, NO_x, VOC), the photolysis (location, season, day/night cycle) and the iodine release rate from the accident. Generally, the iodocarbon forms are predominant, obtained by reactions of iodine with atmospheric volatile organic compounds (VOC).Without organic compounds, the iodine oxides I_xO_y and INO_x become the main species.*"

Das Ergebnis eines internationalen Iod-Workshops (NEA 2016) wurde im Hinblick auf die Iod-Speziation in der Atmosphäre u. a. so zusammengefasst: "*Iodine chemistry in the environment: Little attention was given to iodine chemistry in the environment for the assessment of its dispersion and related radiological consequences. Due to the complexity of the chemical systems to be treated and the lack of validation of the existing preliminary modelling, the potential impact of iodine chemistry in the environmental on radiological consequences has to be further assessed. If the impact is shown to be strong, a pragmatic approach to model it will have to be developed.*"

Für die Strahlenexposition der Schilddüse durch die Inhalation von Radioiod ist das Verhältnis von gasförmigen zu partikelgebundenem Iod jedoch von großer Bedeutung, da die ICRP Dosiskoeffizienten für die Schilddrüsendosis bei Inhalation von gasförmigem I-131 um etwa den Faktor 2 bis 3 höher sind als für partikelgebundenes I-131 (Tabelle 2).

Tab. 2: Dosiskoeffizienten (Sv/Bq) für Inhalation von Iod-Spezies (Auszug aus BMU 2001)

I-131 (partikelgebunden)									
Alter	<= 1 Jahr			1 – 2 Jahre			2 – 7 Jahre		
Klasse	F	M	S	F	M	S	F	M	S
Schilddrüse	1,4E-6	3,2E-7	2,3E-8	1,4E-6	2,1E-7	1,2E-8	7,3E-7	1,1E-7	5,9E-9
effektiv	7,2E-8	2,2E-8	8,8E-9	7,2E-8	1,5E-8	6,2E-9	3,7E-8	8,2E-9	3,5E-9
Alter	7 – 12 Jahre			12 – 17 Jahre			> 17 Jahre		
Klasse	F	M	S	F	M	S	F	M	S
Schilddrüse	3,7E-7	5,5E-8	3,0E-9	2,2E-7	3,4E-8	1,7E-9	1,5E-7	2,2E-8	1,1E-9
effektiv	1,9E-8	4,7E-9	2,4E-9	1,1E-8	3,4E-9	2,0E-9	7,4E-9	2,4E-9	1,6E-9
I-131 (Gase und Dämpfe)									
Alter	<= 1 Jahr			1 – 2 Jahre			2 – 7 Jahre		
Klasse	I_2		CH_3I	I_2		CH_3I	I_2		CH_3I
Schilddrüse	3,3E-6		2,6E-6	3,2E-6		2,5E-6	1,9E-6		1,5E-6
effektiv	1,7E-7		1,3E-7	1,6E-7		1,3E-7	9,4E-8		7,4E-8
Alter	7 – 12 Jahre			12 – 17 Jahre			>17 Jahre		
Klasse	I_2		CH_3I	I_2		CH_3I	I_2		CH_3I
Schilddrüse	9,5E-7		7,4E-7	6,2E-7		4,8E-7	3,9E-7		3,1E-7
effektiv	4,8E-8		3,7E-8	3,1E-8		2,4E-8	2,0E-8		1,5E-8

In Tabelle 2 werden die Dosiskoeffizienten für partikelgebundene Iodisotope nach den sog. Lungenabsorptionsklassen F („fast“), M („moderate“) und S („slow“) unterschieden. Da im Falle eines Kernkraftwerksunfalls keine Informationen über die Absorptionseigenschaften der freigesetzten partikelgebundenen Iodisotope vorliegen, werden jeweils die ungünstigsten Lungenabsorptionsklassen angenommen.

Nimmt man an, dass I-131 nur zu 50 % als partikelgebundenes Iod vorliegt, bedeutet das, dass nur ein Drittel der Schilddrüsendosis durch partikelgebundenes I-131 verursacht wird, zwei Drittel durch gasförmiges I-131. Der Anteil des partikelgebundenen I-131 an der Schilddrüsendosis könnte nach den Messungen von Masson et al. (2011) aber auch nur etwa 5 % ausmachen, wenn nämlich nur 10 % des I-131 in partikelgebundenem Zustand vorliegt. Für die Schutzwirkung von FFP3-Atemschutzmasken bedeutet das, dass durch sie maximal 30 % der Schilddrüsendosis verhindert werden kann und dass die Schutzwirkung sogar deutlich geringer sein kann. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass es Expositionssituationen geben kann, in denen gasförmige Iod-Spezies deutlich überwiegen.

4.3 Wirksamkeit der Iodblockade der Schilddrüse

Wesentlich für die hier behandelte Fragestellung der Eignung von Atemschutzmasken zum Schutz vor radioaktivem Iod nach einem schweren Kernkraftwerksunfall ist, dass der Anteil des gasförmigen Iods den des partikelgebundenen Iods deutlich übersteigen kann. Gegen das gasförmige Iod bieten die Atemschutzmasken aber keinen Schutz, sehr wohl aber die Iodblockade. Dieser ist daher in jedem Fall der Vorzug zu geben.

Für partikelgebundenes Iod und andere partikelgetragene Radionuklide bieten Atemschutzmasken zwar einen guten Schutz, jedoch ist darauf hinzuweisen, dass die Inhalationsdosis der anderen Radionuklide nach einem schweren Kernkraftwerksunfall nur von untergeordneter Bedeutung für die effektive Dosis im ersten Jahr ist.

In den Folgejahren ist die Inhalation von Radionukliden als Folge von Resuspension für die meisten menschlichen Tätigkeiten vernachlässigbar.

Die radiologischen Folgen einer RSB-Druckentlastung werden dominiert durch die Wolkenstrahlung der abgegebenen Edelgaswolke in der direkten Umgebung des Kraftwerks und der Iodfreisetzung, insbesondere bei Inkorporation des Iods. Daher werden international der Aufenthalt in Gebäuden gegen die Wolkenstrahlung und die Gabe von stabilem Iod gegen eine Inkorporation von radioaktivem Iod als geeignete Notfallschutzmaßnahmen angesehen.

Aufgrund der Aerosolfreisetzung ist eine zusätzliche Einführung von Partikelfiltern gegen eine Inkorporation von z. B. Cäsium nur für Einsatzkräfte in direkter Umgebung (ca. 10 km Umkreis) des Kraftwerks sinnvoll, falls für diese Personengruppe keine Aktivkohlemasken zur Verfügung stehen.

Zurückkommend zur Strahlenexposition der Schilddrüse durch Radioiod ist darauf hinzuweisen, dass die eigentlich wegen des relativ hohen Risikos schützenswerten Menschen Kleinkinder, Kinder und Schwangere sind. Für Kleinkinder und Kinder ist das Tragen von Atemschutzmasken nicht oder nur bedingt zumutbar und generell muss auf mögliche gesundheitliche Beeinträchtigung durch das Tragen von Atemschutzmasken hingewiesen werden.

Wenn durch FFP3-Atemschutzmasken maximal ein Drittel der Schilddrüsendosis abgewendet werden kann, ist auch für die Iodblockade zu fragen, wie wirksam diese ist. Dies gilt insbesondere für die Wirksamkeit der Iodblockade in Abhängigkeit vom Einnahmezeitpunkt der Iodtabletten und der Dauer der Freisetzung radioaktiven Iods.

Die SSK hat zur Iodblockade u. a. Folgendes ausgeführt (SSK 2011). „*Da die Speicherkurve der Schilddrüse am Anfang sehr steil verläuft, ist die Jodblockade mit einer über 95 %igen Wirkung am besten, wenn das stabile Jod kurz vor der Resorption des radioaktiven Jods im Organismus vorhanden ist. Aber auch in den ersten Stunden nach Aufnahme des radioaktiven Jods wird durch die Gabe von stabilem Jod noch eine Reduktion der Speicherung erreicht (Jodgabe nach zwei Stunden – Reduktion der Speicherung des radioaktiven Jods um 60 % bis 80 %, Jodgabe nach acht Stunden – Reduktion der Speicherung um 20 % bis 40 %). Im Gegensatz dazu hat die Verabreichung von stabilem Jodid später als 24 Stunden nach abgeschlossener Inhalation oder Ingestion keinen protektiven Einfluss mehr auf die Speicherung des radioaktiven Jods, da sie die Verweildauer des radioaktiven Jods in der Schilddrüse nach diesem Zeitpunkt sogar verlängert. Deshalb sollte die Einnahme von Jodtabletten nach diesem Zeitpunkt nicht mehr durchgeführt werden. Werden die Jodtabletten zu früh, d. h. mehr als 24 Stunden vor der Aufnahme von radioaktivem Jod eingenommen, ist eine erneute Einnahme erforderlich.“*

Zusammenfassend kann man feststellen:

- FFP 3-Atemschutzmasken ersetzen nicht die Iodblockade. FFP 3-Atemschutzmasken bewirken ohne Iodblockade nur einen geringen Effekt bzgl. der Schilddrüsendosis; bei erfolgter Iodblockade ist der Effekt der FFP 3-Atemschutzmaske vernachlässigbar.
- FFP 3-Atemschutzmasken sind in jedem Fall wirksam gegen andere partikelgebundene Radionuklide, d. h. vor allem Cs-134/137, Tellurisotope sowie andere längerlebige Radionuklide. In Bezug auf die Strahlenexposition durch längerlebige Radionuklide kann festgestellt werden, dass die Inhalationsdosis generell von untergeordneter Bedeutung ist und der Expositionspfad Inhalation resuspensierter beta- und gammastrahlender Radionuklide in der Regel vernachlässigbar ist.

4.4 Schutz der Schilddrüse durch die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“

Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ schützt in erster Linie vor externer Strahlung aus der Wolke und von am Boden abgelagerten Radionukliden. Zusätzlich bietet sie auch, abhängig vom Luftwechsel in den Gebäuden, einen bedingten Schutz gegen Inhalation von Radionukliden. Für die äußere Exposition kann ein Schutzfaktor von 10 angenommen werden, beim

Aufenthalt in Kellern und Schutzräumen ein Faktor von 50 (NAZ 2019). Bei dichter Bebauung mit massiven Gebäuden kann der Schutzfaktor bis zu 100 betragen (BM.I 2007).

In den Radiologischen Grundlagen (SSK 2014) wird ausgeführt: „*Für Planungszwecke kann angenommen werden, dass durch die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden" sowohl für eine Exposition durch externe Strahlung als auch durch Inhalation radioaktiver Stoffe ein Schutzfaktor von 3 erreicht wird (Brenk 1987, Thatcher et al. 2003).*"

In Bezug auf die Strahlenexposition der Schilddrüse durch Inhalation von Radioiod ist diese Aussage abhängig von der angenommenen Luftwechselrate. In nichtrenovierten Altbauten liegt der natürliche Luftwechsel bei 1 h^{-1}, in renovierten Gebäuden zwischen 0,5 h^{-1} und 1 h^{-1}. Bleiben Fenster und Türen geschlossen, kann eine Luftwechselrate zwischen >0 h^{-1} und 0,3 h^{-1} angenommen werden (https://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/1307/Luftwechsel).

Mit einer mittleren Luftwechselrate von 0,2 h^{-1} und unter Berücksichtigung der Sedimentation von lungengängigen Aerosolteilchen in Innenräumen berechnet man für einen fünfstündigen Wolkendurchzug einen Schutzfaktor von 5 für die Schilddrüsendosis. Diese Abschätzung gilt jedoch ausschließlich für partikelgebundes Radioiod und ist mit der Aussage in den Radiologischen Grundlagen (SSK 2014) verträglich.

Da die Schilddrüsendosis als Folge von Inhalation von Radioiod im aktuellen Notfall von vielen, meist unbekannten Parametern abhängt, kann die Schutzwirkung der Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden" für die Schilddrüse nicht zuverlässig eingeschätzt werden. Der Iodblockade ist auch hier eindeutig der Vorzug zu geben.

4.5 Schutz durch Atemschutzmasken im radiologischen Notfall

4.5.1 Allgemeines

Es wird davon ausgegangen, dass im Falle eines Kernkraftwerksunfalls mit Kernschmelze die Iodblockade und auch die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden" entsprechend den Eingreifrichtwerten durchgeführt werden.

Es darf beim Einsatz von Atemschutzmasken wegen der geringen Schutzwirkung vor Radioiod nicht der Eindruck falscher Sicherheit entstehen. Atemschutzmasken ersetzen nicht die Iodblockade.

4.5.2 Allgemeine Bevölkerung – Kinder

Für Kleinkinder und Kinder ist von der Anwendung von Atemschutzmasken abzuraten. Es sind keine zugelassenen Atemschutzmasken am Markt verfügbar. Das Tragen kann bei Kleinkindern und Kindern nicht erzwungen werden und es besteht die Gefahr von Nebenwirkungen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch den existierenden Atemwiderstand und das Totraumvolumen zu erhöhten CO_2-Konzentrationen kommen kann, die zu erheblichen Gesundheitsschäden führen. Von der Selbstversorgung mit Atemschutzmasken wird daher abgeraten.

4.5.3 Allgemeine Bevölkerung – Erwachsene

Für die allgemeine Bevölkerung ergibt sich bei Befolgung der sonstigen Schutzmaßnahmen kein nennenswerter zusätzlicher Schutz durch das Tragen von Atemschutzmasken. Es steht natürlich jedem frei sich selbst zu versorgen. Dabei ist die begrenzte Lagerdauer der Atemschutzmasken bei einer Bevorratung zu beachten. Es muss darauf hingewiesen werden, dass Atemschutzmasken nicht die Iodblockade ersetzen.

4.5.4 Einsatz- und Hilfskräfte

Für Einsatzkräfte kann das Tragen von Atemschutzmasken als Schutz vor partikelgebunden Radionukliden sinnvoll sein.

4.5.5 Beantwortung der Fragen des Beratungsauftrags

Wie sind die Filterwirkung verschiedener infrage kommender Atemschutzmaskentypen (z. B. FFPl-3) bzw. die zu erwartende Verringerung der inhalationsbedingten effektiven Dosis und Schilddrüsendosis bei Tragen einer solchen Atemschutzmaske auch in möglicher Abhängigkeit vom vorliegenden Nuklidvektor und dessen chemischer Form zu beurteilen?

In jedem Fall ist FFP3-Atemschutzmasken der Vorzug zu geben, da die Pflicht zur arbeitsmedizinischen Pflicht-Vorsorgeuntersuchung entfallen ist und die Schutzwirkung deutlich höher ist.

Bisher genutzte FFP2-Atemschutzmasken können weiter benutzt werden. Dort wo FFP2 benutzt wird, sollte im Laufe der Zeit nach Ablauf der Haltbarkeit wegen des höheren Schutzfaktors auf FFP3 übergegangen werden.

Für welche Bevölkerungs- und Altersgruppen ist das Tragen der infrage kommenden Atemschutzmasken grundsätzlich zumutbar oder nicht zumutbar und welche maximalen Tragedauern sind anzunehmen?

Für Kleinkinder sind Atemschutzmasken nicht zumutbar, ihre sachgerechte Verwendung kann nicht sichergestellt werden und ihre Verwendung ist gesundheitlich bedenklich, wenn nicht sogar gefährlich.

Für Kinder sind Atemschutzmasken bedingt zumutbar, obwohl auch hier nicht von sachgerechter Verwendung ausgegangen werden kann. Da für Kinder keine qualifizierten Atemschutzmasken am Markt verfügbar sind, ist auch von der Selbstversorgung abzuraten.

Für Jugendliche und Erwachsene ist das Tragen von Atemschutzmasken für begrenzte Zeit zumutbar. Dabei ist aber zumindest eine Einweisung zum richtigen An- und Ablegen, sowie zum Tragen erforderlich.

Wie ist die Wirksamkeit von Atemschutzmasken in Verbindung mit den üblichen Schutzmaßnahmen in der Frühphase radiologischer Notfälle wie z. B. dem „Aufenthalt in Gebäuden“ zu bewerten?

Der Schutzfaktor von Atemschutzmasken für die Schilddrüsendosis liegt etwa bei 3, d. h. ohne weitere Schutzmaßnahmen kann 30 % der potentiellen Schilddrüsendosis vermieden werden. Allerdings ist eine zuverlässige Einschätzung wegen vieler, meist unbekannter Einflussgrößen in einem aktuellen Fall, nicht möglich. Bei bestehenden Schutzmaßnahmen „Iodblockade“ und „Aufenthalt in Gebäuden“ ist der zusätzliche Schutz der Schilddrüse durch FFP3-Atemschutzmasken vernachlässigbar.

Welche Kombinationen mit anderen Schutzmaßnahmen erscheinen sinnvoll?

Die Iodblockade bleibt die erste Wahl. Für den Schutz der Schilddrüse rät die SSK von der Anwendung von Atemschutzmasken ab.

Für den Fall, dass die SSK sich generell für eine entsprechende Nutzung von Atemschutzmasken aussprechen sollten, an welche radiologischen oder nicht radiologischen Kriterien sollte eine mögliche Maßnahme „Empfehlung zum Tragen von Atemschutzmasken“ geknüpft werden und welche möglichen Planungsgebiete ergeben sich für diese Maßnahme?

Entfällt

Wie viele Atemschutzmasken sollten pro zu versorgendem Bundesbürger und pro Einsatzkraft eingeplant werden?

Für Bundesbürger ist keine Bevorratung von Atemschutzmasken zu empfehlen.

Über die Bevorratung von Atemschutzmasken für Einsatzkräfte muss von den lokalen und regionalen Behörden entschieden werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass solche Atemschutzmasken nicht nur für radiologische Notfälle sondern auch in anderen Situationen mit partikelgebundenen Schadstoffen sinnvoll anwendbar sind.

Empfehlung 1: Bei radiologischen Notfällen kann die Inhalation von partikelgetragenen Radionukliden durch FFP 3-Atemschutzmasken effizient reduziert werden (Schutzfaktor 30). FFP 3-Atemschutzmasken können daher sinnvoll sein, wenn eine Exposition durch partikelgetragene Radioaktivität anzunehmen ist. Da eine arbeitsmedizinische Pflicht-Vorsorgeuntersuchung für den Einsatz von FFP3-Atemschutzmasken nicht mehr erforderlich ist, ist FFP3-Atemschutzmasken der Vorzug vor FFP 1- und FFP 2-Atemschutzmasken zu geben, da letztere deutlich geringe Schutzfaktoren (FFP 1: 4; FFP 2: 10) aufweisen. Keine der FFP-Atemschutzmasken bietet jedoch relevanten Schutz gegen gasförmige Radionuklide, insbesondere gegen gasförmiges oder organisch gebundenes radioaktives Iod. Die SSK empfiehlt daher einen differenzierten Einsatz von FFP 3-Atemschutzmasken gemäß den Empfehlungen 2 bis 5.

Empfehlung 2: Von besonderer Bedeutung im Notfallschutz bei Kernkraftwerksunfällen ist die Inhalation von radioaktiven Iodisotopen wegen der damit verbundenen Strahlenexposition der Schilddrüse. Nach derzeitigem Wissensstand ist davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der freigesetzten Iodisotope in der Umwelt bei den betrachteten Kernkraftwerksunfällen gasförmig als I_2 oder als organisch gebundenes Iod vorliegen wird.

Da die Iodblockade die Schilddrüse sowohl gegen partikelgebundene als auch gegen gasförmige und organisch gebundene radioaktive Iodisotope schützt, empfiehlt die SSK ihr in einem Kernkraftwerksunfall eindeutig der Vorzug vor FFP 3-Atemschutzmasken zu geben, da letztere nur einen auf Partikel begrenzten Schutz bieten. In Bezug auf den Schutz der Schilddrüse kann der Einsatz von FFP 3-Atemschutzmasken in diesem Fall sogar ein falsches Gefühl der Sicherheit vermitteln.

Empfehlung 3: Für **Kleinkinder und Kinder** gibt es derzeit in Europa keine qualifizierten FFP 3-Atemschutzmasken. Im Handel frei erhältliche Atemschutzmasken können in ihrer Schutzwirkung nicht verlässlich eingeschätzt werden. Außerdem kann nicht damit gerechnet werden, dass Kinder solche Atemschutzmasken über längere Zeit anforderungsgemäß tragen. Bei Kleinkindern erscheint dies sogar unmöglich und eine mögliche Gefährdung durch Einschränkung der Atmung ist nicht auszuschließen (siehe Abschnitt 4.5.2). Insbesondere hier ist den Schutzmaßnahmen „Iodblockade“ und/ oder „Aufenthalt in Gebäuden“ eindeutig der Vorzug zu geben und vom

Einsatz von FFP 3-Atemschutzmasken aufgrund der möglichen Gesundheitsgefährdung für Kleinkinder und Kinder abzuraten.

Empfehlung 4: Für **Jugendliche und Erwachsene** der allgemeinen Bevölkerung ist der zusätzliche Einsatz von FFP 3-Atemschutzmasken bei bestehenden Schutzmaßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“ und „Iodblockade“ nicht zu empfehlen, da die zusätzliche Schutzwirkung vernachlässigbar ist.

Für den Fall, dass sich erwachsene Mitglieder der allgemeinen Bevölkerung FFP 3-Atemschutzmasken dennoch selbst besorgen, wird auf den begrenzten Schutz der Schilddrüse durch FFP 3-Atemschutzmasken hingewiesen. Außerdem haben Atemschutzmasken nur eine begrenzte Lagerdauer und müssen in regelmäßigen Zeitabständen erneuert werden.

Empfehlung 5: Für **Einsatz- und Hilfskräfte,** die in der Benutzung von FFP 3-Atemschutzmasken unterwiesen oder geschult sind, sind FFP 3-Atemschutzmasken sinnvoll anwendbar, wenn mit partikelgetragener Radioaktivität zu rechnen ist. Dies gilt z. B. während des Durchzugs einer radioaktiven Wolke und bei stark staubenden Reinigungs- oder Sanierungsmaßnahmen. Die Inhalation von resuspendierten Partikeln ist bei Kontamination mit beta- und gammastrahlenden Radionukliden unter normalen Umweltbedingungen kein relevanter Expositionspfad. FFP3- Atemschutzmasken ersetzen allerdings bei Kernkraftwerksunfällen auch für Einsatz- und Hilfskräfte nicht die u. U. erforderliche Schutzmaßnahme „Iodblockade“.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass Einsatz- und Hilfskräfte beim Kontakt mit der betroffenen Bevölkerung FFP3-Atemschutzmasken aufgrund der psychologischen Wirkung von maskentragenden Einsatzkräften auf nicht maskentragende andere Personen nur zurückhaltend benutzen sollten. Maskenträger verstärken beim Gegenüber ein möglicherweise vorhandenes Angstgefühl dadurch, dass man das Gesicht des Helfers nicht erkennen kann und damit aus dessen Mimik nichts über seine Einschätzung der eigenen Situation ablesen kann. Durch das Tragen zusätzlicher persönlicher Schutzausrüstung (PSA), kann der Helfer zunächst sehr bedrohlich auf den Betroffenen wirken. Soweit das Tragen von Schutzmasken erforderlich ist, empfiehlt das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), die betroffenen Menschen anzusprechen, um durch den Kontakt zum „Menschen hinter der Maske“ dieses Angstgefühl und ein daraus resultierendes, mögliches Bedrohungsgefühl zu reduzieren (BBK 2012). Die Ansprache kann durch Körpersprache und Gesten ergänzt werden.

5 Literatur

Aoyama et al. 1986 — Aoyama M, Hirose K, Suzuki Y, Inoue H, Sugimura Y. High level radioactive nuclides in Japan in May. Nature. 1986 Jun 26-Jul 2;321(6073):819-20, doi: 10.1038/321819a0

BBK 2012 — Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK). Psychosoziales Krisenmanagement in CBRN-Lagen / Psychosocial Crisis Management in CBRN Incidents, Kapitel IV – Handlungsempfehlungen für den CBRN-Einsatz, Seite 40, Abschnitt 5 – Setzen Sie die Basisregeln der psychischen ersten Hilfe auch unter PSA um!

BMI 2007 — Republik Österreich, Bundesministerium für Inneres (Hrsg.). Strahlenschutzratgeber: Verhalten bei Kernkraftwerksunfällen, Anleitung für vorbeugende Maßnahmen. Siebente überarbeitete und erweiterte Auflage, Wien, April 2007. https://www.bmi.gv.at/204/Download/files/007_Strahlenschutzratgeber.pdf, zuletzt aufgerufen am 14.08.2019

BMU 2001 — Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition. RS II 1-11413/28 vom 23. Juli 2001, Banz Nr. 160a und b vom 28.08.2001

Bondietti und Brantley 1986 — Bondietti EA, Brantley JN. Characteristics of Chernobyl radioactivity in Tennessee. Nature. 1986 Jul 24-30;322(6077):313-4, doi: 10.1038/322313b0

Cambray et al. 1987 — Cambray RS, Cawse PA, Garland JA, Gibson JAB, Johnson P, Lewis GNJ, Newton D, Salmon L, Wade BO. Observations on radioactivity from the Chernobyl accident. Nucl. Energy. 1987;26(2):77-101

DGUV 2011 — Deutsche gesetzliche Unfallversicherung (DGUV). Benutzung von Atemschutzgeräten. DGUV Regel 112-190, Dezember 2011. http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/r-190.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.11.2018

DIN EN 149:2009 — Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN EN 149:2009-08. Atemschutzgeräte – Filtrierende Halbmasken zum Schutz gegen Partikeln – Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Deutsche Fassung EN 149:2001+A1:2009

EU 2016 — Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Verordnung (EU) 2016/425 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2016 über persönliche Schutzausrüstungen und zur Aufhebung der Richtlinie 89/686/EWG des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, L 81/51, 31.03.2016

Ishikawa et al. 2015 — Ishikawa J, Kawaguchi K, Maruyama Y. Analysis for iodine release from unit 3 of Fukushima Dai-ichi nuclear power plant with consideration of water phase iodine chemistry. Journal of Nuclear Science and Technology. 2015;52(3):308-14, published online 1. September 2014, doi: 10.1080/00223131.2014.951417

Masson et al. 2011 — Masson O, Baeza A, Bieringer J, Brudecki K, Bucci S, Cappai M, Carvalho FP, Connan O, Cosma C, Dalheimer A, Didier D, Depuydt G, De Geer LE, De Vismes A, Gini L, Groppi F, Gudnason K, Gurriaran R, Hainz D, Halldórsson Ó, Hammond D, Hanley O, Holeý K, Homoki Z, Ioannidou A, Isajenko K, Jankovic M, Katzlberger C, Kettunen M, Kierepko R, Kontro R, Kwakman PJ, Lecomte M, Leon Vintro L, Leppänen AP, Lind B, Lujaniene G, Mc Ginnity P, Mc Mahon C, Malá H, Manenti S, Manolopoulou M, Mattila A, Mauring A, Mietelski JW, Møller B, Nielsen SP, Nikolic J, Overwater RM, Pálsson SE, Papastefanou C, Penev I, Pham MK, Povinec PP, Ramebäck H, Reis MC, Ringer W, Rodriguez A, Rulík P, Saey PR, Samsonov V, Schlosser C, Sgorbati G, Silobritiene BV, Söderström C, Sogni R, Solier L, Sonck M, Steinhauser G, Steinkopff T, Steinmann P, Stoulos S, Sýkora I, Todorovic D, Tooloutalaie N, Tositti L, Tschiersch J, Ugron A, Vagena E, Vargas A, Wershofen H, Zhukova O. Tracking of airborne radionuclides from the damaged Fukushima Dai-ichi nuclear reactors by European networks. Environ Sci Technol. 2011 Sep 15;45(18):7670-7, doi: 10.1021/es2017158

Moriyama et al. 2010 — Moriyama K, Maruyama Y, Nakamura H. Kiche: A simulation tool for kinetics of iodine chemistry in the containment of light water reactors under severe accident conditions. (Contract Research). Japan Atomic Energy Agency, 2010, JAEA-Data/Code 2010-034, https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2010-034.pdf, zuletzt aufgerufen am 18.01.2019

NAZ 2019 — Nationale Alarmzentrale der Schweiz. Schutzmaßnahmen: Aufenthalt im Haus, Aufsuchen von Keller oder Schutzraum. https://www.naz.ch/de/themen/hausaufenthalt.html, zuletzt aufgerufen am 03.06.2019

NDWV 2018 — Verordnung zur Festlegung von Dosiswerten für frühe Notfallschutzmaßnahmen (Notfall-Dosiswerte-Verordnung NDWV) vom 29. November 2018 (BGBl I S. 2034, 2172)

NEA 2016 — Nuclear Energy Agency (NEA). International Iodine Workshop, Full Proceedings. Nuclear Safety, NEA/CSNI/R(2016)5, May 2016, www.oecd-nea.org/nsd/docs/2016/csni-r2016-5.pdf, zuletzt aufgerufen am 08.01.2019

Ohkura et al 2012	Ohkura T, Oishi T, Taki M, Shibanuma Y, Kikuchi M, Akino H, Kikuta Y, Kawasaki M, Saegusa J, Tsutsumi M, Ogose H, Tanuma S, Sawahata T. Emergency monitoring of environmental radiation and atmospheric radionuclides at nuclear science research institute, JAEA following the accident of Fukushima Daiichi nuclear power plant. Japan Atomic Energy Agency, 2012, JAEA-DATA/Code 2012-010, http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2012-010.pdf, zuletzt aufgerufen am 08.01.2019
PSA-BV 1996	Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Benutzung persönlicher Schutzausrüstungen bei der Arbeit (PSA-Benutzungsverordnung - PSA-BV) vom 4. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1841)
RSK 1986	Reaktor-Sicherheitskommission (RSK). Empfehlungen der RSK zur Überprüfung der Sicherheit der Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktor in der Bundesrepublik Deutschland. Empfehlung der RSK, verabschiedet in der 218. Sitzung der RSK am 17. 12.1986. Bekanntmachung im BAnz Nr. 52 vom 17.03.1987
SSK 2011	Strahlenschutzkommission (SSK). Verwendung von Jodtabletten zur Jodblockade der Schilddrüse bei einem kerntechnischen Unfall. Empfehlung der SSK, verabschiedet in der 247. Sitzung der SSK am 24./25.02.2011. Bekanntmachung im BAnz Nr. 135 vom 07.09.2011
SSK 2014	Strahlenschutzkommission (SSK). Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei Ereignissen mit Freisetzungen von Radionukliden. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 268. Sitzung der SSK am 13./14.02.2014. urn:nbn:de:101:1-2014111925770. Bekanntmachung im BAnz AT 18.11.2014 B5
SSK 2019	Strahlenschutzkommission (SSK). Quellterme und frühe Schutzmaßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen mit unklarer Lage. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 300. Sitzung der SSK am 27./28.06.2019
Trincal et al. 2015	Trincal J, Cantrel L, Cousin F, Fevre-Nollet V, Lebegue P. Impact of atmospheric species reactivity on radioactive gaseous iodine transport in severe accident conditions. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2015;198:77-86, doi: 10.2495/AIR150071
Uematsu et al. 1988	Uematsu M, Merrill JT, Patterson TL, Duce RA, Prospero JM. Aerosol residence times and iodine gas/particle conversion over the North Pacific as determined from Chernobyl radioactivity. Geochem. J. 1988;22(4):157-163, doi: 10.2343/geochemj.22.157

UNSCEAR 2000 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with scientific annexes. Volume II: Effects, Annex J. Exposures and effects of the Chernobyl accident, United Nations, New York, 2001, ISBN 92-1-142238-8

UNSCEAR 2013 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation, UNSCEAR 2013 Report, Volume I: Report to the General Assembly with scientific annex A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. United Nations, New York, 2014, ISBN 978-92-1-142291-7

UNSCEAR 2018 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Chernobyl accident. A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. United Nations, New York, 2018

6 Glossar

FFP-Maske	Filtering Face Piece, Atemschutzmaske, die Nase und Mund bedeckt.
HERCA	Heads of the European Radiation Protection Competent Authorities ist Gremium, in dem die Leiter von 56 Strahlenschutzbehörden aus 32 europäischen Ländern Themen, die im Allgemeinen durch Bestimmungen des EURATOM-Vertrags abgedeckt werden, beraten und praktische Lösungen erarbeiten.
KORIGEN	Programmsystem zur Berechnung von Radionuklidinventaren von Kernreaktoren
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PSA 2	Die probabilistische Sicherheitsanalyse der Stufe 2 untersucht die Risiken von Industrieanlagen mittels Wahrscheinlichkeitsrechnung und Systemanalyse. Sie beschäftigt sich damit, aufzuzeigen, welche Szenarien mit welcher Wahrscheinlichkeit und mit welchen Konsequenzen auftreten könnten.
RODOS	Real-time Online Decision Support System, Entscheidungshilfe- und Prognosemodell, das in einem radiologischen Notfall die zukünftige Umweltkontamination und die zu erwartenden Dosen der betroffenen Personen berechnet.
RSB	Reaktorsicherheitsbehälter, Bezeichnung für die gasdichte Umhüllung um einen Reaktor damit keine radioaktiven Stoffe unkontrolliert in die Atmosphäre und Umgebung entweichen können. Wird auch als Sicherheitsbehälter (SB) bezeichnet.
THALES2	Code System für die Analyse von Kernschmelzunfällen in Leichtwasserreaktoren.
Venturi-Nassfilter	Venturi-Nassfilter werden eingesetzt zum Stoffaustausch zwischen strömenden Gasen und Flüssigkeiten. Der nach dem Prinzip der Venturi-Düse arbeitende Nassfilter wird insbesondere zur Abscheidung von Stäuben aus Abgasen eingesetzt.
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association, Zusammenschluss europäischer Atomaufsichtsbehörden, in dem sich die beteiligten Behörden über sicherheitsrelevante Aspekte des Betriebs kerntechnischer Einrichtungen und Anlagen austauschen.