

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Gesundheitsökonomische Betrachtungen zu Radon Sanierungsmaßnahmen – Vorhaben 3609S10007

Auftragnehmer:

HelmholtzZentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt
- Institut für Gesundheitsökonomie und Management im Gesundheitswesen (IGM)
- Institut für Epidemiologie (EPI)

F. Haucke

H.-E. Wichmann

I. Brüske

J. Tschiersch

R. Leidl

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-40/11

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-201102145047

Salzgitter, Februar 2011

IGM – Institut für Gesundheitsökonomie und Management im Gesundheitswesen

(Prof. Dr. Reiner Leidl)

und

EPI – Institut für Epidemiologie

(Prof. Dr. Dr. H.-Erich Wichmann)

Forschungsvorhaben 3609S10007

„Gesundheitsökonomische Betrachtung zu Radonsanierungsmaßnahmen“

Abschlussbericht

Im Auftrag des

Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS)

Forschungsvorhaben 3609S10007

„Gesundheitsökonomische Betrachtung zu Radonsanierungsmaßnahmen“

Abschlussbericht

Autor:
Florian Haucke für das Projektteam

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Projektteam:

Prof. Dr. Reiner Leidl

Prof. Dr. Dr. H.-Erich Wichmann

Florian Haucke

Dr. Irene Brüske

Dr. Jochen Tschiersch

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	v
TABELLENVERZEICHNIS.....	vii
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	viii
ZUSAMMENFASSUNG.....	9
SUMMARY	13
1. HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSVORHABENS	17
2. METHODE	24
3. MODELLE, ZU UNTERSUCHENDE SZENARIEN UND ZU GRUNDE LIEGENDE ANNAHMEN DER RADONINTERVENTION	28
3.1 Entscheidungstheoretisches Modell zur Kosteneffektivitätsanalyse der Radonsanierung bestehender Gebäude	28
3.1.1 Grundstruktur des entscheidungstheoretischen Modells zur Analyse der Radonsanierung bestehender Gebäude	28
3.1.2 Szenario 1: universelles Radonscreening und obligatorische Sanierung belasteter Wohngebäude	31
3.1.3 Szenario 2: universelles Radonscreening und fakultative Sanierung belasteter Wohngebäude	32
3.1.4 Szenario 3: fakultatives Radonscreening und fakultative Sanierung belasteter Wohngebäude	33
3.2 Entscheidungstheoretisches Modell zur Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens	34
3.2.1 Grundstruktur des entscheidungstheoretischen Modells zur Analyse des radonsicheren Bauens.....	34
3.2.2 Szenario 4: obligatorischer Radonschutz einschließlich <i>ex-post</i> -Screening und obligatorischer Sanierung belasteter Wohngebäude	37
3.2.3 Szenario 5: obligatorischer Radonschutz ohne weitere Maßnahmen.....	37
4. ERGEBNISSE DES ARBEITSPAKET 1: AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK UND ERMITTLUNG DER VERSCHIEDENEN KOSTEN- UND EFFEKTPARAMETER FÜR DIE ANSTEHENDE GESUNDHEITSÖKONOMISCHE ANALYSE	40
4.1 Innenraumbelastung durch Radon in bestehenden deutschen Wohngebäuden und Neubauten sowie dessen räumliche Verteilung	43
4.2 Lungenkrebsinzidenz und Expositions-Wirkungs-Beziehung der Radonbelastung	48
4.3 Bestandsaufnahme der Gesundheits- bzw. Krankheitskosten bei Lungenkrebs sowie sonstiger zu berücksichtigender Kosten	53
4.4 Empirische Daten der Compliance bezüglich Radoninterventionsmaßnahmen	57

4.5 Maßnahmen und Kosten der Verringerung der Radonkonzentration in Wohngebäuden	60
4.6 Wesentliche populationsbezogene Parameter des entscheidungstheoretischen Modells.....	67
4.7 Ergebnisparameter der Kosteneffektivitätsanalyse	68
5. WEITERE GRUNDLEGENDE ANNAHMEN IM RAHMEN DER ENTSCHEIDUNGSTHEORETISCHEN MODELLIERUNG VON RADONINTERVENTIONSMAßNAHMEN.....	71
6. ERGEBNISSE DES ARBEITSPAKET 2: ENTSCHEIDUNGSTHEORETISCHE MODELLIERUNG ZUR KOSTENEFFEKTIVITÄT DER RADONINTERVENTION.....	74
6.1 Kosteneffektivität der Radonsanierung bestehender Wohngebäude	74
6.1.1 Kosteneffektivität bundeseinheitlicher Radonsanierungsstrategien.....	74
6.1.1.1 Ergebnisse der deterministischen Analyse	75
6.1.1.2 Ergebnisse der uni- und multivariaten deterministischen Sensitivitätsanalysen	79
6.1.1.3 Ergebnisse der probabilistischen Sensitivitätsanalysen	83
6.1.2 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung auf Bundeslandebene.....	89
6.1.3 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung auf Landkreisebene	93
6.1.4 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung in Hochrisikogebieten	101
6.2 Kosteneffektivität des radonsicheren Bauens	105
6.2.1 Kosteneffektivität bundeseinheitlicher Interventionsstrategien der präventiven Radonintervention	106
6.2.2 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der präventiven Radonintervention auf Bundeslandebene.....	109
6.2.3 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der präventiven Radonintervention auf Landkreisebene	112
6.2.4 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der präventiven Radonintervention in Hochrisikogebieten	116
6.3 Analyse der Determinanten der regionalen Ergebnisheterogenität.....	118
6.4 Zusammenfassender Vergleich der Kosteneffektivität von Radonsanierung bestehender Gebäude und radonsicherem Bauen.....	121
7. WESENTLICHE ANSATZPUNKTE ZUR INTERPRETATION DER ERZIELTEN MODELLERGEBNISSE	127
8. DISKUSSION DER ERGEBNISSE DES FORSCHUNGSVORHABENS UND WESENTLICHE IMPLIKATIONEN DER ANALYSE.....	132
LITERATUR	148
ANHANG.....	154

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: RADONEINTRITTS PFAD E UND BESTIMMUNGSFAKTOREN DER HÄUSLICHEN RADONKONZENTRATION	18
ABBILDUNG 2: ÜBERSICHT ÜBER DIE RADONZERFALLSKETTE UND DEREN ZEITLICHEN ABLAUF	19
ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KOSTENEFFEKTIVITÄTSANALYSE VON RADONINTERVENTIONSMAßNAHMEN	27
ABBILDUNG 4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES ENTSCHEIDUNGSTHEORETISCHEN MODELLS ZUR KEA VON RADONINTERVENTIONSMAßNAHMEN AN BESTEHENDEN GEBÄUDEN (RADONSANIERUNG)	29
ABBILDUNG 5: GRAFISCHE DARSTELLUNG DES KONZEPTS DER INKREMENTELLEN KOSTENEFFEKTIVITÄTSRELATION (INCREMENTAL COST EFFECTIVENESS RATIO; ICER)	31
ABBILDUNG 6: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES ENTSCHEIDUNGSANALYTISCHEN MODELLS ZUR KEA VON RADONINTERVENTIONSMAßNAHMEN IM RAHMEN DES RADONSICHEREN NEUBAUS (RADONPRÄVENTION)	36
ABBILDUNG 7: VEREINFACHTER ÜBERBLICK ÜBER DIE UNTERSUCHTEN SZENARIEN IM RAHMEN DER ENTSCHEIDUNGSTHEORETISCHEN MODELLIERUNG	39
ABBILDUNG 8: VERGLEICH ZWISCHEN EMPIRISCHER UND LOGNORMALER RADONVERTEILUNG (GEOMETRISCHES MITTEL: 37 Bq/m ³ ; $\Sigma=2,02$) IN DEUTSCHEN WOHN GEBÄUDEN	46
ABBILDUNG 9: DURCHSCHNITT LICHE RADONKONZENTRATION IN WOHN RÄUMEN (GEOMETRISCHE MITTELWERTE) IN DEN LANDKREISEN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND	48
ABBILDUNG 10: RELATIVES RISIKO FÜR LUNGENKREBS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER RADONKONZENTRATION IN WOHN GEBÄUDEN IN EUROPA	52
ABBILDUNG 11: DER BEITRAG DER WESENTLICHEN KOSTENTREIBER ZU DEN GESAMTKOSTEN DER LUNGENKREBSERKRANKUNG IN DEUTSCHLAND	55
ABBILDUNG 12: DER MEHRSTUFIGE PROZESS DER COMPLIANCE-MESSUNG DURCH DOYLE ET AL.	58
ABBILDUNG 13: UNIVARIATE EXTREMWERTANALYSE DER WICHTIGSTEN MODELLPARAMETER (CETERIS PARIBUS)	82
ABBILDUNG 14: COST-EFFECTIVENESS ACCEPTABILITY CURVE	88
ABBILDUNG 15: COST-EFFECTIVENESS ACCEPTABILITY FRONTIER	89
ABBILDUNG 16: ERGEBNISSE DER KEA AUF EBENE DER 16 DEUTSCHEN BUNDESLÄNDER	92
ABBILDUNG 17: REGIONALE VERTEILUNG DER KOSTENEFFEKTIVITÄT DER RADONSANIERUNG IN DEUTSCHLAND AUF LANDKREISEBENE (SZENARIO 1; EN=100 Bq/m ³)	95
ABBILDUNG 18: ERGEBNISSE DER KOSTENEFFEKTIVITÄTSANALYSE DER RADONSANIERUNG AUF LANDKREISEBENE	100

ABBILDUNG 19: DEFINIERTE RADON-HOCHRISIKOGEBIETE IN DEUTSCHLAND	102
ABBILDUNG 20: ERGEBNISSE DER KOSTENEFFEKTIVITÄTSANALYSE DES RADONSICHEREN BAUENS AUF EBENE DER 16 DEUTSCHEN BUNDESLÄNDER	110
ABBILDUNG 21: REGIONALE VERTEILUNG DER KOSTENEFFEKTIVITÄT DES RADONSICHEREN BAUENS IN DEUTSCHLAND AUF LANDKREISEBENE.....	113
ABBILDUNG 22: ERGEBNISSE DER KOSTENEFFEKTIVITÄTSANALYSE DES RADONSICHEREN BAUENS AUF LANDKREISEBENE FÜR SZENARIO 5	115
ABBILDUNG 23: VARIATION DER MODELLERGEBNISSE, DIE DER REGIONALEN HETEROGENITÄT SPEZIFISCHER PARAMETER(-GRUPPEN) ZUGERECHNET WERDEN KANN (RADONSANIERUNG: SZENARIO 1; EN = 100 BQ/M ³)	120
ABBILDUNG 24: EFFEKTIVITÄT DER RADONSANIERUNG IM RAHMEN VON SZENARIO 1 IN RELATION ZU DER GESAMTEN LUNGENKREBSINZIDENZ WÄHREND DER BEOBACHTUNGSPERIODE...	140
ABBILDUNG 25: ÜBERBLICK ÜBER DIE ABSOLUTE EFFEKTIVITÄT DER RADONSANIERUNG AUF LANDKREISEBENE (SZENARIO 1)	141
ABBILDUNG 26: ÜBERBLICK ÜBER DIE ABSOLUTE EFFEKTIVITÄT DES RADONSICHEREN BAUENS AUF LANDKREISEBENE (SZENARIO 5)	142
ABBILDUNG 27: REGIONALE VERTEILUNGEN DER KOSTENEFFEKTIVITÄT DER RADONSANIERUNG AUF EBENE DER DEUTSCHEN LANDKREISE (BESTE SCHÄTZWERTE FÜR S1–3 UND ALLE BETRACHTETEN EINGRIFFSNIVEAUS)	154

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1: BESTEHENDE OFFIZIELLE GRENZWERTE UND RICHTLINIEN ZUR HÄUSLICHEN RADONEXPOSITION IM INTERNATIONALEN VERGLEICH	21
TABELLE 2: SYNOPTISCHE ZUSAMMENFASSUNG WICHTIGER DATEN UND ANNAHMEN DER SZENARIOANALYSE FÜR GESAMTDEUTSCHLAND	41
TABELLE 3: ÜBERSICHT ÜBER DIE WICHTIGSTEN INTERVENTIONSSTRATEGIEN DER RADONSANIERUNG, DIE ENTSPRECHENDE RADONREDUKTION UND DEREN KOSTEN IN RAHMEN DER ENTSCHEIDUNGSTHEORETISCHEN MODELLIERUNG.....	66
TABELLE 4: WESENTLICHE OUTCOMEPARAMETER DER DETERMINISTISCHEN ANALYSE FÜR RADONSANIERUNGEN.....	76
TABELLE 5: ERGEBNISSE DER MULTIVARIATEN EXTREMWERTANALYSE BEZÜGLICH DER ERGEBNISPARAMETER DES ENTSCHEIDUNGSTHEORETISCHEN MODELLS FÜR DIE RADONSANIERUNG (BEOBACHTUNGSZEITRAUM: 40 JAHRE).....	80
TABELLE 6: PARAMETERVERTEILUNGEN DER PROBABILISTISCHEN SENSITIVITÄTSANALYSE	84
TABELLE 7: ERGEBNISSE DER PROBABILISTISCHEN ANALYSE VON RADONSANIERUNGSMAßNAHMEN (BESTE SCHÄTZUNG UND 95 % KI) FÜR DISKONTRATEN VON 3 % (KOSTEN) UND 1,5 % (EFFEKTE) ÜBER DEN GESAMTEN BEOBACHTUNGSZEITRAUM	85
TABELLE 8: DIE KOSTENEFFEKTIVITÄT DER RADONSANIERUNG IN AUSGEWÄHLTEN HOCHRISIKOGEBIETEN	104
TABELLE 9: ERGEBNISSE DER KOSTENEFFEKTIVITÄTSANALYSE EINER BUNDESEINHEITLICHE PRÄVENTIONSSTRATEGIE (BESTE SCHÄTZUNG UND 95 %-KONFIDENZINTERVALLE).....	106
TABELLE 10: BEISPIELE FÜR DIE KOSTENEFFEKTIVITÄT VERSCHIEDENER INTERVENTIONEN IM BEREICH UMWELTBEEINFLUSSTER GESUNDHEITSTÖRUNGEN.....	129

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

APUG	Aktionsprogramm für Umwelt und Gesundheit
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BIA	Budget-Impact-Analyse (Budget-Einfluss-Analyse)
Bq/m ³	Becquerel pro Kubikmeter (Innenraumlufte)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CEAC	Cost-effectiveness acceptability curve (Kosteneffektivitätsakzeptanzkurve)
CEAF	Cost-effectiveness acceptability frontier (Kosteneffektivitätsakzeptanzgrenze)
DKFZ	Deutsches Krebsforschungszentrum
EN	Eingriffsniveau
HRG1(2)	Hochrisikogebiet 1 (2)
ICER	Incremental cost-effectiveness ratio (inkrementelles Kosteneffektivitätsverhältnis)
IQWiG	Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen
KEA	Kosteneffektivitätsanalyse
KI	Konfidenzintervall
LE _{LK}	Statistische Lebenserwartung von Lungenkrebspatienten
LK	Lungenkrebs
LLY _{LK}	Durchschnittliche Anzahl durch Lungenkrebs verlorener Lebensjahre bei Erkrankten Personen
NB	Net Benefit (Nettonutzen)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
PPP	Purchasing power parity (Kaufkraftparität)
QALY	Quality-adjusted life-year (qualitätsadjustiertes Lebensjahr)
RR	Relatives Risiko
S1,2,3,4,5	Szenarien 1–5 im Rahmen der Kosteneffektivitätsanalyse
StBA	Statistisches Bundesamt
US _{LK}	Utility Score (krankheitsbezogener Nutzwert) für Lungenkrebspatienten
US _{NB}	Utility Score(krankheitsbezogener Nutzwert) für Normalbevölkerung
VAS	Visuelle Analogskala
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)
WTP	Willingness to pay (Zahlungsbereitschaft)

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund und Zielsetzung des Forschungsvorhabens: Radon ist ein natürlich vorkommendes radioaktives Edelgas, das sich in Innenräumen anreichern und bei Inhalation zu einer Erhöhung des Lungenkrebsrisikos führen kann. In Deutschland sterben jährlich etwa 1.900 Personen an radonbedingtem Lungenkrebs. In diesem Forschungsvorhaben wird erstmals für Deutschland eine regionalspezifisch differenzierte Kosteneffektivitätsanalyse (KEA) bezüglich baulicher Sanierungsmaßnahmen zur Minderung der Radonbelastung in bestehenden Wohnhäusern sowie Maßnahmen des radonsicheren Bauens durchgeführt.

Methode: Die KEA wird als Szenarioanalyse mittels einer entscheidungstheoretischen Modellierung durchgeführt. Dabei stellt jedes der 5 untersuchten Szenarien (**S1–5**) eine spezifische Interventionsstrategie mit unterschiedlichen regulativen Eingriffen hinsichtlich Radonscreening und -sanierung, bzw. präventiver Maßnahmen im Zuge eines Neubaus dar. **S1** umfasst ein universelles Radonscreening sowie obligatorische Interventionsmaßnahmen, deren Effektivität nachzuweisen und gegebenenfalls zu optimieren ist. In **S2** entscheiden die Betroffenen nach dem ebenfalls verpflichtenden Screening eigenverantwortlich über bauliche Sanierungen, wohingegen im Rahmen von **S3** alle Haushalte auch selbst den Kauf sowie die Durchführung und Auswertung von Radontests verantworten. **S4** beinhaltet nach Abschluss obligatorischer Präventionsmaßnahmen an Neubauten konfirmatorische Tests bezüglich der Effektivität der Intervention analog zu S1–3, einschließlich weiterer Maßnahmen bei unzureichender Verringerung der Belastung. In **S5** dagegen werden nach erfolgter Prävention keine weiteren Tests durchgeführt. Dementsprechend entfallen auch weitere Interventionsmaßnahmen an existierenden Gebäuden.

Die Berechnung der Kosteneffektivität aller Strategien erfolgt aus gesamtgesellschaftlicher Perspektive für Eingriffsniveaus (EN) von 100, 200 und 400 Bq/m³, wobei insgesamt vier regionale Ebenen analysiert werden: Deutschland als Ganzes, die 16 Bundesländer, die 439

Landkreise einschließlich 116 kreisfreier Städte sowie anhand der jeweiligen Radonbelastung definierte Hochrisikoregionen.

Ergebnisparameter der Analyse sind die Kosten je vermiedene Lungenkrebserkrankung sowie je gewonnenes (qualitätsadjustiertes) Lebensjahr (QALY). Es werden uni- und multivariate deterministische und probabilistische Sensitivitätsanalysen durchgeführt (Monte Carlo Simulationen mit 5.000 Wiederholungen). Als weiteres Element der Analyse werden zur Entscheidungsunterstützung für nationale Strategien zwei auf dem Net-Benefit-Konzept beruhende Instrumente aus dem Bereich der gesundheitsökonomischen Evaluation (Cost effectiveness acceptability curve, cost effectiveness acceptability frontier) auf die konkrete Fragestellung übertragen und für ein breites Spektrum unterschiedlicher Zahlungsbereitschaften optimale Interventionsstrategien abgeleitet. Die Programmierung des Modells erfolgt in einer Spreadsheet-Anwendung. Zur Visualisierung kleinräumiger Analysen wird unter anderem ein geografisches Informationssystem verwendet (ArcGis 9.3[®]). Modellerstellung und -validierung werden in Einklang mit (inter-)nationalen Richtlinien durchgeführt.

Ergebnisse: Die höchste Kosteneffektivität wird auf allen regionalen Ebenen bei universellem Radonscreening und obligatorischer Sanierung bestehender Wohngebäude (S1) ab einem verpflichtenden Grenzwert von 100 Bq/m³ Innenraumluft erreicht. Bei einer deutschlandweiten Umsetzung dieser optimalen Strategie können circa 9.100 Lungenkrebsfälle über den gesamten Beobachtungszeitraum von 40 Jahren verhindert werden. Das entsprechende Kosteneffektivitätsverhältnis beträgt 290.783 € (95 %-Konfidenzintervall (KI): 84.218–998.828 €) je vermiedene Lungenkrebserkrankung beziehungsweise 21.542 € (95 %-KI 6.228–77.958 €) je gewonnenes Lebensjahr und 25.181 € (95 %-KI 7.371–90.593 €) je QALY. Das Spektrum der Ergebnisse der kleinräumigen Betrachtung reicht von ca. 12.000 €/QALY bis zu mehreren Hundert Millionen €/QALY, in Abhängigkeit von der analysierten Region. Andere Interventionsstrategien, die vermehrt auf unverbindliche Richtlinien, d. h. eigenverantwortliche Maßnahmen setzen (S2, S3), weisen ein deutlich schlechteres

Kosteneffektivitätsverhältnis auf, da letztlich auch bei hohen Radonkonzentrationen überwiegend keine Interventionsmaßnahmen ergriffen werden.

Aus der Perspektive der Kosteneffektivität wird auch das radonsichere Bauen mit wenigen Ausnahmen auf allen regionalen Ebenen durch die Sanierung bestehender Gebäude mit einem Grenzwert von 100 Bq/m^3 dominiert, da sowohl geringere Kosten der Maßnahme im Einzelfall, als auch deren höhere absolute Wirksamkeit durch eine geringere durchschnittliche Effektivität je Gebäude überkompensiert werden. Werden alle Neubauten eines Jahres mit Radonschutzmaßnahmen versehen, können in Deutschland, bei einem Kosteneffektivitätsverhältnis von $64,865 \text{ €/QALY}$ (95 %-KI: $26,104\text{--}222,269 \text{ €}$), über den gesamten Beobachtungszeitraum rund 263 Lungenkrebsfälle verhindert werden. In der kleinräumigen Analyse reichen die Kosten je QALY von circa 15.000 € bis zu circa 1 Mio. € . Ab einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m^3 hingegen weisen Maßnahmen, die im Zuge eines Neubaus durchgeführt werden zunehmend bessere Ergebnisse auf als nachträgliche Sanierungen.

Kleinräumige Analysen zeigen darüber hinaus, dass neben der Radonbelastung weitere heterogen verteilte Faktoren, insbesondere die Exposition mit anderen kanzerogenen Noxen und die Bevölkerungs- und Baustruktur wesentliche Determinanten der regionalen Variabilität der Kosteneffektivität darstellen. Es kann demzufolge nicht unmittelbar von dem Radonvorkommen in einer Region auf die Kosteneffektivität baulicher Maßnahmen geschlossen werden. Mithilfe einer optimal regional differenzierten Strategie, die solche Faktoren berücksichtigt, kann die Lungenkrebsinzidenz beispielsweise um ein Drittel der vermeidbaren radonbedingten Erkrankungen reduziert werden, wobei die Kosten um circa 15 % niedriger liegen, als bei einer Interventionsstrategie, die einzig an der Radonbelastung orientiert ist.

Interpretation der Ergebnisse: Die obigen Angaben zur Kosteneffektivität können von Entscheidungsträgern – also der Politik oder von ihr beauftragten Institutionen – zur Beurteilung der wirtschaftlichen Auswirkungen von Entscheidungen herangezogen werden. Werden beispielsweise Maßnahmen bis zu 100.000 €/QALY von diesen akzeptiert, so wäre unter anderem die deutschlandweit verpflichtende Sanierungsstrategie ab 100 Bq/m^3 als wirtschaftlich

anzusehen. Unter Berücksichtigung der Unsicherheit gilt dies jedoch nicht für die weniger restriktiven Strategien sowie die Neubausanierung. Dabei ist zu beachten, dass in derartige Entscheidungen neben der Kosteneffektivität immer auch andere Aspekte einfließen.

In der deutschen Umwelt- und Gesundheitspolitik existieren bislang keine allgemein akzeptierten Grenzwerte bezüglich der Zahlungsbereitschaft für einen spezifischen Gesundheitszuwachs. Angesichts internationaler Erfahrungen weist jedoch insbesondere das universelle Screening bestehender Wohngebäude mit anschließender Sanierung ab einem Grenzwert von 100 Bq/m^3 , in vielen regionalen Kontexten ein Kosteneffektivitätsverhältnis auf, das anhand gängiger Kriterien als akzeptabel bezeichnet werden kann.

Obgleich alle anderen Strategien in jedem regionalen Kontext dominiert werden, zeigen die Ergebnisse der regionalspezifischen Analyse, dass in einzelnen Untersuchungszusammenhängen auch andere Interventionsstrategien ein akzeptables Kosteneffektivitätsverhältnis aufweisen können. Ebenso kann auch das radonsichere Bauen unter bestimmten Voraussetzungen den Anforderungen an ökonomisch vertretbare Interventionen gerecht werden. Entsprechende Maßnahmen erscheinen beispielsweise dann sinnvoll, wenn der Fokus des Entscheidungsträgers auf der Effektivität der Intervention liegt oder strikte Regulierungen mit niedrigen Grenzwerten nicht erwünscht oder durchsetzbar sind.

Schlussfolgerungen: Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird eine Methode aufgezeigt, anhand derer der Entscheidungsträger, entsprechend seiner maximalen Zahlungsbereitschaft für den Interventionseffekt sowie der Präferenz bezüglich des Umfangs regulativer Einflussnahme unter der Nebenbedingung beschränkter Ressourcen, eine individuell optimale, regional differenzierte Strategie zur Verringerung der Radonkonzentration in Wohngebäuden definieren kann. Restriktionen der Untersuchung sind vor allem in der mangelnden regionalen Spezifität bestimmter Modellparameter begründet. Im Modell wurden jedoch stets konservative Schätzwerte berücksichtigt, um mögliche positive Verzerrungen zu minimieren und alle Unsicherheiten in umfangreichen Sensitivitätsanalysen berücksichtigt.

SUMMARY

Background and aim: Radon is a naturally occurring inert radioactive gas found in soils and rocks which can migrate from the ground through leakages in the building structure and accumulate in dwellings. Almost 1,900 deaths each year may be caused by radon-induced lung cancer in Germany. This research project aims to analyze the cost-effectiveness of different intervention strategies for reduction of radon concentrations in existing German dwellings as well the cost-effectiveness of preventive radon intervention, i.e. radon-proof construction, both at different regional levels.

Method: The cost-effectiveness analysis (CEA) of radon intervention is conducted as a scenario analysis, where each scenario of the 5 scenarios (**S1–5**) represents a specific regulatory regime, regarding radon screening/remediation and radon proof construction, respectively, to reduce exposure levels in the German population.

Within **S1**, all households have to test and take appropriate mitigating actions if their readings are above the predefined action level (AL). If the obligatory confirmatory test shows that radon readings are still above AL, further remedial actions have to be taken. In **S2** radon levels have to be disclosed for every building without exceptions as well. If test results are above AL, however, it is the households' own responsibility to decide whether to take mitigating actions which do not have to be confirmed *ex post*. **S3** is the strategy with the least restrictive regulations, as every household can decide whether to test for radon contamination and take actions. Within **S4**, the effectiveness of radon protection measures in new buildings has to be determined with a confirmatory test after building completion. Given an *ex post* contamination level that exceeds the respective action level further measures of mitigation are mandatory until indoor radon levels are reduced to less than the AL. **S5**, on the other hand, does not include further radon screening in new buildings. Hence, additional remedial measures will not be undertaken.

A societal perspective is adopted to calculate costs, effects and incremental cost effectiveness ratios (ICER) for action levels of 100, 200 and 400 Bq/m³ in every scenario. Every outcome parameter was calculated for Germany as a whole, at the level of the 16 German federal states as well as the 439 rural districts, including 116 rural municipalities, representing the smallest regional unit for which exposure data could be obtained.

Furthermore, cost-effectiveness was analysed in two specified radon prone high-risk areas, defined by different threshold values. Cost-effectiveness was measured in costs per averted case of lung cancer, costs per life-year gained and costs per quality-adjusted life-year (QALY) gained. To validate the results, univariate and multivariate deterministic and probabilistic sensitivity analyses (SA) were performed. Probabilistic SA were based on Monte Carlo simulations with 5,000 model runs. To overcome the problems of standard cost-effectiveness decision rules also two relatively recent approaches in health economic evaluation (cost-effectiveness acceptability curve (CEAC), cost-effectiveness acceptability frontier (CEAF)) were transferred to the specific research question to quantify the uncertainty that surrounds the results and arrive at optimal strategies for a broad spectrum of willingness to pay values for environmental health gains. The model was programmed on the basis of a spreadsheet application. Model construction and validation was conducted in accordance with accepted national and international guidelines. The results of the small area analyses are visualized with a geographic information system (ArcGIS 9.3[®]), based on vector data with respect to the administrative units under consideration.

Results: Model results show that the highest incremental cost-effectiveness compared with the *status quo* can be reached by a universal screening programme and mandatory mitigation of all dwellings with radon readings exceeding 100 Bq/m³. Within a uniform national Strategy about 9,100 lung cancer cases could be averted over the 40-year period under consideration. Thereby, cost effectiveness is 290,783 € (95 % CI: 84,218–998,828 €) per averted lung cancer case, 21,542 € (95 % CI: 6,228–77,958 €) per life year gained and 25,181 € (95 % CI: 7,371–90,593 €) per QALY gained. However, detailed small area analy-

ses revealed that, even within the optimal strategy, costs per quality-adjusted life year gained can vary between about 12,000 € and several hundreds of millions of €, depending on the regional context. Other intervention strategies focussing primarily on the personal responsibility for screening and/or mitigating actions have a much lower impact on lung cancer incidence. Furthermore, ICERs are considerably lower as mitigation is often neglected even with radon levels that fairly exceed the recommended AL. From an economic point of view, mandatory screening and remediation after construction completion in combination with an action level of 100 Bq/m³ also clearly outperforms radon-proof construction within almost every spatial unit under consideration. Through radon-proof construction, the number of radon-related lung cancer cases can be reduced by about 263.5 cases over the whole period of consideration. Thereby, cost-effectiveness compared with the base case scenario is 64,865 € (95 % CI 26,104–222,269 €) per quality adjusted life year gained. Smaller area analyses reveal that, in certain regions, costs/QALY can be as low as about 15,000 €, whereas they amount to nearly 1.0 million € in others. However, when higher action levels for remedial measures are considered (200 and 400 Bq/m³) radon-proof construction clearly becomes more cost-effective than radon mitigation in existing buildings.

The spatially differentiated analyses also show that the level of contamination is not, by itself, able to explain all the variation regarding the cost-effectiveness of radon intervention that was found between the specific areas under consideration at every regional level. In addition, cost-effectiveness is significantly influenced by further factors that are also heterogeneously distributed on the regional scale but have been almost completely neglected within policy planning, particularly the exposure to carcinogenic substances other than radon which, among other things, determines the base risk for lung cancer as well as varying population and building structures. Within a strategy that takes into account these factors radon-induced lung cancer incidence can be reduced by one third, for example, whereby costs are about 15 % lower, compared to a strategy that is oriented towards contamination levels only.

Interpretation of results: Policy makers or institutions commissioned by policy makers can use the above given data to assess the economic consequences of their decisions with respect to radon intervention strategies. If willingness to pay exceeds 100,000 €/QALY, for example, the mandatory screening and remediation scenario would have to be considered cost-effective, contrary to radon-proof construction, at least if the uncertainties that surround the results are taken into account. It has to be considered, however, that other aspects can also be part of the decision making process.

In Germany, there are no threshold values pertaining to the willingness to pay for additional health. However, given international thresholds and environmental regulations already in practice, Scenario 1, in particular, can be called quite cost-effective. Even though S1 is clearly a dominant strategy it should be noticed that under certain circumstances other scenarios, in particular enforcing radon-proof construction may be the method of choice and also justifiable in terms of cost-effectiveness (for example, if the focus of the decision is on intervention effectiveness or a strict regulation is not (politically) viable).

Conclusions: Within this research project a method is shown that enables the decision maker to choose an optimal, regionally differentiated individual strategy to reduce indoor radon exposure, according to the maximum willingness to pay for intervention effects as well as individual preferences regarding the level of regulatory control, subject to the constraints of limited resources. However, some of the data used in the model had to be taken from other countries, as information for the German context was not always available. To account for the resulting uncertainty very conservative estimates were used where appropriate to minimize positive biases and detailed sensitivity analyses were applied to reveal any uncertainties.

1. HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSVORHABENS

Radon (Rn) ist ein natürliches, im Erdreich, in Gesteinen, in Gewässern und in der Luft vorkommendes geruchs- und geschmackloses radioaktives Edelgas. Das bedeutendste Radonisotop ist Radon-222 mit einer Halbwertszeit von 3,82 Tagen¹. Radon-222 ist ein Produkt der Uran-238-Zerfallsreihe und entsteht über Thorium-232 und Radium-226. Da Uran in unterschiedlichen Konzentrationen fast allgegenwärtig in der Erdkruste vorhanden ist, ist auch Radon praktisch überall im Boden zu finden.

Radon, beziehungsweise dessen Zerfallsprodukte, machen in Deutschland, ähnlich wie in den meisten anderen europäischen Staaten, etwa 50 % der mittleren natürlichen Strahlenexposition aus² [1]. Abhängig von geologischen und geophysikalischen Bedingungen wie Radongehalt und Permeabilität (=Durchlässigkeit) des Untergrunds, der saisonal variierenden, von der Durchfeuchtung des Bodens abhängigen Emanationsrate³ sowie der baulichen Beschaffenheit, vor allem hinsichtlich der Abdichtung des Gebäudes und des Druckgradienten zwischen Untergrund und Innenräumen, kann das Edelgas, das selbst keine chemischen Verbindungen eingeht und daher besonders mobil ist, über Undichtigkeiten im erdberührten Bereich in das Gebäudeinnere diffundieren und sich dort anreichern (vgl. Abbildung 1). Die Höhe der Exposition wird in diesem Zusammenhang zumeist in Becquerel je Kubikmeter der Innenraumluft (Bq/m³) angegeben⁴. Dabei gilt es zu beachten, dass die individuelle Radonbelastung im Einzelfall nur über langfristige individuelle Messungen valide bestimmt werden kann.

¹ Die Halbwertszeit bezeichnet in der Kernphysik die jeweilige Zeitspanne, in der sich die Menge des radioaktiven Elements halbiert, d.h. sich in andere Atome umgewandelt hat.

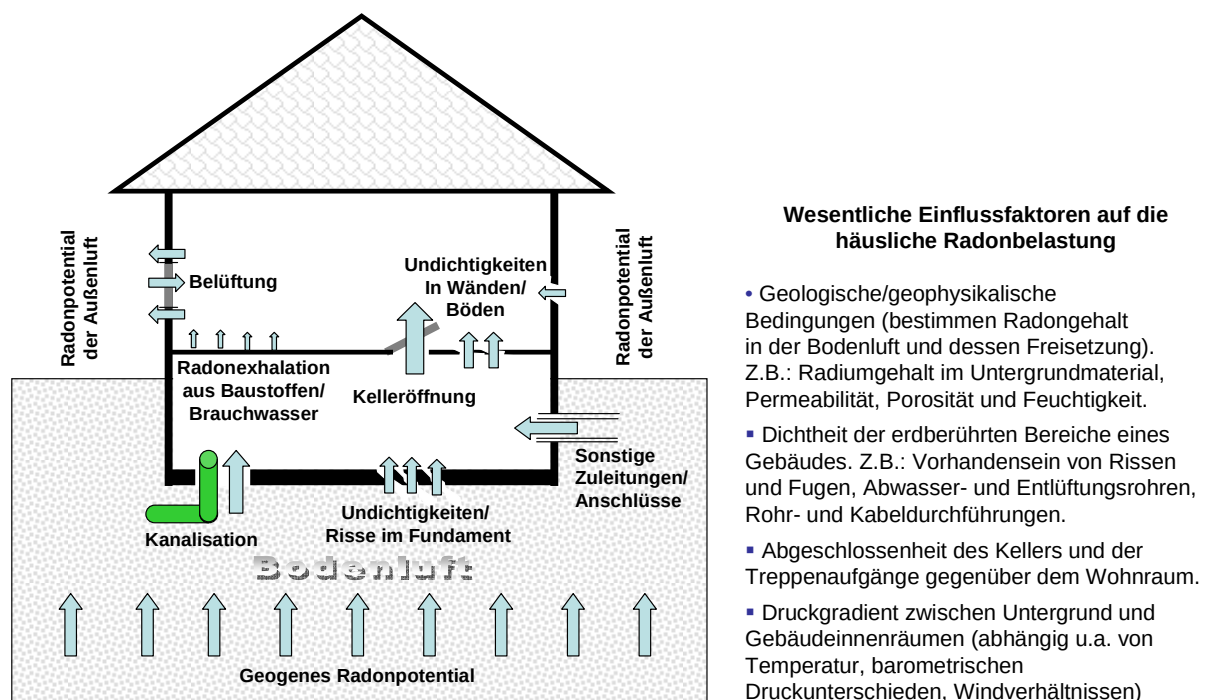
² Strahlenexposition bezeichnet die Einwirkung von ionisierender Strahlung auf Lebewesen. Neben der Umgebungsstrahlung aus der Erde, der Luft und der Wohnumgebung ist der menschliche Organismus kosmischer Strahlung aus dem Weltraum ausgesetzt und verfügt darüber hinaus auch über eine gewisse Körpereigenstrahlung [1].

³ Emanation bezeichnet die Materialfreisetzung in nicht fester oder flüssiger Form aus (zumeist) festen Ausgangsverbindungen.

⁴ In Becquerel (Bq) wird die Anzahl der Atome gemessen, die in einer Sekunde zerfallen.

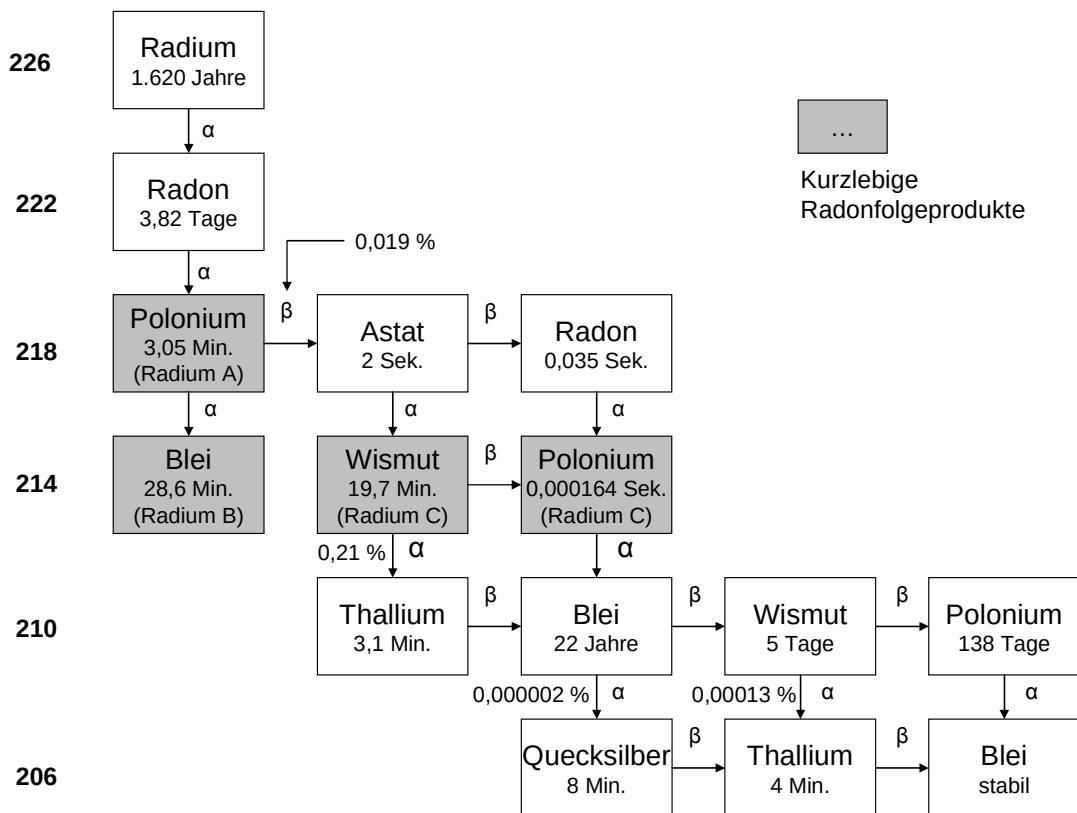
Schließlich zerfällt Radon-222 über weitere Radionuklide zu stabilem Blei, wobei eine Reihe radioaktiver Isotope entstehen – z. B. die Elemente Polonium, Blei und Wismut – die sich an Aerosolpartikel in der Raumluft anlagern und per Inhalation in den Atemtrakt gelangen können. Dort kommt es durch weitere Zerfallsprozesse zu einer Bestrahlung der Lungenzellen, insbesondere mit α -Strahlen, welche aufgrund ihrer großen Schadwirkung auf kleinem Raum die DNA erheblich schädigen können und zu einem erhöhten Lungenkrebsrisiko führen⁵ (vgl. Abbildung 2 für eine schematische Darstellung der Radonzerfallskette).

Abbildung 1: Radoneintrittspfade und Bestimmungsfaktoren der häuslichen Radonkonzentration



Quelle: eigene Darstellung

⁵ Hinweise einzelner Studien auf eine Beziehung zwischen Radonexposition und anderen Erkrankungen (vgl. z. B.: [2]) konnten bislang nicht mit ausreichender statistischer Validität bestätigt werden [3].

Abbildung 2: Übersicht über die Radonzerfallskette und deren zeitlichen Ablauf**Massenzahl**

Quelle: eigene Darstellung nach NRC (1999)

In Deutschland sterben jährlich ca. 1.900 Personen an radonbedingtem Lungenkrebs [3]. Der Schadstoff ist damit die zweithäufigste Ursache dieser Erkrankung nach dem aktiven Tabakkonsum und verursacht nach aktuellem Forschungsstand somit mehr Todesfälle als etwa Asbest, Benzol, Dioxine, Cadmium, Arsen, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Formaldehyd- oder Feinstaubexposition [4] (vgl. hierzu auch [5] für entsprechende Angaben aus der Schweiz, wo von einer ähnlichen Problematik ausgegangen werden kann).

Es existiert jedoch eine Reihe von Sanierungsmaßnahmen, die – beispielsweise durch eine Änderung der Permeabilität der Bausubstanz oder des Luftaustauschs – die Radonkonzentration in Wohnräumen erheblich verringern können. Trotz gesicherter epidemiologischer Evidenz wurden in Deutschland, anders als in den meisten anderen europäischen Ländern [6], bislang jedoch weder gesetzlich verankerte Grenzwerte noch entsprechende Richtlinien zur

häuslichen Radonbelastung verabschiedet. So haben innerhalb der europäischen Union 9 Staaten verbindliche Radongrenzwerte definiert (Finnland, Frankreich, Großbritannien, Lettland, Litauen, Polen, Schweden, Slowakei, Tschechien). Lediglich in Italien, Niederlande, Portugal und Spanien wurden weder Grenz- noch Richtwerte erlassen. Die entsprechenden Zielwerte, die in Wohnräumen nicht überschritten werden dürfen, betragen in den meisten Ländern 200 Bq/m^3 beziehungsweise 400 Bq/m^3 (600 Bq/m^3 in der Slowakei und Lettland, 500 Bq/m^3 in Ungarn), wobei die Anforderungen an Neubauten meist höher sind als an bestehende Gebäude. Auch im ehemaligen Jugoslawien sowie in Norwegen und Russland existieren Grenzwerte in dieser Größenordnung. In der Schweiz sind Interventionen ab 1.000 Bq/m^3 verpflichtend vorgeschrieben. Australien und Kanada weisen Richtwerte von 200 beziehungsweise 800 Bq/m^3 auf, die USA empfehlen Maßnahmen ab 150 Bq/m^3 . In Tabelle 1 sind bestehende Grenzwerte und Richtlinien von 27 Ländern in einer Übersicht zusammengefasst⁶.

Seitens des Bundesamts für Strahlenschutz wird für Deutschland ein Zielwert von max. 100 Bq/m^3 vorgeschlagen. Die WHO empfiehlt in ihrem 2009 veröffentlichten Radonhandbuch auf Grund der jüngsten wissenschaftlichen Daten ebenfalls einen Referenzwert von 100 Bq/m^3 . Dieser Referenzwert ist bei der Planung von Neubauten zu berücksichtigen und sollte auch bei Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden angestrebt werden.

⁶ Tabelle 1 wurde auf Basis der Untersuchung von Akerblom [6] erstellt und soweit als möglich aktualisiert. Für einige Länder konnten jedoch keine darüber hinaus gehenden aktuellen Angaben ermittelt werden.

Tabelle 1: Bestehende offizielle Grenzwerte und Richtlinien zur häuslichen Radonexposition im internationalen Vergleich

Grenzwerte (in Bq/m ³)		Richtwerte (in Bq/m ³)	
Bestehende Gebäude	Neubauten	Bestehende Gebäude	Neubauten
Schweiz (1.000)	Schweiz (1.000)	Kanada (800)	Kanada (800)
Lettland (600)	Lettland (300)	Österreich (400, 1000) ¹	Ungarn (600)
Slowakei (500)	Slowakei (250)	Ungarn (600)	Schweiz (400)
Litauen (400)	Finnland (200)	Schweiz (400)	Dänemark (200)
Polen (400)	Frankreich (200)	Belgien (400)	Estland (200)
Schweden (400)	Großbritannien (200)	Estland (400)	Griechenland (200)
Weißrussland (400)	Litauen (200)	Finnland (400)	Irland (200)
Tschechien (400)	Polen (200)	Frankreich (400)	Österreich (200)
Russland (200, 400) ²	Schweden (200)	Griechenland (400)	Slowenien (200)
	Tschechien (200)	Slowenien (400)	Australien (200)
	Norwegen (200)	Lettland (300)	Israel (200)
	Russland (200)	Dänemark (200, 400) ¹	Syrien (200)
	Weißrussland (200)	Norwegen (200, 400) ¹	Luxemburg (150)
		Großbritannien (200)	USA (150)
		Ehem. Jugoslawien (200)	Deutschland (100 ³)
		Weißrussland (200)	
		Australien (200)	
		Israel (200)	
		Syrien (200)	
		Luxemburg (150)	
		USA (150)	
		Deutschland (100 ³)	

¹ Einfache beziehungsweise komplexe Maßnahmen empfohlen² einfache beziehungsweise komplexe Maßnahmen verpflichtend³ Vorschlag durch das Bundesamt für Strahlenschutz

Quelle: erweiterte Darstellung nach Akerblom (1999)

Ziel des Vorhabens 3609S10007 – Gesundheitsökonomische Betrachtung zu Radonsanierungsmaßnahmen – ist es, anhand einer entscheidungstheoretischen Modellierung, erstmals für Deutschland, die Effekte verschiedener Interventionsstrategien zur Minderung der Radonbelastung in bestehenden Wohnhäusern zu analysieren und deren Wirtschaftlichkeit anhand einer modellbasierten Kosteneffektivitätsanalyse zu berechnen. Dabei wird untersucht, welche Auswirkungen von verbindlichen Grenzwerten sowie Richtlinien und Empfehlungen

ausgehen, die in unterschiedlicher Form bereits mehrfach diskutiert, bislang jedoch nicht endgültig umgesetzt wurden.

Darüber hinaus soll auch die Kosteneffektivität präventiver Radonschutzmaßnahmen im Zuge des radonsicheren Bauens neuer Wohngebäude untersucht und den Ergebnissen der *ex-post* Radonsanierung gegenübergestellt werden, um somit die Grundlage für evidenzbasierte Entscheidungen hinsichtlich verbindlicher Grenzwerte und/oder allgemeiner Richtlinien zur Minderung der Innenraumbelastung in Deutschland zu schaffen.

Ein zentraler Bestandteil des Vorhabens ist in diesem Zusammenhang die detaillierte Analyse der Kosteneffektivität von Radonsanierung und Radonprävention auf verschiedenen räumlichen Ebenen, mit dem Ziel, optimal regional differenzierte Strategien zu identifizieren.

Die weiteren Inhalte dieses Forschungsberichts gliedern sich dabei wie folgt: in Kapitel 2 wird zunächst die grundsätzliche Methodik der Studie zur Berechnung der Kosteneffektivität der Radonsanierung beziehungsweise des radonsicheren Bauens erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der betrachteten entscheidungstheoretischen Modelle sowie der mithilfe dieser Modelle analysierten Szenarien (S1–5) und den zu Grunde gelegten Annahmen findet sich in Kapitel 3. Anschließend werden die Ergebnisse aus Arbeitspaket 1 berichtet (Kapitel 4), welche vor allem auch die Eingabeparameter für die angestrebte Kosteneffektivitätsanalyse im Rahmen der entscheidungstheoretischen Analysen darstellen. Kapitel 5 beschreibt darüber hinaus gehende zentrale Annahmen, die den spezifischen Modellberechnungen in den jeweils betrachteten (regionalen) Kontexten zu Grunde liegen und für die Kosteneffektivitätsanalyse (KEA) von Radoninterventionsmaßnahmen zwingend erforderlich sind. Eine ausführliche Ergebnisdarstellung von Arbeitspaket 2 hinsichtlich der Kosteneffektivität der Sanierung bestehender Wohngebäude sowie des radonsicheren Bauens auf den verschiedenen untersuchten regionalen Ebenen wird in Kapitel 6 vorgenommen. Der Bericht schließt mit einer Diskussion der zentralen Parameter und Erkenntnisse aus der Modellanalyse, insbesondere möglichen Interpretationen der erzielten Ergebnisse (Kapitel 7) sowie den daraus resultierenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Implementierung von Interventions-

maßnahmen zur Senkung der Radonbelastung in deutschen Wohngebäuden aus Sicht des Entscheidungsträgers (Kapitel 8).

2. METHODE

Die Kosteneffektivitätsanalyse der Radonsanierung von Wohngebäuden in Deutschland wird auf Basis eines entscheidungstheoretischen Modells durchgeführt. Entscheidungstheoretische Modelle repräsentieren ein breites Spektrum analytischer Werkzeuge, die in der gesundheitsökonomischen Evaluation zunehmend an Bedeutung gewinnen und in diesem Bereich bereits vielfach für unterschiedliche Fragestellungen zur Anwendung kamen. Sie dienen dazu, Systeme in der realen Welt zu verstehen, verschiedene Ergebnisparameter (Outcome) anhand definierter Eingabeparameter (Input) aus einer Vielzahl unterschiedlicher Quellen zu schätzen und die Auswirkungen spezifischer Veränderungen auf das gesamte System zu modellieren, um somit eine möglichst zielkonforme Auswahl einer oder mehrerer Strategien aus einer gegebenen Menge an analysierten Handlungsalternativen treffen zu können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden in diesem Zusammenhang verschiedene regulatorische Regimes bezüglich der Umsetzung von Richtlinien und/oder verbindlichen gesetzlichen Regelungen zur Verringerung der Innenraumradonbelastung in Kombination mit unterschiedlich restriktiven Eingriffsniveaus ($EN=100, 200$ und 400 Bq/m^3 Innenraumluft), die eine Reduktion der Radonbelastung erforderlich machen, mithilfe einer entscheidungstheoretischen Modellierung untersucht und insbesondere deren Kosteneffektivität detailliert analysiert.

Die Programmierung und Berechnung des Modells erfolgt dabei in einer Spreadsheet-Anwendung (MS-Excel®). Modellerstellung und -validierung werden in Einklang mit nationalen und internationalen Guidelines, insbesondere den Empfehlungen des Instituts für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen (IQWiG [7]) und den Richtlinien von Philips et al. [8] durchgeführt. Der Aufbau des Modells orientiert sich an existierenden internationalen Studien bezüglich spezifischer Maßnahmen der Radonintervention an Wohngebäuden, unter Berücksichtigung der offiziellen Empfehlungen zu Radonscreening und -sanierung des Bun-

desamts für Strahlenschutz sowie weiterer anerkannter internationaler Institutionen (vgl. z. B. [9]). Alle Kostenkomponenten der Analyse werden aus gesamtgesellschaftlicher Perspektive berechnet. Der im Modell betrachtete Zeitraum umfasst die gesamte Lebensdauer der untersuchten Interventionen. Aufgrund der Länge der Beobachtungsperiode werden Kosten und Effekte der Radonintervention gemäß aktuellen Empfehlungen angemessen diskontiert, d. h. auf das Basisjahr der Analyse bezogen.

Um eine möglichst differenzierte Betrachtung möglicher Interventionsstrategien und deren Umsetzung zu ermöglichen, werden alle Modellberechnungen auf verschiedenen regionalen Ebenen für eine Vielzahl von Untersuchungseinheiten durchgeführt: auf der nationalen Ebene im Sinne einer bundeseinheitlichen Umsetzung der jeweiligen Strategie für ganz Deutschland, auf Bundesland- und Landkreisebene sowie für unterschiedlich definierte Hochrisikogebiete, die durch überdurchschnittlich hohe Innenraumbelastungen gekennzeichnet sind. Alle kleinräumigen regionalspezifischen Auswertungen werden mithilfe eines geografischen Informationssystems (ArcGIS 9.3[®]) erzeugt, basierend auf Vektordaten der Verwaltungseinheiten der Bundesrepublik Deutschland.

Zur Validierung der Ergebnisse der Modellierungen werden sowohl univariate, als auch multivariate, deterministische sowie probabilistische Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Probabilistische Sensitivitätsanalysen beruhen dabei im Rahmen des Modells auf Monte-Carlo-Simulationen mit 5.000 Wiederholungen, wobei für jeden mit Unsicherheit behafteten Parameter der Analyse statistische Verteilungen spezifiziert werden. 95 %-Konfidenzintervalle (KI) für die Kosteneffektivität der einzelnen Szenarien und Eingriffsniveaus sowie weitere Outcomeparameter der Modellierung werden über die Verteilungen, d. h. die Werte der 2,5- und 97,5-Perzentile, der entsprechenden Simulationsergebnisse geschätzt.

Als weiteres Element der Analyse werden zur Entscheidungsunterstützung zwei kürzlich entwickelte Instrumente aus dem Bereich der gesundheitsökonomischen Evaluation – cost effectiveness acceptability curve und cost effectiveness acceptability frontier – auf die konkrete Fragestellung übertragen und somit für ein breites Spektrum unterschiedlicher hypothetischer Zahlungsbereitschaften des Entscheidungsträgers optimale nationale Strategien ab-

geleitet. Die cost effectiveness acceptability curve (CEAC) bildet dabei, in Abhängigkeit von der maximalen Zahlungsbereitschaft für eine spezifische Gesundheitsverbesserung (z. B. ein zusätzliches qualitätsadjustiertes Lebensjahr (QALY)), für jede Handlungsalternative die Wahrscheinlichkeit ab, die kosteneffektive Strategie zu sein. Das Prinzip der CEAC beruht dabei auf dem Net-Benefit-Ansatz⁷ (vgl. 6.1.1.3), wobei die klassische ICER-Formel (vg. 3.1.1 sowie Abbildung 5) in eine lineare Gleichung umformuliert und mit dem Konzept der Zahlungsbereitschaft für einen definierten Zuwachs an Gesundheit verknüpft wird. Diese Methode wird im Rahmen der cost effectiveness acceptability frontier (CEAF) um einen wesentlichen Aspekt erweitert. Die CEAF legt der Identifikation der optimalen Strategie, neben der Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Intervention den untersuchten Handlungsalternativen überlegen zu sein, auch den Erwartungswert der Net-Benefits eines jeden Simulationsergebnisses zu Grunde.

In Abbildung 3 ist ein generisches Schema zur Berechnung der Kosteneffektivität der Radonintervention nach Kennedy und Gray [10] dargestellt, welches in der überwiegenden Zahl der aktuellen KEA bezüglich der Radonsanierung beziehungsweise des radonsicheren Bauens zur Anwendung kommt (vgl. z.B.: [10-14]) und auch die Grundlage der vorliegenden Untersuchung bildet. Die Nettokosten der jeweils analysierten Interventionsstrategie ergeben sich dabei aus

- den Kosten für das Radonscreening der Wohngebäude (Anschaffung, Durchführung und Auswertung von Radontests zur Bestimmung der individuellen Kontamination im Wohngebäude)
- zuzüglich der Aufwendungen für die Sanierung von Gebäuden, deren Belastung über dem jeweils betrachteten Eingriffsniveau liegt, beziehungsweise die radonsichere Konstruktion von Neubauten
- abzüglich der durch verhinderte Lungenkrebsfälle verminderten Krankheitskosten, die aus der Behandlung der Erkrankung und etwaigen Produktions-

⁷ Net Benefit oder Nettonutzen bezeichnet die Differenz des in Geldeinheiten ausgedrückten Nutzens der mit einer Maßnahme/Intervention verbunden ist und den diesbezüglichen Kosten.

ausfällen aufgrund krankheitsbedingter Arbeitsunfähigkeit oder vorzeitigem Tod resultieren

Der Interventionseffekt in Form verminderter Lungenkrebserkrankungen, gewonnener Lebensjahre oder gewonnener qualitätsadjustierter Lebensjahre lässt sich als Produkt aus der Expositionssenkung durch bauliche Maßnahmen und eines spezifischen Risikomaßes darstellen, welches den zu Grunde liegenden Zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankung (Expositions-Wirkungs-Funktion) beschreibt.

Für das Modell zur Kosteneffektivität der Radonsanierung an bestehenden Gebäuden wird das beschriebene Basisschema um Daten zur Compliance⁸ hinsichtlich Testkauf und -durchführung beziehungsweise Sanierung ergänzt. Darüber hinaus werden in der Untersuchung auch Annahmen zu Sensitivität und Spezifität der Screening-Maßnahmen explizit berücksichtigt.

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Kosteneffektivitätsanalyse von Radoninterventionsmaßnahmen

Nettokosten	=	Screeningkosten + Sanierungskosten – vermiedene Kosten des LK (diskontiert)
Netto-Outcome	=	Reduktion der Exposition * Risikomaß * Zeithorizont * diskontierte Ø Anzahl vermiedener LK-Fälle (gewonnener Lebensjahre/ gewonnener QALYs je LK-Fall)
Kosteneffektivität	=	Kosten je vermiedenen LK/ gewonnenes Lebensjahr/ QALY

QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr; LK = Lungenkrebs

Quelle: eigene Darstellung nach Kennedy und Gray (2001)

⁸ Unter Compliance wird in diesem Zusammenhang die Bereitschaft verstanden, ohne Zwang, d. h. rechtliche Verpflichtung, Maßnahmen zur Reduktion der Radonkonzentration durchzuführen. Die Compliance wurde bislang nur unzureichend in internationalen Studien zur Kosteneffektivitätsanalyse berücksichtigt und erlangt in dieser Untersuchung insbesondere für die Szenarien 2 und 3 erhebliche Bedeutung.

3. MODELLE, ZU UNTERSUCHENDE SZENARIEN UND ZU GRUNDE LIEGENDE ANNAHMEN DER RADONINTERVENTION

Im Folgenden wird die Basisstruktur der betrachteten entscheidungstheoretischen Modelle zur Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung bestehender Wohngebäude (Szenario 1–3), beziehungsweise des radonsicheren Neubaus (Szenario 4 und 5) beschrieben. Ferner werden die fünf mithilfe der Modellierung im Rahmen der KEA untersuchten Szenarien und die der Modellierung in jedem Szenario zu Grunde liegenden Annahmen detailliert erläutert.

3.1 Entscheidungstheoretisches Modell zur Kosteneffektivitätsanalyse der Radonsanierung bestehender Gebäude

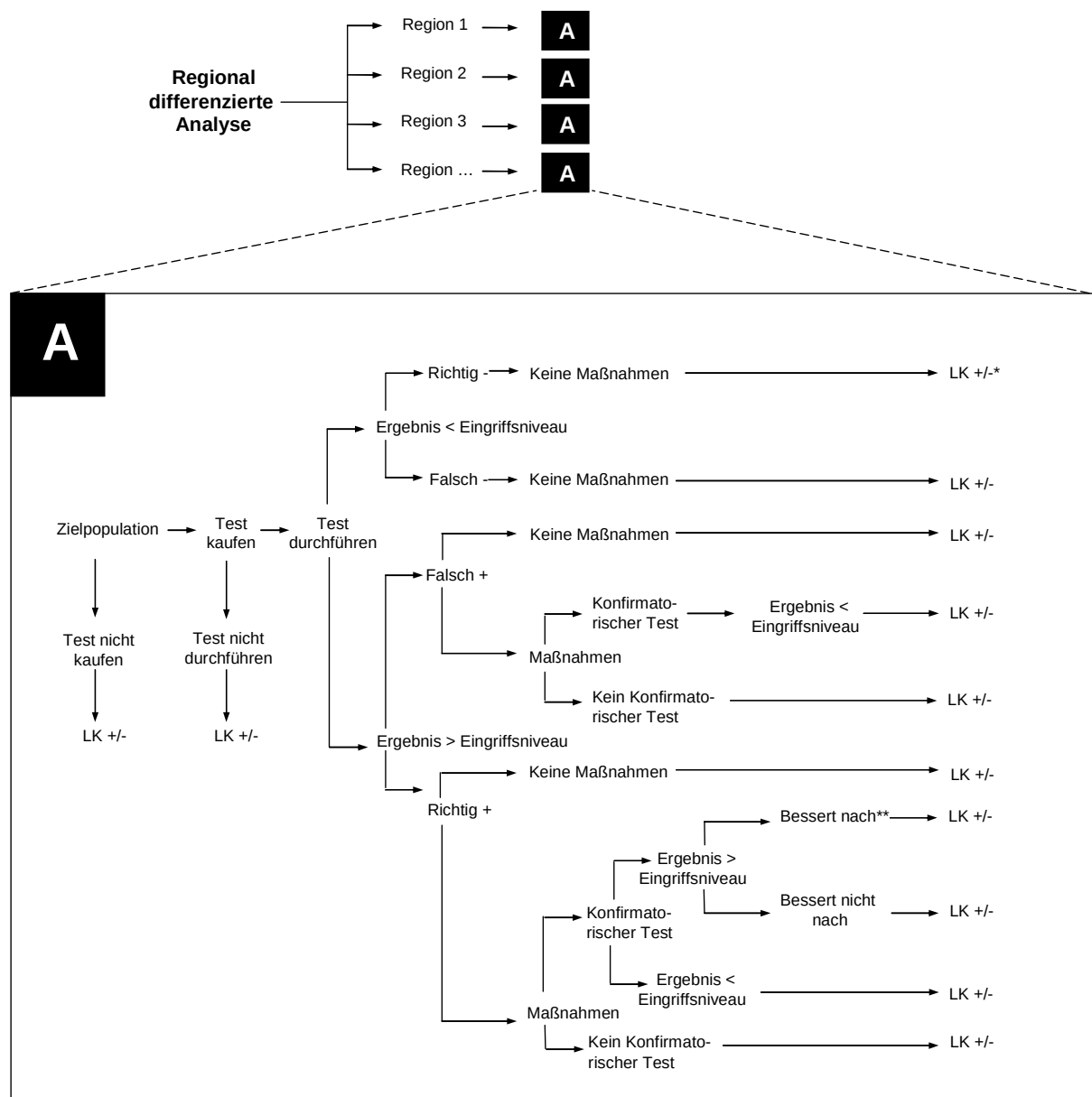
Das entscheidungstheoretische Modell zur Analyse von Radoninterventionsmaßnahmen an bestehenden Wohngebäuden in Deutschland stellt das Basismodell der vorliegenden Untersuchung dar, welches für weitere Auswertungen, insbesondere die Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens entsprechend angepasst beziehungsweise erweitert wird. Im Folgenden werden zunächst die Grundstruktur der Modellierung sowie die anhand des Modells analysierten Szenarien (S1–3) detailliert beschrieben.

3.1.1 Grundstruktur des entscheidungstheoretischen Modells zur Analyse der Radonsanierung bestehender Gebäude

Abbildung 4 verdeutlicht den Aufbau des entscheidungstheoretischen Modells, welches sich an offiziellen Empfehlungen internationaler Institutionen zu Radonscreening und -sanierung bestehender Wohngebäude orientiert (vgl. [9, 15]). Das Modell findet für jede betrachtete

Untersuchungseinheit auf allen räumlichen Ebenen mit jeweils regionalspezifischen Inputparametern Anwendung.

Abbildung 4: Schematische Darstellung des entscheidungstheoretischen Modells zur KEA von Radoninterventionsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden (Radonsanierung)



* LK+/- bezeichnet die (nicht) an Lungenkrebs erkrankten Individuen.

** Es wird angenommen, dass die individuelle Radonbelastung nach einer Nachbesserung des ersten Sanierungsvorhabens dem durchschnittlichen Niveau aller sanierten Gebäude entspricht.

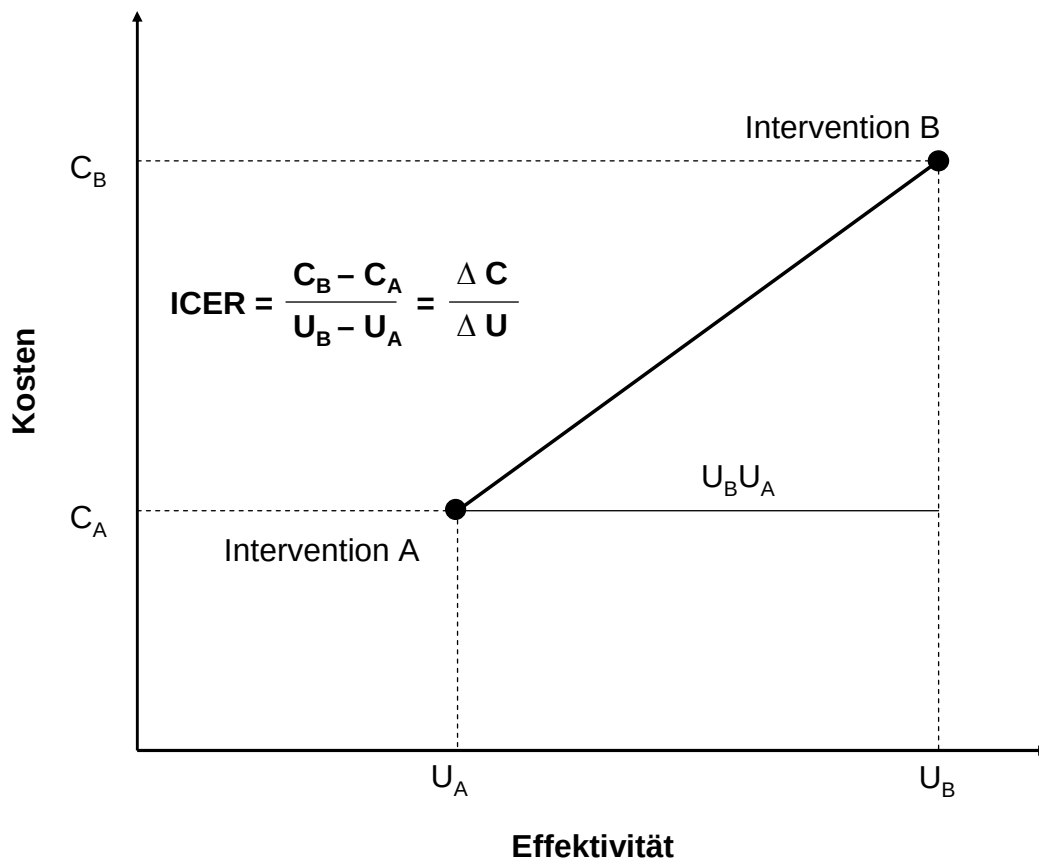
Hinweis: Die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten an den Entscheidungs- und Endknoten des Modells werden in der Grafik nicht dargestellt, da diese in Abhängigkeit von dem betrachteten Szenario sowie der betrachteten Region erheblich variieren. Für eine detaillierte Erläuterung siehe Text.

Quelle: eigene Darstellung

Im Rahmen der Kosteneffektivitätsanalyse der Radonsanierung bestehender Gebäude in Deutschland werden insgesamt drei Szenarien, die jeweils unterschiedliche regulative Eingriffe beinhalten, mithilfe des in Abbildung 4 dargestellten Modells untersucht und deren inkrementelles Kosteneffektivitätsverhältnis (incremental cost-effectiveness ratio: ICER) in Relation zum Base Case berechnet. Der Base Case bildet dabei die Referenzsituation ab, d. h. es existieren keinerlei Grenzwerte und/oder Richtlinien bezüglich der Radonbelastung in Wohnräumen und Radonverteilung sowie die radonbedingte Lungenkrebsinzidenz entsprechen der aktuellen Situation in Deutschland.

Den Ausgangspunkt der inkrementellen Kosteneffektivitätsanalyse im Rahmen der Evaluation von gesundheitsrelevanten Interventionen bildet das ökonomische Konzept der Grenzkosten und Grenzerträge. Der ICER berechnet sich dabei im Rahmen einer Marginalanalyse als Quotient aus den zusätzlichen Kosten, die durch eine Intervention verursacht werden und den damit verbundenen zusätzlichen Erträgen. Letztere entsprechen in diesem Fall dem interventionsbedingten Zusatznutzen in Form eines Gesundheitsgewinns, d. h. vermiedener Lungenkrebserkrankungen, gewonnener Lebensjahre oder gewonnener qualitätsadjustierter Lebensjahre (vgl. Abbildung 5 für eine grafische Darstellung; der ICER kann in der Grafik unmittelbar aus der Steigung zwischen Punkt A und Punkt B ermittelt werden). Für eine detaillierte Beschreibung der zu Grunde liegenden theoretischen Konzepte vgl. auch [16].

Abbildung 5: Grafische Darstellung des Konzepts der inkrementellen Kosteneffektivitätsrelation (incremental cost effectiveness ratio; ICER)



C_A = Kosten der Intervention A; C_B = Kosten der Intervention B;
U_A = Nutzen der Intervention A; U_B = Nutzen der Intervention B

Hinweis: der ICER der Intervention B in Relation zu Intervention A berechnet sich als Quotient aus zusätzlichen Kosten (C) und zusätzlichem Nutzen (Effekt der Intervention U). In der grafischen Darstellung entspricht dies der Steigung zwischen den Punkten A und B.

Quelle: Darstellung modifiziert nach Drummond (2005)

3.1.2 Szenario 1: universelles Radonscreening und obligatorische Sanierung belasteter Wohngebäude

Szenario 1 (S1) orientiert sich an einem Gesetzesentwurf, der 2005 durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) vorgelegt wurde, jedoch auf große Ablehnung einzelner Bundesländer stieß und mit dem Regierungswechsel 2005 automatisch verfallen ist [17] (ein neuer oder gleich lautender Entwurf wurde seitdem nicht mehr vorgelegt). Das so genannte Radonschutzgesetz sah für Wohnräume einen verbindli-

chen Zielwert von 100 Bq/m³ Innenraumluft vor, der im Falle einer bestehenden höheren Belastung durch entsprechende bauliche Sanierungsmaßnahmen erreicht werden sollte.

Szenario 1 ist jedoch in seiner grundsätzlichen Ausgestaltung etwas restriktiver, als die geplante Gesetzesvorlage, welche kein universelles Radonscreening in allen Regionen und diverse weitere Ausnahmeregelungen beinhaltet. Einige dieser restriktiven Annahmen werden jedoch im weiteren Verlauf der Analyse gelockert.

In S1 sind alle Haushalte mit potentiell erhöhter Radonkonzentration verpflichtend zu testen und angemessene Maßnahmen zu ergreifen, um die Exposition bis unter ein zuvor definiertes Eingriffsniveau zu verringern. Die Wirkung der ersten Maßnahme muss auch verpflichtend durch konfirmatorische Tests *ex post* ermittelt werden, um die Effektivität der Intervention beurteilen zu können. Bei unzureichender Senkung der Radonbelastung – d. h. das jeweilige ursprüngliche Eingriffsniveau wird auch nach der ersten Sanierungsmaßnahme noch überschritten – sind im Rahmen von Nachbesserungen weitere Eingriffe vorzunehmen, so dass der Zielwert erreicht wird.

3.1.3 Szenario 2: universelles Radonscreening und fakultative Sanierung belasteter Wohngebäude

Das zweite Interventionsszenario (S2) orientiert sich an einer 2003 im Auftrag der Bauministerkonferenz⁹ geplanten Radon-Richtlinie, die ähnlich dem Radonschutzgesetz (siehe 3.1.2) aufgrund fehlender Zustimmung auf der Ebene der Bundesländer bislang nicht umgesetzt wurde. Darüber hinaus weist es gewisse Parallelen zu den seit 2008 gültigen Regelungen zum Energieausweis in Deutschland auf. Diese sind in im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEv) festgeschrieben und verpflichten die Eigentümer eines Wohngebäudes, den

⁹ Die Bauministerkonferenz entscheidet über Fragen zum Wohnungswesen, Städtebau und Baurecht sowie zur Bautechnik, die von länderübergreifender Bedeutung sind. Sie formuliert Länderinteressen gegenüber dem Bund und gibt Stellungnahmen auch gegenüber anderen Körperschaften und Organisationen ab. Siehe auch <http://www.is-argebau.de>.

spezifischen Energieverbrauch beziehungsweise -bedarf eines Hauses bei Errichtung, Änderung oder Erweiterung der Gebäudestruktur zu ermitteln und explizit auszuweisen.

S2 ist allerdings restriktiver als der bestehende Entwurf bezüglich einer möglichen Radonrichtlinie und die Regelungen zur Energieeinsparverordnung. So ist zunächst für alle Wohngebäude verpflichtend die Radonbelastung auszuweisen. Bei Überschreiten des zuvor definierten Eingriffsniveaus entscheiden die Betroffenen nach entsprechenden Informationen hinsichtlich des Gesundheitsrisikos der individuellen Radonexposition eigenverantwortlich über bauliche Sanierungsmaßnahmen. Ein Nachweis über die Wirkung der Sanierung im Sinne eines konfirmatorischen Tests muss nicht erbracht werden. Dementsprechend sind auch Nachbesserungen bei etwaigen Unzulänglichkeiten bezüglich des Radonschutzes im Rahmen einer ersten Intervention lediglich fakultativ durchzuführen.

3.1.4 Szenario 3: fakultatives Radonscreening und fakultative Sanierung belasteter Wohngebäude

Szenario 3 (S3) entspricht der Interventionsstrategie mit den wenigsten regulativen Eingriffen und stellt die von den Gegnern des Radonschutzgesetzes und der Radonrichtlinie favorisierte Vorgehensweise dar.

Alle Haushalte bestimmen selbst über Kauf, Durchführung und Auswertung von Radontests sowie die Sanierung übermäßig belasteter Wohngebäude. Es werden lediglich Empfehlungen für ein Eingriffsniveau, verbunden mit Informationen bezüglich gesundheitlicher Risiken und möglicher Interventionsstrategien gegeben. Bei Überschreiten dieser empfohlenen Höchstgrenzen können Sanierungsmaßnahmen ergriffen werden. Ein Nachweis über das Ergebnis im Sinne eines konfirmatorischen Tests der Schadstoffkonzentration nach erfolgter erster Sanierung ist jedoch nicht zu erbringen. Das Screening der Gebäude, Radoninterventionsmaßnahmen sowie etwaige Nachbesserungen sind somit fakultativ.

Für alle betrachteten Szenarien im Rahmen der Radonsanierung bestehender Wohngebäude (S1–S3) werden Engriffsniveaus von 100, 200 und 400 Bq/m³ Innenraumluft Berücksich-

tigt. Diese Werte orientieren sich an den Empfehlungen internationaler Institutionen beziehungsweise deren Umsetzung in nationalen Grenzwerten und Richtlinien (vgl. Tabelle 1). Es werden dementsprechend insgesamt 9 verschiedene Interventionsstrategien in Zusammenhang mit baulichen Maßnahmen an existierenden Gebäuden detailliert analysiert.

3.2 Entscheidungstheoretisches Modell zur Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens

Das entscheidungstheoretische Modell zur Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Neubaus stellt eine Erweiterung des Basismodells bezüglich der Sanierung bestehender Wohngebäude (vgl. Abbildung 4) dar. Im Folgenden werden die erweiterte Modellstruktur sowie die anhand des Modells analysierten Szenarien und die damit verbundenen Annahmen detailliert beschrieben.

3.2.1 Grundstruktur des entscheidungstheoretischen Modells zur Analyse des radonsicheren Bauens

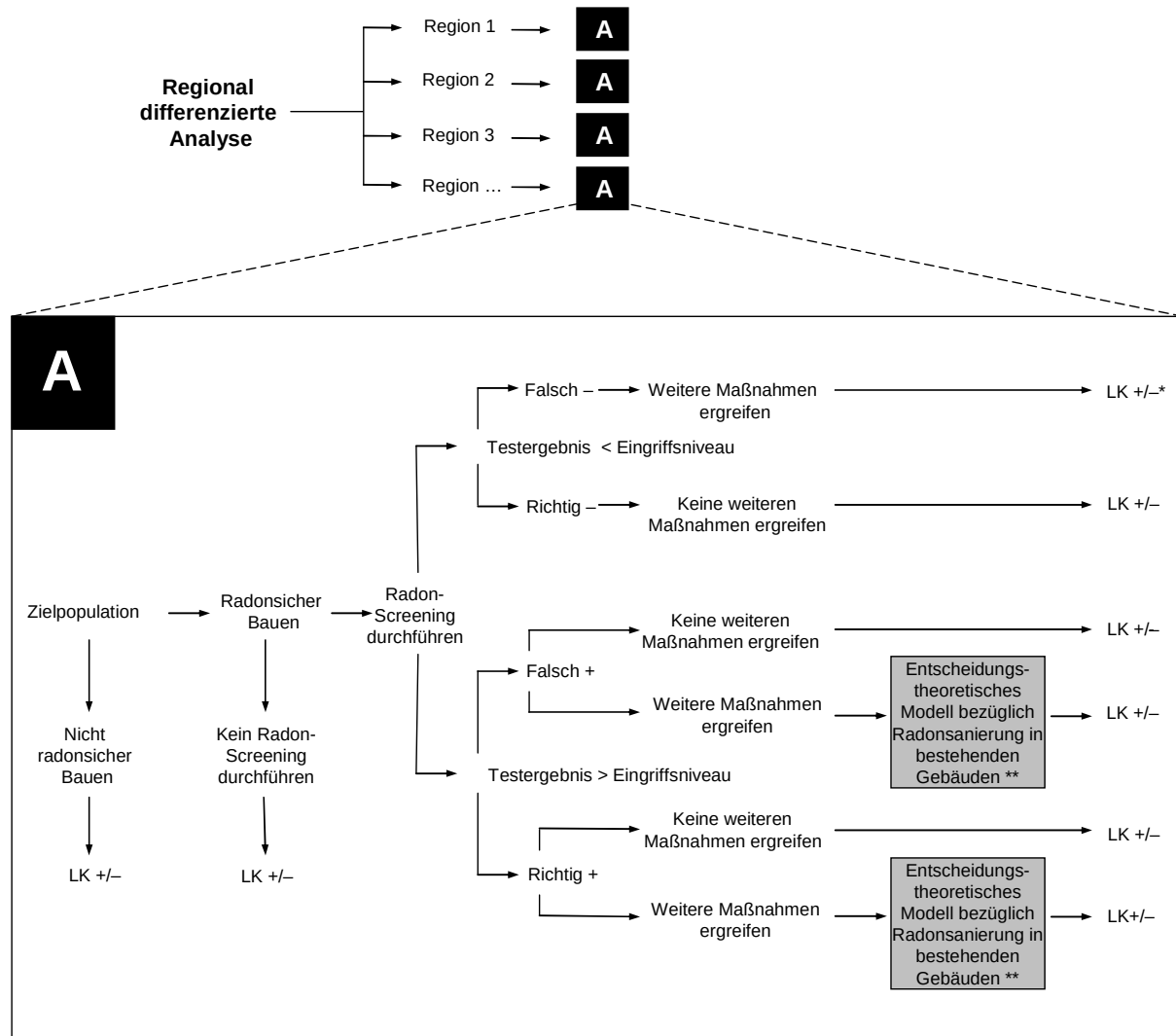
Abbildung 6 zeigt die Grundstruktur des entscheidungstheoretischen Modells zur Analyse des radonsicheren Bauens. Für die Kosteneffektivitätsanalyse präventiver Radonschutzmaßnahmen wird das Basismodell, welches im Rahmen der Sanierung bestehender Gebäude Anwendung findet, entsprechend angepasst und erweitert.

Dabei wird grundsätzlich angenommen, dass alle neu erbauten Wohngebäude im jeweils betrachteten regionalen Kontext obligatorisch mit Radonschutzmaßnahmen zu versehen sind. Da annahmegemäß die individuelle Radonkonzentration eines Gebäudes nicht *ex ante*, d. h. vor Baufertigstellung bestimmt werden kann, wird zunächst davon ausgegangen, dass eine von der Belastung abhängige Ausstattung von Neubauten mit geeigneten Radonschutzmaßnahmen nicht möglich ist (diese Annahme wird im weiteren Verlauf des Berichts allerdings wieder etwas relativiert). Das heißt, im Gegensatz zu den Szenarien 1–3, werden

nicht nur diejenigen Werte, die über dem jeweiligen Eingriffsniveau liegen durch die Intervention reduziert, sondern alle.

Des Weiteren werden insbesondere zwei Szenarien (S4 und S5) hinsichtlich spezifischer regulatorischer Bestimmungen nach erfolgter Radonprävention im Zuge eines Neubaus differenziert betrachtet und deren inkrementelle Kosteneffektivität in Bezug auf den Base Case, d. h. die Referenzsituation in Deutschland, berechnet (Base Case: es existieren keine Grenzwerte und/oder Richtlinien bezüglich der Radonbelastung in Wohnräumen und die regionale Radonverteilung, beziehungsweise die radonbedingte Lungenkrebsinzidenz, werden gemäß der aktuellen Situation in Deutschland im Modell berücksichtigt).

Abbildung 6: Schematische Darstellung des entscheidungsanalytischen Modells zur KEA von Radoninterventionsmaßnahmen im Rahmen des radonsicheren Neubaus (Radonprävention)



* LK+/- bezeichnet die (nicht) an Lungenkrebs erkrankten Individuen

** Aus Platzgründen zeigt die Grafik nicht das vollständige Modell; die Effekte weiterer Sanierungsbemühungen nach Fertigstellung eines spezifischen Gebäudes werden entsprechend den Interventionen an bestehenden Gebäuden modelliert (vgl. Abbildung 4).

Hinweis: Wahrscheinlichkeiten an den Entscheidungs- und Endknoten werden in der Grafik nicht dargestellt, da diese in Abhängigkeit von dem betrachteten Szenario und insbesondere auch der betrachteten Region erheblich variieren. Für eine detaillierte Beschreibung siehe Text.

Quelle: eigene Darstellung

3.2.2 Szenario 4: obligatorischer Radonschutz einschließlich *ex-post*-Screening und obligatorischer Sanierung belasteter Wohngebäude

Da *a priori* keine validen Aussagen zur individuellen Belastung sowie der Effektivität der präventiven Radonintervention – d. h. des radonsicheren Neubaus – möglich sind, ist die exakte Radonkonzentration im Rahmen von Szenario 4 (S4) nach Abschluss der obligatorischen Interventionsmaßnahmen an Neubauten und Fertigstellung eines spezifischen Bauvorhabens durch einen konfirmatorischen Test zu ermitteln. Dieser ist analog zu Szenario 1–3 durchzuführen. Im Falle einer unzureichenden Verringerung der Belastung sind weitere Sanierungsbemühungen an dem bestehenden Gebäude obligatorisch. Dabei ist eine individuelle Belastung anzustreben, die einen zuvor definierten Grenzwert nicht mehr übersteigt. Als Grenzwerte werden wiederum maximale Konzentrationen von 100, 200 und 400 Bq/m³ Innenraumluft betrachtet.

Alle etwaigen weiteren Maßnahmen nach Baufertigstellung werden dabei ebenso analog zu Szenario 1 (universelles Radonscreening und obligatorische Sanierung) der Kosteneffektivitätsanalyse existierender Wohnhäuser modelliert (aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Abbildung 6 nur diejenigen Bestandteile des Modells explizit dargestellt, die sich ausschließlich auf die KEA des radonsicheren Neubaus beziehen (für eine detaillierte Beschreibung vgl. Abschnitt 3.1.1 beziehungsweise Abbildung 4). Die erforderlichen Modellparameter werden ebenfalls der Analyse der Radonsanierung entnommen und gehen entsprechend in die Berechnungen ein.

3.2.3 Szenario 5: obligatorischer Radonschutz ohne weitere Maßnahmen

Auch im Rahmen von Szenario 5 (S5) werden analog zu Szenario 4 alle Neubauten in der jeweils untersuchten Region obligatorisch mit Radonschutzmaßnahmen ausgestattet. Allerdings werden, anders als in S4, nach erfolgter Radonprävention im Zuge des Neubaus keine konfirmatorischen Tests bezüglich der Wirksamkeit der Intervention, d. h. der Verringerung der Radonkonzentration nach Baufertigstellung, durchgeführt. Es erfolgen dementsprechend

ebenso keine Interventionsmaßnahmen an existierenden Gebäuden, in Form weiterer Sanierungsaktivitäten.

Da auch die *a-priori*-Belastung auf individueller Ebene – d. h. die zu erwartende Radonkonzentration nach Abschluss eines spezifischen Bauvorhabens ohne individuelle Radon-schutzmaßnahmen – nicht bestimmt werden kann und demgemäß die Intervention unabhängig von der spezifischen Belastung ist, sind etwaige Eingriffsniveaus für S5 nicht von belang und werden dementsprechend in der Kosteneffektivitätsanalyse in diesem Szenario auch nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens werden insgesamt 4 Strategien untersucht (S4 mit Eingriffsniveaus von 100, 200 und 400 Bq/m³ sowie S5 ohne Differenzierung nach verschiedenen EN), so dass mithilfe der entscheidungstheoretischen Modellierung im Ganzen 13 unterschiedliche Strategien differenziert werden können.

Alle untersuchten Szenarien sind in Abbildung 7 nochmals in einer vereinfachten Übersicht dargestellt, welche die wesentlichen Schritte möglicher Interventionsaktivitäten beinhaltet (Screening, Intervention, konfirmatorische Radontests, weiterführende Maßnahmen).

Abbildung 7: Vereinfachter Überblick über die untersuchten Szenarien im Rahmen der entscheidungstheoretischen Modellierung

Region ...								
Region 3								
Region 2								
Region 1								
Szenario Maßnahme	Screening		Intervention ab (100/200/400 Bq/m ³)		Konfirmato- rischer Test		Weitere Maßnahmen ab (100/200/400 Bq/m ³)	
	Obligatorisch	Optional	Obligatorisch	Optional	Obligatorisch	Optional	Obligatorisch	Optional
S1	X		X		X		X	
S2	X			X		X		X
S3		X		X		X		X
S4	-*	-*	X		X		X	
S5	-*	-*	X			X		X

* in den Szenarien 4 und 5 wird die Option eines initialen Screenings nicht berücksichtigt, da die individuelle Belastung *a priori* annahmegemäß nicht valide bestimmt werden kann

Quelle: eigene Darstellung

4. ERGEBNISSE DES ARBEITSPAKET 1: AUFARBEITUNG DES RELEVANTEN STANDES VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK UND ERMITTLUNG DER VERSCHIEDENEN KOSTEN- UND EFFEKTPARAMETER FÜR DIE ANSTEHENDE GESUNDHEITSÖKONOMISCHE ANALYSE

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 wurden zunächst die Grundlagen für die entscheidungstheoretische Modellierung der Kosteneffektivität der Radonsanierung sowie des radonsicheren Bauens erarbeitet und die zentralen Parameter für die Kosteneffektivitätsanalyse erhoben.

Dies sind insbesondere:

- Die Verteilung der Innenraum-Radonexpositionen in Deutschland auf verschiedenen regionalen Ebenen: für Deutschland als Ganzes, die 16 deutschen Bundesländer, die 439 deutschen Landkreise einschließlich 116 kreisfreier Städte sowie zwei unterschiedlich definierte Hochrisikogebiete mit überdurchschnittlichen Innenraumbelastungen
- Die Lungenkrebsinzidenz in den verschiedenen untersuchten räumlichen Einheiten und die spezifische Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen Radonexposition und dieser Erkrankung
- Die verfügbaren Maßnahmen der Radonsanierung an bestehenden Gebäuden und des radonsicheren Bauens sowie deren Kosten und dadurch erzielbaren Effekte auf die häusliche Strahlenbelastung
- Die durch Lungenkrebserkrankungen entstehenden direkten und indirekten Kosten in Deutschland
- Annahmen zur Compliance bezüglich der im Modell analysierten Radoninterventionsmaßnahmen, d. h. der Bereitschaft der betroffenen Population sich entsprechend der analysierten regulatorischen Vorgaben zu verhalten

- Weitere für das Modell relevante Parameter und zentrale zu Grunde gelegte Annahmen, die im Zuge der entscheidungstheoretischen Modellierung für die Berechnung der inkrementellen Kosteneffektivität der Radonintervention zwingend erforderlich sind

Eine synoptische Zusammenfassung der wesentlichen Parameter für die gesamtdeutsche Analyse findet sich in Tabelle 2. Darüber hinaus gehende wesentliche Details der (regionalen) Differenzierung sowie weitergehender spezifischer Analysen sind jeweils dem Text zu entnehmen.

Tabelle 2: Synoptische Zusammenfassung wichtiger Daten und Annahmen der Szenarioanalyse für Gesamtdeutschland

Parameter	Ausprägung (Basisschätzung)*	Variation**	Quelle(n)
Radonbelastung			
Radonverteilung	GM=37 Bq/m ³ ($\sigma=2,02$)	± 10 %	Menzler et al. (2006)
Lungenkrebs			
Lungenkrebsinzidenz	~50 Fälle/100.000 Personen	–	DKFZ (2009)
Relatives LK-Risiko je Bq/m ³ (ohne Schwellenwert)	1,16	1,05–1,31	Darby et al. (2004)
Verlorene Lebensjahre (YLL) je Lungenkrebsfall	13,51	± 30 %	Kennedy et al. (1999)
Utility Score für Lungenkrebs nach EuroQol 5D	0,58	0,5–0,6	Trippoli et al. (2001)
Ø Latenzzeit bis zum Auftreten des LK	17,78 Jahre	± 30 %	Darby et al. (1998)
Ø Restlebenserwartung	2 Jahre	± 30 %	Kennedy et al. (2002)
Jährliche Kosten des LK in Deutschland (gesamt)	4,79 Mrd. €	± 30 %	Weißflog et al. (2001)
Radonmessung und -intervention			
Kosten eines Radontests (je Einzelmessung)	32 €	–	BfS (2007)
Güte des Tests (Abweichung Messergebnis von tatsächlicher Belastung)	0%	± 20 %	Ford et al. (1997) BfS (2008)
Ø Kosten der Sanierung eines durchschnittli- chen Gebäudes (abhängig von Radonkon- zentration)	500–5000 €	± 30 %	APUG (2005) BMU (2005)

Ø Zusätzliche Kosten bei Nachbesserung nach erfolgter Sanierung	30% der ersten Maßnahme	± 30 %	Stigum et al (2003)
Zusätzliche Kosten des radonsicheren Bauens (für ein Ø Gebäude)	700 €	± 30 %	APUG (2005) BMU (2005)
Ø Wirkung der 1. Maßnahme (Verminderung der Rn-Belastung)	80%	75%–90 %	Coskeran (2006)
Ø Wirkung der Nachbesserung	Reduktion auf Ø < EN	div.	Stigum et al (2003)
Zeit bis Sanierung abgeschlossen	2 Jahre	–	Stigum et al (2003)
Wirkungsdauer der Maßnahme	40 Jahre	–	Stigum et al (2003)
Compliance (nur relevant für Sanierung bestehender Gebäude)			
Anteil Personen, die freiwillig einen Test kaufen	6.05 %	± 30 %	Doyle et al. (1991)
Anteil Personen, die freiwillig einen Test durchführen	55.80 %	± 30 %	Doyle et al. (1991)
Anteil Personen, die freiwillig sanieren	Ø 4,55 % (abh. von Rn-Belastung)	± 30 %	Doyle et al. (1991)
Anteil Personen, die konfirmatorischen Test durchführen	Ø 34,4 % (abh. von Rn-Belastung)	± 30 %	Doyle et al. (1991)
Anteil Personen, die nachzubessern, wenn 2. Testergebnis > EN	Ø 30 % (abh. von Rn-Belastung)	± 30 %	Coskeran et al. (2006)
Populationsbezogene Parameter			
Population gesamt	82.315.000	–	StBa (2008)
Population Neubauten	668.077/ Jahr	–	StBa (2008)
Baubestand (Wohngebäude)	17.742.413	–	StBa (2008)
Bauaktivität (Wohngebäude)	186.121/ Jahr	–	StBa (2008)
Ø Gesundheitszustand (VAS)	0,774	± 10 %	König et al. (2005)
Ø Anzahl HH/Gebäude	2,20	–	StBa (2008)
Ø Belegungsquote (Personen/Haushalt)	2,07	–	StBa (2008)
Diskontierung	Kosten: 3 % Effekte: 1,5 %	0 %; 5 %	Russel et al. (1996) Weinstein et al. (1996)

StBa = Statistisches Bundesamt, DKFZ = Deutsches Krebsforschungszentrum; BfS = Bundesamt für Strahlenschutz;
HH = Haushalte, VAS = visuelle Analogskala
Ø = durchschnittlich, ~ = circa, EN = Eingreifniveau

* für detaillierte Angaben zu regionalen Parameterverteilungen sowie den weiter spezifizierten Analysen zu Grunde gelegten Verteilungen der Inputparameter siehe Text

** für detaillierte Angaben zu Parametervariationen siehe Text

Quelle: eigene Darstellung

4.1 Innenraumbelastung durch Radon in bestehenden deutschen Wohngebäuden und Neubauten sowie dessen räumliche Verteilung

Für Deutschland wurde eine Reihe systematischer Messkampagnen zur Bestimmung der Radonkonzentration im Untergrund durchgeführt, unter Beachtung der jeweiligen geologischen und geophysikalischen Bedingungen. Dazu wurde an mehr als 4.000 repräsentativen Standorten, mittels so genannter Bodenluftmessungen in circa einem Meter Tiefe, die Radonkonzentration bestimmt. Gemäß der Messergebnisse weisen etwa 0,03 % der untersuchten Gesamtfläche eine sehr hohe ($>500 \text{ kBq/m}^3$)¹⁰, 7,86 % eine erhöhte ($100\text{--}500 \text{ kBq/m}^3$), 67,3 % eine mittlere ($10\text{--}100 \text{ kBq/m}^3$) und circa 25 % eine vergleichsweise niedrige ($<10 \text{ kBq/m}^3$) Radonkonzentration auf. Die Gesamtheit aller Messergebnisse ist in etwa durch eine logarithmische Normalverteilung mit einem Median von 36 kBq/m^3 Bodenluft definiert.

Es zeigte sich, dass die Radonbelastung in großem Maße durch die Beschaffenheit des Erdreichs bestimmt wird. Hohe Messwerte treten beispielsweise bei granitischem oder vulkanischem Untergrund auf [18].

Die Radonkonzentration in Innenräumen ist neben dem natürlichen Vorkommen des Edelgases im Boden und dessen spezifischen Eigenschaften jedoch auch in erheblichem Maße durch Bauausführung und Bausubstanz der darauf errichteten Gebäude im Einzelfall beeinflusst (vgl. Abbildung 1). Da auch der Bauuntergrund kleinräumig stark variieren kann, beispielsweise aufgrund des Vorhandenseins radonsperrender, d. h. für das Gas undurchlässiger Schichten unter dem Gebäude (z. B. Lehmschichten), lässt letzten Endes ausschließlich ein individueller Test valide Aussagen zur Radonbelastung zu. Dementsprechend muss jedes Wohnhaus separat betrachtet werden. Auch unmittelbar aneinander angrenzende Gebäude können durchaus sehr unterschiedliche Schadstoffkonzentrationen aufweisen. Daher lassen sich aus einem spezifischen Messwert auch keinerlei Rückschlüsse auf die zu erwartenden Radonkonzentrationen in Nachbarhäusern ziehen [19, 20].

¹⁰ 1 Kilobecquerel (kBq) = 1.000 Bq

Zur Bestimmung der individuellen Belastung werden verschiedene Messtypen unterschieden. Kurzzeitmessungen erfolgen über wenige Tage bis Wochen mittels Aktivkohleverfahren, Kernspurverfahren oder aktiver Radon-Messgeräte und lassen im Allgemeinen nur sehr ungenaue Annahmen zur durchschnittlichen Radonbelastung zu (ist das Messergebnis beispielsweise kleiner als $\frac{1}{4}$ des jeweils betrachteten Eingriffsniveaus, so wird dieses auch über einen längeren Zeitraum im Normalfall mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschritten).

Zur validen Bewertung einer Immobilie hinsichtlich der Radonexposition der Bewohner sind jedoch Bewertungsmessungen in unterschiedlich frequentierten Räumen über einen längeren Zeitraum (in der Regel mindestens drei Monate, besser ein Jahr) notwendig, wobei meist Kernspur- oder Elektretverfahren beziehungsweise kontinuierlich messende Geräte zum Einsatz kommen, um auch den zeitlichen Verlauf der Radonkonzentration korrekt zu ermitteln [20] und z. B. kurzfristige oder saisonale Schwankungen bei der Expositionsbestimmung angemessen berücksichtigen zu können. Dabei sind die Geräte nach Möglichkeit frei in der Raummitte, in etwa 1 bis 2 m Höhe über dem Fußboden und mit einem Mindestabstand von 30 cm zu Wänden, Decke und Fußboden zu platzieren.

Systematische und konsistente Radon-Messkampagnen zur Bestimmung der Innenraumkonzentration in Wohngebäuden, mit dem Ziel, die räumliche Verteilung der Radonbelastung für ganz Deutschland valide zu bestimmen, wurden bislang jedoch nicht durchgeführt. Deswegen ungeachtet steht inzwischen eine Vielzahl einzelner Messwerte zur Verfügung, wobei unterschiedliche Fragestellungen der jeweiligen Untersuchung zum Zeitpunkt der Messung (z. B. Kurz- vs. Langzeitmessung), unterschiedliche Messpunktdichten sowie variierende Messzeiträume (z. B. unterschiedliche Jahreszeiten) zu einem insgesamt sehr heterogenen Datenbestand führten.

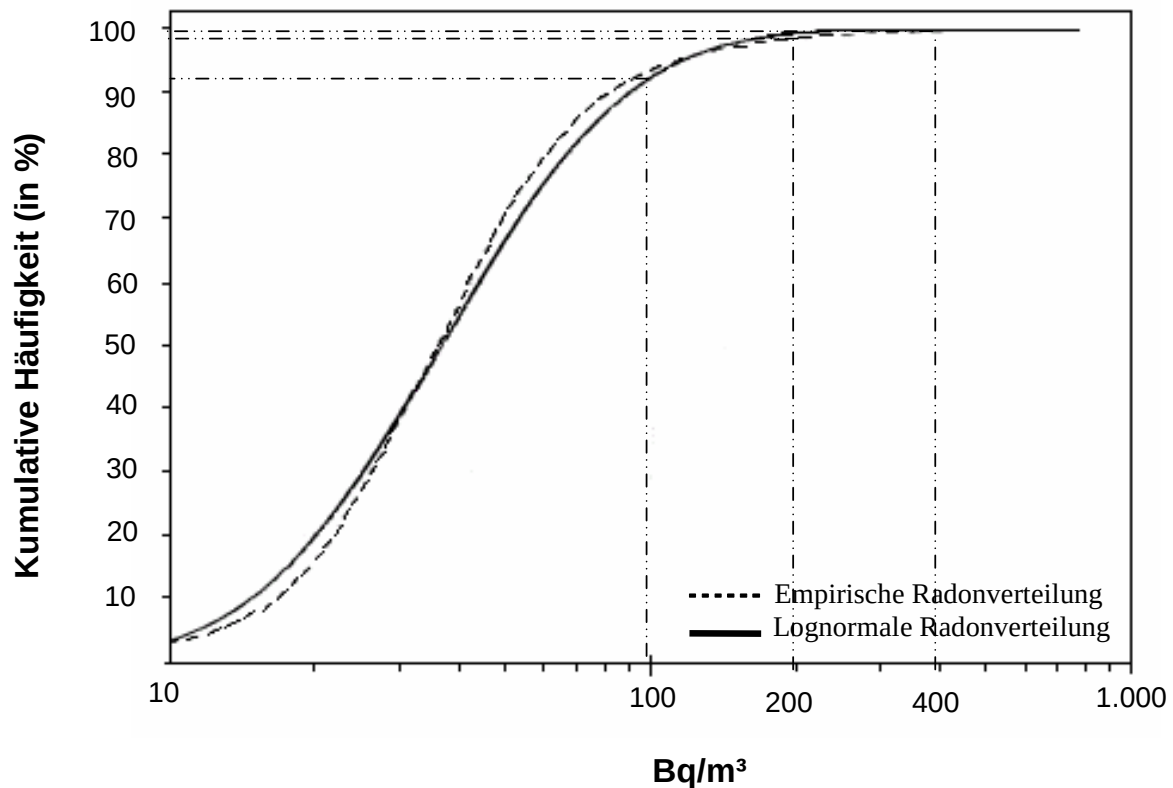
Die valideste Schätzung der Radonverteilung in deutschen Wohngebäuden bildet daher eine Metaanalyse durch Menzler et al. [3]. Die Autoren berechneten die durchschnittliche Innenraumkonzentration dabei als gewichtetes Mittel selektierter Studien. Von insgesamt 28 zur Verfügung stehenden Untersuchungen mit Radonmessdaten wurden nach Ausschluss nicht-repräsentativer Gebäude, unvollständiger Datensätze (fehlende Angaben beispielsweise zu

Gemeinde, Gebäude oder Messzeitraum) sowie Untersuchungen, die aufgrund der erhobenen Variablen, der betrachteten Messzeiträume oder des Studienziels¹¹ als ungeeignet erachtet wurden, 18 Studien mit insgesamt rund 75.000 Beobachtungen in ca. 30.000 Wohneinheiten ausgewählt. Auf dieser Basis wurde die Radonverteilung für Deutschland ermittelt. Nach der Korrektur für saisonbedingte Schwankungen aufgrund unterschiedlicher Messzeitpunkte und -dauern sowie dem Auffüllen von Regionen mit geringer Messpunktdichte durch Schätzwerte – überwiegend auf Basis so genannter Transferfaktoren aus Bodenluftmessungen in 1 m Tiefe – lassen die Ergebnisse der Untersuchung auf eine durchschnittliche Belastung deutscher Wohnräume von 49 Bq/m³ Innenraumluft schließen (arithmetisches Mittel). Weitere Korrekturen bezüglich unsicherer Parameter führten schließlich zu einer besten Schätzung der mittleren Belastung von 44 Bq/m³ (geometrisches Mittel: 37 Bq/m³; $\sigma=2,02$).

Dabei zeigt die empirische Radonverteilung gegenüber der bislang zumeist unterstellten logarithmischen Normalverteilung geringfügige Abweichungen. So verläuft sie im Bereich 10–100 Bq/m³ etwas steiler und streut innerhalb dieses Intervalls auch weniger stark. Darüber hinaus treten Werte >110 Bq/m³ etwas häufiger auf (für einen direkten Vergleich zwischen empirischer und lognormaler Radonverteilung vgl. auch Abbildung 8). Insgesamt wird deutlich, dass nur ein geringer Anteil aller Innenräume durch sehr hohe Radonkonzentrationen gekennzeichnet ist. So weisen etwa 92 % aller Gebäude eine Belastung von weniger als 100 Bq/m³ auf.

¹¹ Beispielsweise werden Radonmessungen vielfach bewusst nur in vermeintlich hoch belasteten Gebäuden durchgeführt, so dass die Ergebnisse dieser Studien nicht als repräsentativ für die Berechnung der Radonverteilung einer spezifischen Region erachtet werden können.

Abbildung 8: Vergleich zwischen empirischer und lognormaler Radonverteilung (geometrisches Mittel: 37 Bq/m³; $\sigma=2,02$) in deutschen Wohngebäuden



Hinweis: Die X-Achse zeigt die Innenraumradonbelastung in Bq/m³ und die Y-Achse zeigt die kumulative Häufigkeit mit der Radonkonzentrationen bis zu einem bestimmten Wert auftreten. In die Grafik ist auch die kumulative Häufigkeit für die in der Modellierung betrachteten Eingriffsniveaus von 100, 200 und 400 Bq/m³ explizit eingezeichnet. Die X-Achse ist logarithmisch skaliert, um die Unterschiede der betrachteten Verteilungen optisch hervorzuheben.

Quelle: Menzler et al. (2006), modifiziert

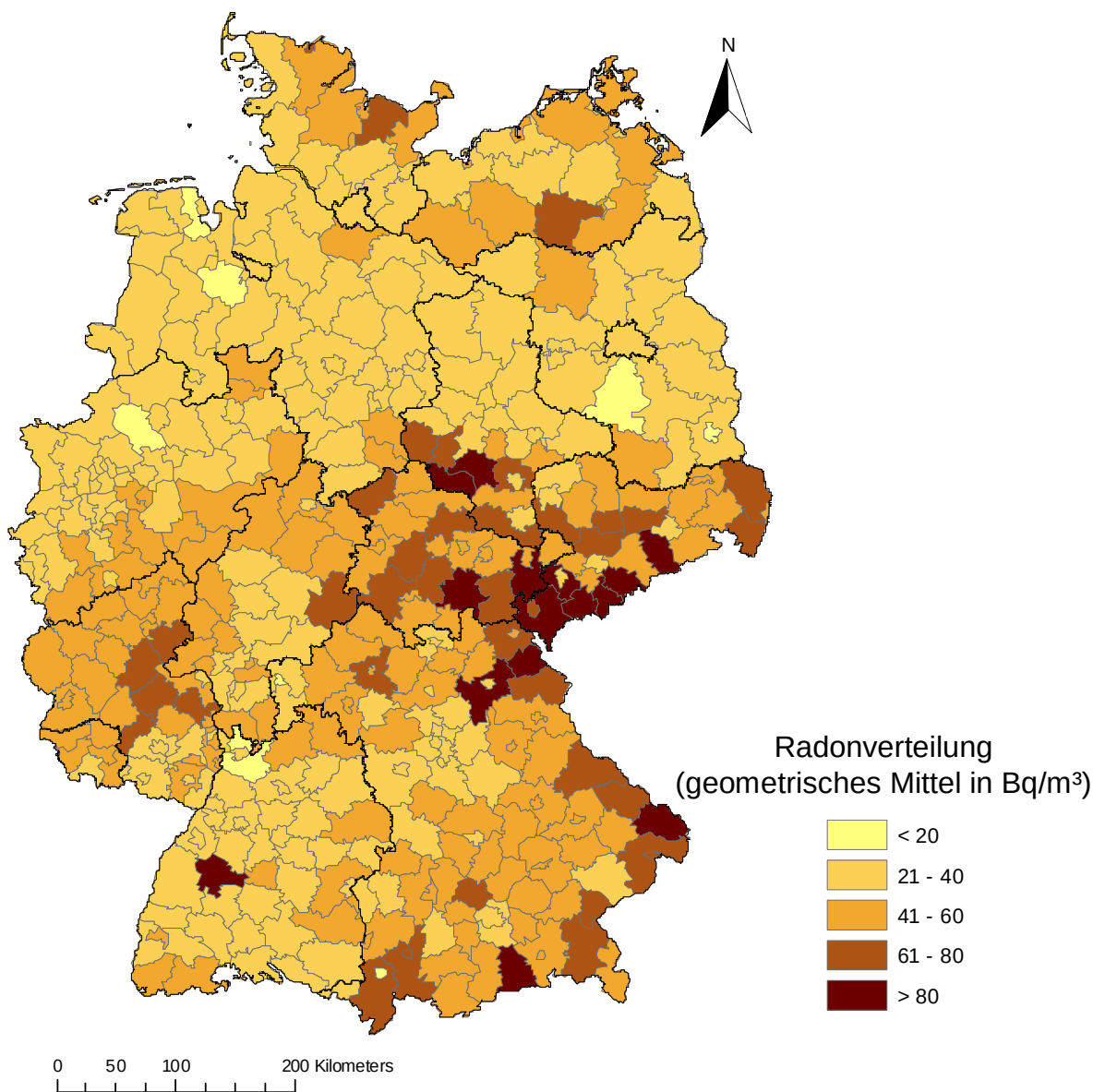
Die verfügbaren Daten ermöglichten auch eine regional differenzierte Analyse der Radonkonzentration, wobei Landkreise aufgrund der Anzahl verfügbarer Messwerte in diesem Zusammenhang die kleinste räumliche Einheit darstellen, für die eine empirische Verteilung überhaupt sinnvoll ermittelt werden konnte. Abbildung 9 gibt einen Überblick über die Radonverteilung in Deutschland auf Landkreisebene.

Es zeigt sich, dass vor allem die Mittelgebirgsregionen signifikant überdurchschnittlich belastet sind, insbesondere die Bundesländer Thüringen und Sachsen sowie Teile Sachsen-Anhalts, Bayerns und Baden-Württembergs weisen die höchsten gemessenen Radonkonzentrationen auf, die teilweise mehr als das Doppelte des bundesweiten Durchschnitts

betragen können. Weite Teile Norddeutschlands sind dagegen in deutlich geringerem Maße durch exorbitante Radonkonzentrationen in Wohnräumen belastet. Die geringsten gemessenen Radonexpositionen finden sich in einzelnen Landkreisen der Bundesländer Brandenburg und Nordrhein-Westfalen sowie in Teilen Niedersachsens und Baden-Württembergs. Diese liegen nur geringfügig über der durchschnittlichen Außenluftbelastung in Deutschland, welche sich auf durchschnittlich etwa 9 Bq/m^3 beläuft [3].

Die differenzierten Daten der Studie durch Menzler et al. bilden im Weiteren die Grundlage für alle (regionalspezifischen) Analysen des entscheidungstheoretischen Modells. Dabei werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens für alle folgenden Berechnungen die geografischen Grenzen der jeweils untersuchten regionalen Einheiten für das Basisjahr der Studie (2006) konstant gehalten.

Abbildung 9: Durchschnittliche Radonkonzentration in Wohnräumen (geometrische Mittelwerte) in den Landkreisen der Bundesrepublik Deutschland



Quelle: Menzler et al (2006), modifiziert

4.2 Lungenkrebsinzidenz und Expositions-Wirkungs-Beziehung der Radonbelastung

Daten bezüglich der Lungenkrebsinzidenz in Deutschland lassen sich dem Deutschen Krebsregister entnehmen. Die Lungenkrebsmorbidity umfasst insgesamt etwa 41.000 Fälle jährlich. Dies entspricht circa 50 Fällen je 100.000 Personen im Bundesdurchschnitt, wobei Männer – vor allem aufgrund unterschiedlicher (berufsbedingter) Risikoexpositionen sowie

einer im Schnitt höheren Rauchprävalenz – mit rund 75 % das Gros der Betroffenen ausmachen. Annähernd 80 % der Lungenkrebspatienten sind älter als 60 Jahre.

Neben der Verteilung der Radonbelastung weist auch die Lungenkrebsinzidenz eine starke regionale Heterogenität auf. So sind insbesondere die Bundesländer Saarland (circa 74 neue Fälle je Jahr bezogen auf 100.000 Einwohner) und Sachsen-Anhalt (circa 64 Fälle) sowie die Stadtstaaten Hamburg und Bremen (jeweils circa 63 Fälle) durch eine erhöhte Lungenkrebsmorbidity belastet, wohingegen Bayern und Baden-Württemberg (jeweils circa 37 Fälle) sowie das Bundesland Hessen (circa 45 Fälle) eine deutlich unterdurchschnittliche Prävalenz aufweisen. Neben differierenden Radonexpositionen können diese Unterschiede vor allem auf unterschiedliche Expositionen mit anderen kanzerogenen Schadstoffen, insbesondere durch den aktiven Tabakkonsum sowie im Rahmen der berufsbedingten Schadstoffexposition, z. B. in (ehemaligen) Bergbaugebieten, zurückgeführt werden.

Für kleinräumige Analysen wird das individuelle Basisrisiko der Lungenkrebserkrankung aus den verfügbaren Informationen zur Lungenkrebsinzidenz sowie den Daten hinsichtlich der individuellen Radonverteilung auf Landkreisebene berechnet. Bezüglich der durch Lungenkrebs reduzierten Lebenserwartung wird ein mittlerer Wert von 13,51 Jahren gemäß [21] angenommen, wobei nach der klinischen Manifestation der Erkrankung eine Restlebenserwartung von durchschnittlich 2 Jahren [14] im Modell berücksichtigt wird. Beide Parameter werden im Rahmen der Sensitivitätsanalysen entsprechend den Angaben in Tabelle 2 variiert.

Ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko durch Radonexposition wurde erstmals zu Beginn des 20. Jahrhunderts unter Bergarbeitern beobachtet und der Zusammenhang in den folgenden Jahrzehnten in 11 internationalen Kohortenstudien mit einer Gesamtpopulation von etwa 68.000 im Bergbau beschäftigten Personen (davon 2.700 Erkrankte) empirisch untersucht (für eine Zusammenfassung vgl. auch [22]). Allerdings ist die Übertragung der Ergebnisse solcher Bergarbeiterstudien auf die häusliche Radonexposition aus verschiedenen Gründen problematisch. Zum einen sind in diesem Berufsfeld Frauen stark unterrepräsentiert. Zum anderen bedingt eine höhere Atemfrequenz, wie sie bei starker körperlicher Anstrengung

auftritt, auch eine erhöhte Abscheidungsrate der Radonfolgeprodukte in der Lunge und dementsprechend ein größeres Erkrankungsrisiko bei objektiv gleichen Expositionswerten. Darüber hinaus weisen Gruben- und Innenraumlufte unterschiedliche Aerosolkonzentrationen auf. Nicht zuletzt ist die spezifische Studienpopulation auch vermehrt weiteren kanzerogenen Substanzen wie z. B. Arsen, Asbest oder Dieselabgasen ausgesetzt. Auch eine höhere Rauchprävalenz dieser Personengruppe im Vergleich zum Bevölkerungsdurchschnitt hat eine starke Verzerrung der in Bergarbeiterstudien ermittelten Expositions-Wirkungs-Beziehungen zur Folge und erschwert die Interpretation derart extrapolierter Daten [4].

Seit den 1990er Jahren wurden zur Analyse des radonbedingten Lungenkrebsrisikos in Wohnräumen daher mehr als 20 internationale Fall-Kontroll-Studien durchgeführt (für einen Überblick vgl. [3, 22-24]). Dabei wurde die zeitgewichtete Radonbelastung durch Kurz- und/oder Langzeitmessungen in den jetzigen und zuvor bewohnten Gebäuden sowie Befragungen der Betroffenen oder sonstige Annahmen abgeschätzt und der Einfluss bestimmter Lebensgewohnheiten – wie zum Beispiel der Tabakkonsum – auf das Erkrankungsrisiko berücksichtigt. Die ermittelten relativen Lungenkrebsrisiken (RR^{12}) bewegen sich bei einer Belastung von 100 Bq/m^3 in den einzelnen Analysen zwischen 0,85 [25] und 1,8 [26].

Auch in Deutschland durchgeführte Untersuchungen zeigen ein durchaus uneinheitliches Bild. In einer auf Westdeutschland beschränkten Analyse konnte kein signifikant erhöhtes Risiko durch eine Radonexposition in der Größenordnung von 100 Bq/m^3 festgestellt werden (RR : 0,97). Für Ostdeutschland fand sich hingegen ein RR von 1,10 [27]. In einer Studie in 3 westdeutschen Regionen wurden RR von 1,59, 1,93 und 1,93 für durchschnittliche Konzentrationen von 50–80, 80–140 und $>140 \text{ Bq/m}^3$ ermittelt, wobei die Ergebnisse lediglich für Regionen mit überdurchschnittlicher Radonbelastung statistisch signifikant waren [28]. Wei-

¹² Das relative Risiko drückt aus, um welchen Faktor sich ein Risiko (in diesem Fall für eine Erkrankung) in zwei Gruppen unterscheidet. Es berechnet sich als Quotient der beiden Wahrscheinlichkeiten für ein spezifisches Ereignis/ Merkmal beziehungsweise mit bedingten Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt als

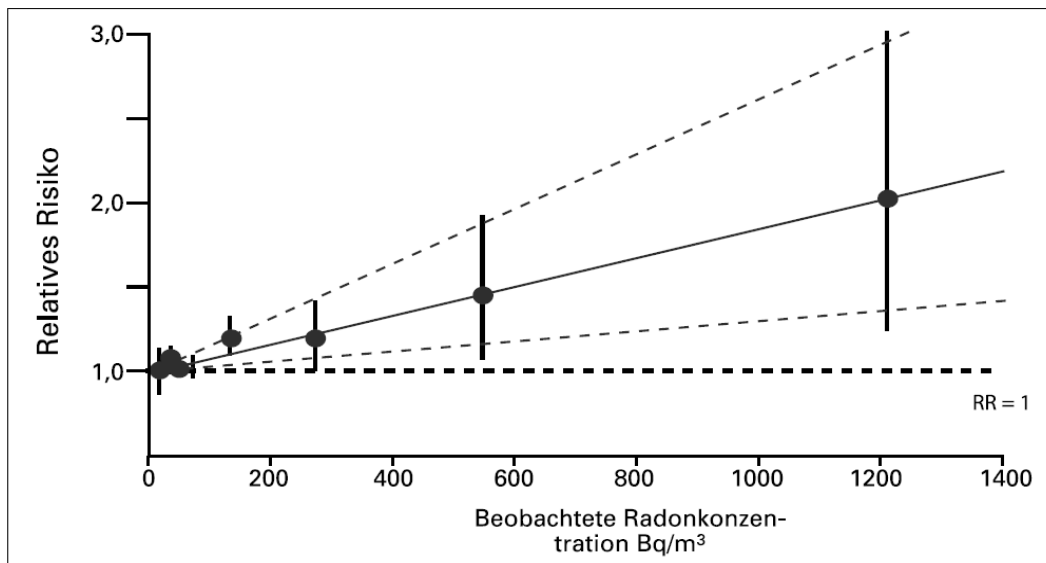
$$RR = \frac{P(\text{Erkrankung}|\text{Risikofaktor}+)}{P(\text{Erkrankung}|\text{Risikofaktor}-)}$$

tere Untersuchungen weisen für eine Belastung von 100 Bq/m^3 relative Risiken von 0,97 [29] – 1,10 [27] auf.

Probleme dieser Fall-Kontroll-Studien ergeben sich häufig aufgrund der geringen statistischen Teststärke einzelner Untersuchungen, unterschiedlichen Studienzielen und -designs sowie Unsicherheiten bezüglich der retrospektiven Expositionsbestimmung der Studienpopulation.

Die in der wissenschaftlichen Diskussion meist beachtete Studie ist daher eine aktuelle Metaanalyse aus 13 Fall-Kontroll-Studien, die in 9 europäischen Ländern durchgeführt wurden, mit einer Gesamtpopulation von 7.148 an Lungenkrebs erkrankten Personen und 14.208 Kontrollen [30]. Das gepoolte Relative Risiko in dieser Studie betrug bei einer Belastung von 100 Bq/m^3 Innenraumluft 1,16 (95 %-KI: 1,05–1,31) nach der Berücksichtigung von Unsicherheiten in der retrospektiven Expositionsabschätzung (für eine grafische Darstellung vgl. auch Abbildung 10). Das heißt, dass Personen, die einer Exposition von 100 Bq/m^3 ausgesetzt sind ein um 16 % höheres Risiko aufweisen an Lungenkrebs zu erkranken als nicht Exponierte. Die ermittelte Dosis-Wirkungs-Beziehung erwies sich als linear, ohne erkennbare Wirkungsschwelle und blieb auch bei einer Beschränkung der Analyse auf unterschiedliche Subgruppen mit variierenden Expositionen statistisch signifikant. Das geschätzte Risiko änderte sich gegenüber dem vollständigen Datensatz kaum. Darüber hinaus gab es auch keinen Hinweis darauf, dass die Dosis-Wirkungs-Beziehung von Besonderheiten des Studiendesigns oder der Radonmessung abhängig war und es konnten keine Variablen mit einem modifizierenden Einfluss auf das Ergebnis der Untersuchung identifiziert werden. Die relativen Risiken waren ebenso unabhängig von Alter, Geschlecht oder Raucherstatus der exponierten Individuen (das absolute Risiko ist bei Rauchern allerdings erheblich höher als bei Nichtrauchern, da sich die relativen Risiken von Rauchen und Radon in etwa multiplizieren). Die Ergebnisse dieser Studie sind auch konsistent mit einer US-amerikanischen Metaanalyse [31] aus 7 Fall-Kontroll-Studien.

Abbildung 10: Relatives Risiko für Lungenkrebs in Abhängigkeit von der Radonkonzentration in Wohngebäuden in Europa



RR = relatives Risiko

Hinweis: Die durchgezogene Linie gibt die geschätzte lineare Beziehung wieder. Die gestrichelten Linien zeigen das zugehörige 95 % Konfidenzintervall. Die fette gestrichelte Linie zeigt vergleichsweise ein RR von 1,0.

Quelle: Darby et al. (2005)

Da die europäische Pooling-Studie [30] über die größte Studienpopulation verfügt und die nach aktuellem Wissensstand validesten Ergebnisse aufweist, wird im Rahmen der Kosten-effektivitätsanalyse in diesem Forschungsvorhaben auf allen regionalen Ebenen und für alle räumlichen Einheiten dementsprechend ein relatives Risiko gemäß

$$RR(x) = 1 + \beta x$$

mit $\beta = 0,0016$ ohne Schwellenwert unterstellt, wobei x die jeweilige Radonexposition in Bq/m^3 Innenraumlufte bezeichnet. In die Sensitivitätsanalyse der Modellierung geht das 95 %-Konfidenzintervall von β entsprechend der zu Grunde liegenden Verteilung ein (0,0005–0,0031).

Da die Lungenkrebserkrankung nicht unmittelbar nach der Radonexposition manifest wird, muss zudem eine Latenzperiode berücksichtigt werden. Jedoch existieren diesbezüglich auch angesichts neuester biologischer und epidemiologischer Erkenntnisse keine validen

Daten [32]. In der Literatur finden sich daher unterschiedliche Annahmen bezüglich der zeitlichen Verteilung der Interventionseffekte von 1 [33] bis 25 [34] Jahren. In dieser Studie wird eine mittlere Latenzperiode von 17,8 Jahren gemäß [35] als gewichtetes Mittel aus verschiedenen aktuellen Schätzungen verwendet, wobei dieser Wert in der Sensitivitätsanalyse um $\pm 30\%$ variiert wird.

4.3 Bestandsaufnahme der Gesundheits- bzw. Krankheitskosten bei Lungenkrebs sowie sonstiger zu berücksichtigender Kosten

Für die Berechnung der Kosteneffektivität der Radonsanierung muss gegebenenfalls ein Rückgang der direkten Krankheitskosten durch die verminderte Lungenkrebsinzidenz und die damit einhergehenden Einsparungen bei der Behandlung der Krankheit berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist auch eine etwaige Verminderung des krankheitsbedingten Produktivitätsausfalls, d. h. der indirekten Krankheitskosten entsprechend in die Berechnung einbezogen werden (vgl. auch Abbildung 3).

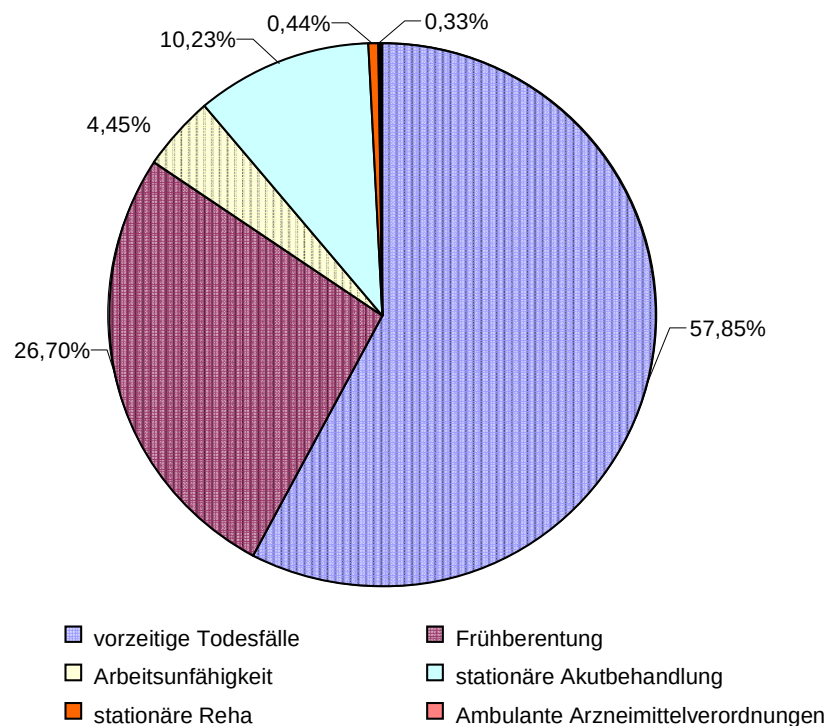
Weißflog et al. [36] analysierten in einer prävalenzbasierten, retrospektiven Studie mithilfe von Sekundärdaten öffentlicher Einrichtungen und der pharmazeutischen Industrie die Kosten des Lungenkrebs in Deutschland. Dabei wurden direkte Kosten berücksichtigt, die aus der stationären Akutbehandlung, der stationären Rehabilitation sowie den krankheitsspezifischen ambulanten Arzneimittelverordnungen resultieren.

Indirekte Kosten, die aufgrund des Verlusts menschlicher Produktivität (Produktionsausfall durch Mortalität und Morbidität) entstehen, wurden mithilfe des Humankapitalansatzes berechnet. Dieser wird dazu verwendet, den monetären Produktivitätsverlust der erwerbstätigen Bevölkerung zu ermitteln. Die Berechnungsgrundlage bietet in der Regel das durchschnittliche Bruttojahreseinkommens pro Kopf (nach Altersgruppen und Geschlecht). Alle hierfür benötigten Daten zu vorzeitigen, lungenkrebsinduzierten Todesfällen (d. h. der Tod tritt vor Erreichen des regulären Rentenalters ein) sowie morbiditätsbedingter Arbeitsunfähigkeit und Frühberentung wurden aus offiziellen Statistiken gewonnen, wobei der Berech-

nung in diesem Zusammenhang die Annahme eines durchschnittlichen Renteneintrittsalters von 62 Jahren für Frauen und 65 Jahren für Männer zu Grunde gelegt wurde (hinsichtlich des Eintritts in das Erwerbsleben wurde für Männer und Frauen ein Alter von 20 Jahren angenommen).

Für das Referenzjahr 1996 berechneten die Autoren die Gesamtkosten des Lungenkrebs entsprechend der oben genannten Parameter auf 8,31 Mrd. DM₁₉₉₆. Daran haben die indirekten Kosten mit 7,4 Mrd. DM einen Anteil von annähernd 89 %. Der Großteil dieser Summe kann auf vorzeitige Todesfälle zurückgeführt werden, gefolgt von Frühberentung (30 %) und vorübergehender Arbeitsunfähigkeit (5 %). Der größte Kostentreiber bezüglich der direkten Krankheitskosten ist die stationäre Akutbehandlung (circa 93 %), wohingegen die stationäre Rehabilitation (3 %) sowie die ambulanten Arzneimittelverordnungen (4 %) insgesamt einen vergleichsweise untergeordneten Einfluss haben (vgl. auch Abbildung 11 für einen grafischen Überblick über die wesentlichen Kostentreiber der Lungenkrebserkrankung in Deutschland).

Abbildung 11: Der Beitrag der wesentlichen Kostentreiber zu den Gesamtkosten der Lungenkrebserkrankung in Deutschland



Hinweis: die schraffierten Flächen entsprechen den Anteilen der indirekten Kosten (Produktivitätsverluste durch Mortalität und Morbidität) an den Gesamtkosten (gesamte Kreisfläche)

Quelle: eigene Darstellung

Eine Adjustierung der Studienergebnisse unter Verwendung des Konsumentenpreisindex [37], eines Umrechnungsverhältnisses von 1,95583 von DM auf € sowie der aktualisierten Lungenkrebsinzidenz für das Basisjahr der Kosteneffektivitätsanalyse in dieser Studie (=2006) führt zu aktuellen Gesamtkosten des Lungenkrebs in Deutschland von etwa 4,79 Mrd. €₂₀₀₆ pro Jahr oder jährlich circa 58.000 €₂₀₀₆ je durchschnittlichem Lungenkrebspatient.

Ruff et al. [38] geben die Gesamtkosten des Lungenkrebs im Rahmen einer Untersuchung zu den ökonomischen Wirkungen des Rauchens mit jährlich 5,71 Mrd. DM₁₉₉₆ an. Dies entspricht etwa 3,24 Mrd. €₂₀₀₆ unter Verwendung des oben beschriebenen Umrechnungsmodus, wobei fehlende Angaben zu den zu Grunde liegenden Daten, insbesondere den Fallzahlen der in der Studie berücksichtigten Analysen, den Vergleich mit den Ergebnissen von Weissflo et al. [36] erschweren.

Auch das statistische Bundesamt führt eine Berechnung der direkten Krankheitskosten durch. Das Statistische Jahrbuch 2006 beziffert jedoch lediglich die direkten Kosten von Krebs im Bereich der Trachea, Bronchien und Lunge. Diese belaufen sich auf 720 Mio. €₂₀₀₆ [39]. Indirekte Kosten lassen sich im Rahmen dieser Betrachtung vereinfacht auch anhand der Angaben der Gesundheitsberichterstattung des Bundes, basierend auf Informationen zu verlorener Arbeitszeit¹³, sowie Daten bezüglich der durchschnittlichen Einkommen im Basisjahr (zuzüglich der Arbeitgeberbeiträge) [39], mithilfe des oben beschriebenen Humankapitalansatzes berechnen. Für das Basisjahr 2006 betragen sie nach dieser Berechnungsmethode rund 3,45 Mrd. €. Auf Grundlage der oben genannten Quellen summieren sich direkte und indirekte Kosten für die genannten Krebserkrankungen somit auf rund 4,17 Mrd. €₂₀₀₆.

Dabei kann jedoch der exakte Anteil der allein auf den Lungenkrebs zurückzuführen ist, aus den verfügbaren Daten nicht berechnet werden, da diesbezüglich im Einzelnen keine Differenzierung erfolgt (Krebserkrankungen der Trachea und Bronchien sind allerdings vergleichsweise sehr viel seltener). Ferner legt auch das Statistische Bundesamt seine Berechnungsgrundlagen sowie die verwendete Methodik der Krankheitskostenrechnung nicht vollständig offen, so dass die beschriebenen Differenzen zu den sonstigen verfügbaren Untersuchungen nicht im Einzelnen nachvollzogen werden können.

Da Weißflog et al. [36] die am besten dokumentierte Untersuchung mit einem vergleichsweise hohen Detaillierungsgrad und einer konsistenten, im Einzelnen nachvollziehbaren Methodik vorlegen, gehen die Werte wie in Kapitel 2 und Abbildung 3 beschrieben in das entscheidungstheoretische Modell in dieser Studie ein. Aufgrund fehlender Angaben zu etwaigen Unsicherheitsbereichen der Analyse werden alle Kostenkomponenten in der Sensitivitätsanalyse in einem Intervall von $\pm 30\%$ variiert.

¹³ vgl. <http://www.gbe-bund.de/>

4.4 Empirische Daten der Compliance bezüglich Radoninterventionsmaßnahmen

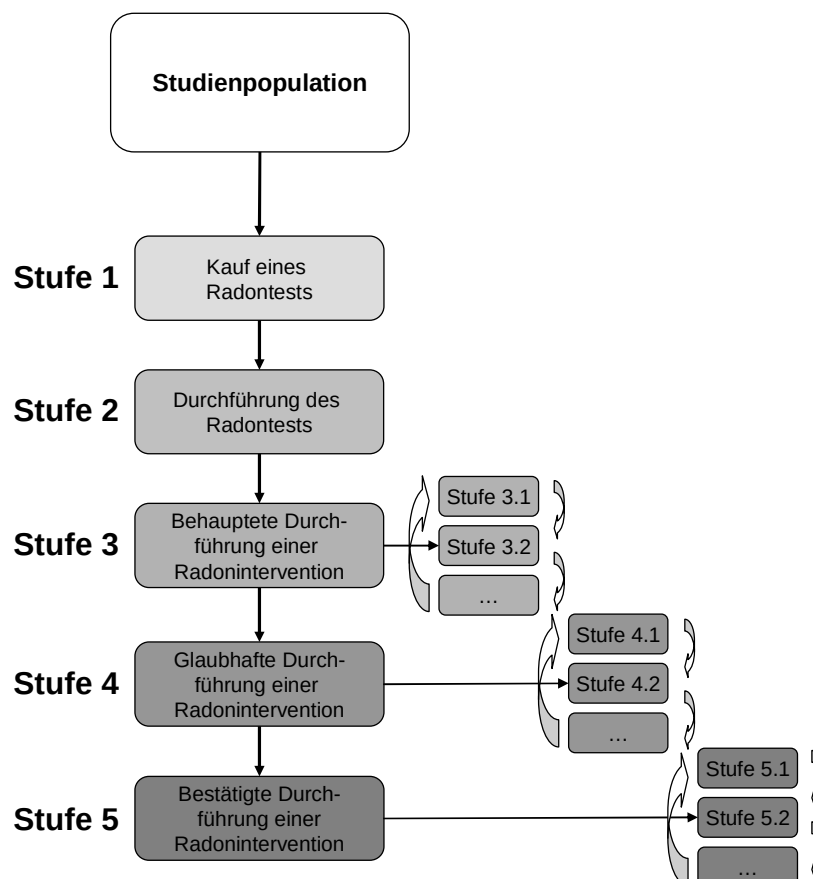
Es existiert eine Reihe empirischer Untersuchungen bezüglich der Compliance im Hinblick auf Empfehlungen für Radonscreening und -sanierung beziehungsweise Radonschutzmaßnahmen im Zuge von Neubauten. Diese stammen überwiegend aus dem angloamerikanischen Raum sowie Großbritannien (vgl. z.B.: [40-51]). Allerdings liegen nur wenige aktuelle Ergebnisse vor. Zudem sind die verfügbaren Studien oftmals durch kleine Studienpopulationen sowie unterschiedliche methodische Ansätze und insbesondere auch unterschiedliche Untersuchungsziele gekennzeichnet. Spezifische Daten für Deutschland wurden diesbezüglich bislang nicht erhoben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Informationskampagnen hinsichtlich der Gesundheitsrisiken der häuslichen Radonexposition, möglicher Interventionsmaßnahmen zur Verringerung der Belastung und empfohlenem Eingriffsniveau einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Verhalten der potentiell exponierten Bevölkerung zeigen. Das heißt, der Anteil der bereit ist, freiwillig einen Radontest zu kaufen, diesen auch sachgemäß durchzuführen und von geeigneten Stellen auswerten zu lassen kann durch derlei Maßnahmen nicht in erheblichem Umfang erhöht werden. So wurden selbst bei kostenlosen Messkampagnen in höchstens etwa 20 % der Haushalte freiwillig Radonmessungen vorgenommen [46]. Die Zahl derer, die nach einem Test mit „positivem“ Ergebnis Sanierungsmaßnahmen durchführen, wird meist mit 10–30 % der jeweiligen Studienpopulation angegeben, mitunter auch deutlich weniger. Ähnlich verhält es sich bei Empfehlungen zur Radonintervention an Neubauten (vgl. z. B. [47]).

Johnson und Luken [41] kommen in einer empirischen Untersuchung auch zu dem Ergebnis, dass – entgegen der intuitiven Erwartung – die Höhe der ursprünglichen Radonbelastung keinen Einfluss auf die Compliance mit Richtwerten für die Radonintervention aufweist. Andere Studien beschreiben diesbezüglich jedoch überwiegend einen positiven Zusammenhang, d. h. je höher die individuelle Belastung, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass freiwillig Maßnahmen zur Reduktion der Exposition unternommen werden.

In das entscheidungstheoretische Modell bezüglich der Kosteneffektivität der Sanierung bestehender Wohngebäude, gehen hinsichtlich der Compliance die Ergebnisse einer Studie durch Doyle et al. [51] ein, da diese die größte Studienpopulation aufweist und die einzelnen Schritte der Radonintervention differenziert betrachtet und insbesondere im Rahmen eines aufwändigen, mehrstufigen Prozesses auch durch die Autoren verifiziert wurden (vgl. Abbildung 12 für eine Übersicht über die verschiedenen Stufen der Compliance-Messung durch Doyle et al.).

Abbildung 12: Der mehrstufige Prozess der Compliance-Messung durch Doyle et al.



Hinweis: jede Stufe des Prozesses enthält verschiedene Unterstufen, die in der Grafik nur angedeutet werden. Darüber hinaus wurden einzelne (Unter-)Stufen im Rahmen der Implementierung auch iterativ durchlaufen (in der Grafik angedeutet durch Pfeile).

Quelle: eigene Darstellung

Die meisten übrigen Untersuchungen zur Compliance hingegen sind weit weniger differenziert und beruhen lediglich auf der Selbstausskunft der Teilnehmer, wobei diese zu einer übertrieben positiven Darstellung der eigenen Sanierungsbemühungen tendieren (Doyle et al. kommen zu dem Schluss, dass nur wenige der behaupteten Sanierungen tatsächlich nachvollzogen und bestätigt werden können).

Im Rahmen der Studie wurden rund 1 Mio. Haushalte in Washington, DC gezielt über die Radonproblematik und mögliche Interventionsmaßnahmen informiert. Daraufhin kauften circa 6,5 % der Zielpopulation Radontests, wobei rund 55 % davon zur Auswertung zurückgeschickt wurden. Obgleich durch die meisten Personen, deren Messergebnis das empfohlene Eingriffsniveau überstieg, Angaben zu positiven Sanierungsmaßnahmen gemacht wurden, konnten diese lediglich für circa 5 % der Fälle verifiziert werden, wobei ein deutlicher Zusammenhang mit der gemessenen Radonbelastung offenbar wurde. Die Effektivität der Interventionsmaßnahme wurde von insgesamt etwa 34 % der Betroffenen durch einen konfirmatorischen Test überprüft, wobei auch dieser Anteil in starkem Maße von der ursprünglichen Belastung abhing.

Für die Kosteneffektivitätsanalyse bestehender Wohngebäude (S1–3) gehen daher – neben einer konstanten, d. h. von der gemessenen Radonbelastung unabhängigen Testcompliance (Kauf, Durchführung und Auswertung von Radon Tests) – die Bereitschaft zu sanieren und das Ergebnis durch einen weiteren Test zu ermitteln in Abhängigkeit von dem Ergebnis der ersten Messung gemäß [51] in das Modell ein. Die betrifft die Szenarien 2 und 3, da S1 zunächst eine verpflichtende Regulierung und vollständige Compliance zu Grunde gelegt wird.

Doyle et al. ermittelten jedoch nicht den Anteil derer, die nach unzureichendem Sanierungsergebnis und positivem konfirmatorischen Testergebnis über dem spezifischen Eingriffsniveau weitere Maßnahmen zur Reduktion der individuellen Belastung ergreifen. Aufgrund mangelnder empirischer Daten wird dieser gemäß [14] auf durchschnittlich 30 % geschätzt, wobei ein zur ersten Intervention analoger funktionaler Zusammenhang mit der Radonbelastung unterstellt wird. Mangels Angaben zu etwaigen Unsicherheitsbereichen der Untersu-

chungsergebnisse werden alle Werte der Compliance in den Sensitivitätsanalysen mit $\pm 30\%$ berücksichtigt.

Im Rahmen der Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens hingegen werden Fragen der individuellen Compliance mit Richtlinien zur Radonintervention in keinem Szenario explizit berücksichtigt. Dies ist vor allem in der Tatsache begründet, dass die Compliance in diesem Untersuchungszusammenhang lediglich einen signifikanten Effekt auf das Ergebnis der Intervention – d. h. die Anzahl der verhinderten Lungenkrebsfälle – hat, wohingegen die Kosteneffektivität der Maßnahme davon weitestgehend unberührt bleibt.

Insbesondere das Ergebnis der Kosteneffektivitätsanalyse in Szenario 5 ist vollständig unabhängig von der Anzahl der Haushalte die freiwillig Radonschutzmaßnahmen ergreifen, da die individuelle Belastung nach der ersten Intervention nicht gemessen wird (keine konfirmatorischen Tests) und dementsprechend keine weiteren Eingriffe vorgenommen werden, unabhängig von der Effektivität der ersten Intervention. Lediglich in Szenario 4 könnte die Compliance einen potentiellen Effekt auf die Kosteneffektivität der Maßnahme haben, da in individuellen Fällen nach erfolgter Radonprävention und „positivem“ konfirmatorischen Test weitere Interventionsmaßnahmen angezeigt wären. Es zeigt sich jedoch, dass dieser Effekt auf die Kosteneffektivität für Deutschland nicht signifikant ist. Da im Kontext der Radonprävention an Neubauten auch keine expliziten Daten verfügbar sind und die Extrapolation aus dem Bereich der Sanierung bestehender Gebäude die Ergebnisse durch zusätzliche Unsicherheiten belasten würde, wird die Compliance in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt.

4.5 Maßnahmen und Kosten der Verringerung der Radonkonzentration in Wohngebäuden

Die verfügbaren Maßnahmen der Radonsanierung von Wohngebäuden beziehungsweise des radonsicheren Bauens weisen unterschiedliche Kosten und Wirkungsgrade auf. Die Anwendung einer bestimmten Methode ist vor allem durch die Höhe der Radonkonzentration, die Beschaffenheit des Baugrunds sowie bautechnische Gegebenheiten im Einzelfall be-

stimmt. Grundsätzlich lassen sich zwei Herangehensweisen unterscheiden. Entweder wird versucht, ein Eindringen des Schadstoffes aus dem Untergrund in den Innenraum zu unterbinden oder die radonhaltige Luft wird durch geeignete Maßnahmen aus dem Gebäude geleitet.

Vergleichsweise einfach ist eine temporäre Senkung der Belastung in bestehenden Gebäuden durch die Erhöhung der natürlichen Belüftung herbeizuführen, z. B. durch vermehrtes Öffnen der Fenster oder das Anbringen spezieller Lüftungsöffnungen, insbesondere in den unteren Stockwerken beziehungsweise den Kellerräumen. Installationskosten fallen dabei nicht oder nur in geringem Umfang an. Jedoch erhöhen sich unter Umständen die Energiekosten [52], wenn die entsprechenden Räume beispielsweise stärker geheizt oder – abhängig von der jeweiligen Jahreszeit – gekühlt werden müssen. Ferner finden sich bezüglich des erzielbaren Wirkungsgrades stark variierende Angaben in der Literatur [52].

Weitere Maßnahmen, vornehmlich für geringe Innenraumkonzentrationen und/oder zur Unterstützung komplexer Sanierungsvorhaben, die neben einer Reduktion der Radonkonzentration auch andere Ziele verfolgen können (z. B. Energieeffizienz), betreffen das Unterbinden des konvektiven Luftstroms durch das Abdichten des Kellerzugangs, das Abdichten von Öffnungen und Luken, die Installation radondichter Kellertüren oder den Neubau eines externen Kellerzugangs sowie das Verfugen und Versiegeln von Oberflächen und Eintrittsöffnungen für radonhaltiges Bodengas, beispielsweise mit Mörtel, dauerelastischem Kitt oder Silikon. So soll ein Eindringen des Schadstoffes in das Gebäude verhindert werden. Große Flächen können auch mit radondichten Kunststofffolien beschichtet werden. Allerdings sind diese Methoden für sich allein genommen in der Praxis oftmals wenig effektiv. Lediglich die vollständige Isolierung des Fußbodens einschließlich der umgebenden Wände zeigt sehr gute Ergebnisse, wobei diese Maßnahme mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden ist. Daher empfiehlt sich die Durchführung vor allem im Zuge radonsicherer Neubauten beziehungsweise ohnehin nötiger Renovierungsarbeiten. Darüber hinaus besteht bei luft- und wasserdichten Isolierschichten die Gefahr bauphysikalischer Nebeneffekte, etwa in Form einer Schädigung der Bausubstanz bei feuchtem Mauerwerk.

Eine deutliche Verringerung der Exposition bei höheren Belastungen kann durch die Reduktion des Unterdrucks im Gebäudeinneren, beispielsweise durch eine eigene Frischluftzufuhr im Keller oder das aktive Erzeugen eines Überdrucks erreicht werden, z. B. indem Raumluft aus den oberen Stockwerken in den Keller transportiert wird. Die Effektivität dieser Maßnahme hängt in erheblichem Maße von der individuellen Beschaffenheit des Gebäudes ab. Bislang liegen auch noch keine Langzeituntersuchungen zu deren Effektivität vor.

Ähnliche Wirkungsgrade finden sich für die Methode der mechanischen Bodenluftabsaugung. Dabei werden Kunststoffrohre durch die Bodenplatte in den Kellerräumen geführt und die radonhaltige Luft vor dem Eintritt ins Gebäude mittels Ventilator (aktives System) oder unter der Nutzung thermischer Effekte sowie dem Einfluss des Windes auf das Gebäude (passives System) abgesaugt und meist über das Dach ins Freie geleitet. Beide Maßnahmen sind jedoch mit vergleichsweise hohen Installationskosten sowie zusätzlichen Heizkosten aufgrund des schnellen Luftaustauschs und im Falle der mechanischen Bodenluftabsaugung auch mit Betriebs- und Wartungskosten für die Ventilation verbunden.

Alternativ kann eine komplette Unterbodenentlüftung (Radondrainage) vorgenommen werden. Dabei werden Kunststoffrohre von mindestens 50 mm Durchmesser im Abstand von 1–2 m etwa 50 cm unter der Fußbodenoberkante verlegt, in welchen ein gegen die darüber liegenden Räume gerichteter Unterdruck herrscht. Die radonhaltige Bodenluft sammelt sich dadurch in den Rohren und kann mittels radondichter Leitungen über das Dach in die Außenluft abgeführt werden. Das System lässt sich auch durch in Reihe geschaltete Ventilatoren unterstützen (aktives Absaugesystem).

Die Installation eines Radonbrunnens ist ein vergleichbares Verfahren, wobei die radonhaltige Bodenluft in einem oder mehreren eigens angelegten Schächten unterhalb der Bodenplatte gesammelt und ebenso über ein Rohr aus dem Haus geleitet wird. Radonbrunnen lassen sich jedoch nur unter bestimmten geologischen Gegebenheiten erfolgreich einsetzen. Mit letztgenannten Methoden konnte in diversen Versuchsreihen die höchste Reduktion der Radonkonzentration erreicht werden, wobei vergleichsweise hohe Kosten für Installation, Betrieb und Instandhaltung anfallen.

Insgesamt ist die Wahl der geeigneten Intervention für jedes (potentiell) belastete Gebäude individuell zu treffen und unter Umständen als Kombination aus den verschiedenen verfügbaren Maßnahmen durchzuführen. Dementsprechend ist eine *a-priori*-Beurteilung der Kosten und vor allem des Erfolgs der Maßnahmen für einzelne Gebäude nur sehr schwer zu treffen und durch große Unsicherheit belastet. Nach der Sanierung sollte das Ergebnis für eine abschließende Beurteilung daher durch eine erneute konfirmatorische Messung überprüft werden. Dementsprechend können bei unzureichender Wirkung gegebenenfalls auch Nachbesserungen notwendig werden [53].

Im Rahmen der Modellierung sind bezüglich des Sanierungserfolges und den damit einhergehenden Kosten einige vereinfachende Annahmen zu treffen (vgl. Tabelle 3 für eine Übersicht über die verfügbaren Interventionsstrategien, deren Anwendungsbereiche sowie Wirkung und Kosten im entscheidungstheoretischen Modell). Alle Annahmen bezüglich der Modellparameter und deren Ausprägungen wurden in Abstimmung mit Experten getroffen, die über langjährige Erfahrung im Bereich der Radonsanierung verfügen.

In den meisten Publikationen zur Effektivität der Radonintervention, z. B. [11, 13, 54-56], wird diese über verschiedene Maßnahmen hinweg im Mittel mit einer 75–90 %igen Senkung der Konzentration im Wohnraum angegeben. Diese Werte lassen sich auch vereinbaren mit den Erkenntnissen der modellhaften Sanierung radonbelasteter Wohngebäude in der Region Schneeberg im Erzgebirge [53], einem umfangreichen Sanierungsprojekt der Landesumweltagentur Bozen¹⁴ sowie den beispielhaften Sanierungen, die im Radonhandbuch der WHO [57] angeführt sind. In das Entscheidungsmodell geht daher der Wirkungsgrad der Radonsanierung in Anlehnung an [11, 12] als durchschnittliche Reduktion der Radonbelastung um 80 % ein. In der Sensitivitätsanalyse werden Werte im Intervall von 75–90 % berücksichtigt.

Auch der mit der Intervention verbundene Aufwand ist *a priori* nur sehr grob abschätzbar und kann im Einzelfall beträchtlich variieren. Gemäß den Angaben des Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit – einer Kooperation mehrerer deutscher Ministerien und Behörden – sind

¹⁴ http://www.provinz.bz.it/Umweltagentur/2908/radon/radon_d-08d.htm

die Kosten der Sanierung eines durchschnittlichen bestehenden Gebäudes mit ca. 1.000–5.000 € zu veranschlagen, je nach Maßnahme, Gebäudetyp und vor allem Höhe der Radonbelastung [58]. Das BMU beziffert die nötigen Aufwendungen im Mittel auf rund 3.000 € [59]. Damit liegen die Angaben zu den Gesamtkosten tendenziell höher als beispielsweise in den USA [52] oder England [12, 60, 61]¹⁵, aber niedriger als etwa in der Schweiz [56].

In das Entscheidungsmodell gehen die Kosten der Sanierung existierender Wohngebäude in Abhängigkeit der *a-priori*-Belastung sowie der Größe der Grundfläche des zu sanierenden Gebäudes ein. Im Bereich von 100–199 Bq/m³ werden für ein bestehendes Gebäude durchschnittlicher Größe Aufwendungen von 500 € angenommen. Dies beinhaltet vor allem Änderungen im Lüftungsverhalten sowie das Anbringen von Isolierschichten ohne professionelle Unterstützung sowie einen erhöhten Energieverbrauch. Beträgt die Belastung 200–399 Bq/m³ werden Kosten von 1.000 € für einfache bautechnische Verfahren angesetzt. Im Bereich von 400–999 Bq/m³ und mehr als 1.000 Bq/m³ werden zunehmend komplexe bautechnische Methoden unterstellt, welche mit durchschnittlich 3.000 € beziehungsweise 5.000 € veranschlagt werden, wobei darin annahmegemäß sämtliche Installations-, Wartungs- und Betriebskosten für die gesamte Wirkungsdauer enthalten sind.

Durch präventiven Radonschutz im Zuge des radonsicheren Bauens von Wohngebäuden kann grundsätzlich ein etwas höherer Effekt erzielt werden als im Rahmen der Sanierung bestehender Gebäude, da sich Maßnahmen bereits bei der Gebäudeplanung berücksichtigen lassen. Modellhafte Sanierungen erzielten eine Reduktion der Radonbelastung um bis zu 99 % [53]. Aufgrund der Tatsache, dass diese Werte unter optimalen Bedingungen erzielt wurden, geht in das entscheidungstheoretische Modell eine durchschnittliche Reduktion der Radonbelastung von 85 % als konservative Schätzung ein. In der Sensitivitätsanalyse wird der Wert im Intervall von 75 % bis 95 % variiert.

Die Kosten der Radonprävention fallen deutlich geringer aus als für die Radonsanierung, da Maßnahmen bereits im Zuge des Neubaus installiert werden und keine nachträglichen Ein-

¹⁵ Zu der Studie von Gray et al [60] ist jedoch anzumerken, dass die Autoren insbesondere hinsichtlich der Kostenparameter der Interventionsmaßnahmen auffallend niedrige Werte verwenden, ohne diesen Umstand näher zu erläutern.

griffe in die Baustruktur nötig sind. In das entscheidungstheoretische Modell geht der Aufwand – analog zu der Radonsanierung – in Abhängigkeit von der Größe der Grundfläche des Gebäudes ein. Der erforderliche Umfang der Intervention und dementsprechend auch die dadurch verursachten Kosten werden jedoch als unabhängig von der individuellen Radonbelastung betrachtet, da diese annahmegemäß *a priori* nicht bekannt ist. Für ein durchschnittliches Wohnhaus bezüglich Größe und Bauweise werden diesbezüglich 700 € veranschlagt.

Da die Kosten der Sanierung beziehungsweise des radonsicheren Bauens individuell stark variieren können und vor Abschluss der nötigen Arbeiten nur wenig detaillierte Schätzungen möglich sind, werden alle Modellparameter in der Sensitivitätsanalyse gemäß [14] um $\pm 30\%$ variiert.

Aufgrund der individuellen Charakteristika eines jeden Sanierungsvorhabens, können bei unzureichendem Ergebnis auch Nachbesserungen notwendig sein. Es werden diesbezüglich bei bestehenden Gebäuden gemäß [14] zusätzliche Kosten in Höhe von 30 % der durchschnittlichen Sanierungsaufwendungen veranschlagt. Nachbesserungen senken die Radonkonzentration dabei annahmegemäß auf das durchschnittliche Belastungsniveau aller sanierten Gebäude. Im Rahmen des radonsicheren Bauens werden die Kosten und Effekte etwaiger zusätzlicher Maßnahmen nach Baufertigstellung analog zu der Sanierung existierender Wohngebäude modelliert.

Explizit nicht berücksichtigt werden in beiden Interventionskontexten mögliche Synergieeffekte bezüglich anderer Sanierungsziele, beispielsweise im Bereich des Wärmeschutzes, der Luftdichtigkeit, des Feuchte-, Grundwasser-, Schall- und Brandschutzes sowie etwaige negative Auswirkungen auf die Bauphysik, die theoretisch durch die nötigen Maßnahmen bedingt sein können.

Tabelle 3: Übersicht über die wichtigsten Interventionsstrategien der Radonsanierung, die entsprechende Radonreduktion und deren Kosten in Rahmen der entscheidungstheoretischen Modellierung

Sanierungsmaßnahme	Maximale Reduktion	Bemerkung	Anwendungsbereich und Ø Kosten (bestehende Gebäude)*			
			100–199 Bq/m ³	200–399 Bq/m ³	400–999 Bq/m ³	>1.000 Bq/m ³
Veränderung des Lüftungsverhaltens, der Raumnutzung	temporär –90 %	Keine oder geringe direkte Kosten, erhöht u. U. Energiekosten, Wirkung unterliegt starken Schwankungen	Ø Kosten: 500 €	Ø Kosten: 1.000 €	Ø Kosten: 3.000€	Ø Kosten: 5.000 €
einfache Abdichtungsmaßnahmen	–50 %	Als alleinige Maßnahme geringe Reduktion der Rn-Konzentration, häufig in Verbindung mit anderen Maßnahmen				
aufwändige Isolierschichten (Fußboden ohne Einbeziehung der Wände)	–80 %	Gefahr bauphysikalischer Nebeneffekte (z. B. Schädigung der Bausubstanz durch Feuchtigkeit)				
Aufwändige Isolierschichten inkl. Wände	–90 %	Optimaler Wirkungsgrad nur bei durchgängiger Sperrung mittels Folie				
Unterdruckhaltung/ Kellerentlüftung mittels Kleinventilator	–90 %					
Unterdruckhaltung innerhalb von Fußbodenkonstruktionen inkl. Wände	–90 %	abhängig von Art der abschließenden Wände				
Unterdruckhaltung unter dem Gebäude (Drainage, Punktabsaugung)	–95 %	Abhängig von Bodenpermeabilität, Lage der Drainagerohre				
Kombination aus aufwändiger Isolation in neuem Fußboden und Unterdruckhaltung unter Gebäude	–99 %	Lückenlose Isolierschicht				

* Angaben zu den Sanierungskosten beziehen sich auf durchschnittliche Gebäudegrößen

Quelle: eigene Darstellung nach EPA (2006), Hamel (1996), VDW (2005), APUG (2005)

4.6 Wesentliche populationsbezogene Parameter des entscheidungstheoretischen Modells

Alle Daten bezüglich Bevölkerungsstruktur (Populationsgröße, Bevölkerungsdichte, durchschnittliche Belegungsquote, etc. in den jeweils untersuchten Regionen) und Baubestand (regionalspezifische Anzahl und Art der Wohngebäude, Größe der Grundfläche, Anzahl der bewohnten Wohneinheiten, durchschnittliche Anzahl der Haushalte je Gebäude, etc.) in den untersuchten Regionen Deutschlands wurden den Publikationen des statistischen Bundesamts, welches diese bis zur Landkreisebene differenziert bereitstellt, für das Basisjahr der Untersuchung (2006) entnommen [39].

Es wird in Deutschland ein Bestand von insgesamt 17.742.413 Wohngebäuden mit 39.753.733 bewohnten Wohneinheiten und etwa 3,42 Mrd. m² Wohnfläche angenommen, wobei die Bevölkerungs- und Baustruktur, der Baubestand sowie die Besiedlungsdichte deutliche regionale Unterschiede aufweisen. Ein wesentlicher Parameter für die Kosteneffektivitätsanalyse ist die Belegungsquote in den betrachteten Regionen, da diese die Anzahl der Personen definiert, welche von einer Sanierungsmaßnahme oder einem radonsicheren Neubau im Einzelfall profitieren. Die durchschnittliche Anzahl der Bewohner beträgt für ganz Deutschland bei einer Gesamtbevölkerung von annahmegemäß 82.315.000 Personen rund 2,07 Personen je Wohneinheit. Auch dieser Wert variiert stark in Abhängigkeit von der betrachteten Region. So ist die Belegungsquote in weiten Teilen Ostdeutschlands deutlich geringer. Die niedrigsten Werte finden sich in den Städten Görlitz (1,48), Plauen (1,59) und Chemnitz (1,61), wohingegen bestimmte Regionen in Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Bayern eine signifikant höhere Belegungsquote aufweisen (bis maximal 2,8 Personen je Wohneinheit im Durchschnitt).

Im Rahmen der Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens wurden der Untersuchung im Hinblick auf alle relevanten Populations- und Gebäudestrukturdaten die Mittelwerte eines 10-Jahres Zeitraums (1997–2006) zu Grunde gelegt, um zu möglichst repräsentativen Ergebnissen für den Beobachtungszeitraum zu gelangen.

Innerhalb dieser Periode wurden in Deutschland im Durchschnitt jährlich 186.121 neue Wohngebäude mit 316.624 Wohneinheiten errichtet, wobei die Anzahl der Wohneinheiten je nach betrachteter Region erhebliche Unterschiede aufweist. Eine überdurchschnittliche Bautätigkeit findet sich im Beobachtungszeitraum insbesondere in Nordrhein-Westfalen (34.265 Gebäude, 61.527 Wohneinheiten), Bayern (32.563; 56.228) und Niedersachsen (24.009; 33.348). Circa 50 % aller Neubauten werden in diesen Regionen errichtet. Da nicht alle für die Analyse benötigten Strukturdaten auch für neu erbaute Gebäude zur Verfügung stehen, z. B. die durchschnittliche Haushaltsgröße, wird angenommen, dass die entsprechenden Werte bestehender Gebäude auf diese übertragen werden können. Basierend auf den oben genannten Zahlen, beziehen in Deutschland jährlich 668.077 Personen ein neu errichtetes Gebäude (= Studienpopulation der Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens in den Szenarien 4 und 5).

4.7 Ergebnisparameter der Kosteneffektivitätsanalyse

Als Ergebnisparameter der Szenarioanalyse gehen die Kosten je vermiedene Lungenkrebs-erkrankung, die Kosten je gewonnenes Lebensjahr sowie die Kosten je gewonnenes qualitätsadjustiertes Lebensjahr in das entscheidungstheoretische Modell ein.

QALYs sind ein in der gesundheitsökonomischen Evaluation anerkanntes Konzept zur Beurteilung der gesundheitsbezogenen Ergebnisse einer Intervention, welches sowohl die Dimensionen Lebensqualität als auch die in einem spezifischen Gesundheitszustand verbrachte Zeit in einer aggregierten Maßzahl vereint, mit dem Ziel Kosten-Nutzwert-Analysen durchführen zu können (vgl. Abbildung 5)¹⁶. Mittels Aggregation der Kennzahl über alle Individuen einer Studienpopulation kann die Veränderung der Gesundheit in dieser Population durch spezifische Interventionen den damit einhergehenden Kosten gegenübergestellt werden (vgl. auch Abbildung 5). Als generisches – d. h. krankheitsunabhängiges – Indexinstrument er-

¹⁶ Zum Verständnis des QALY-Konzepts vgl. folgendes Beispiel: 4 Jahre, die in einem um 75 % reduzierten Gesundheitszustand verbracht werden, entsprechen 2 Jahren, die in einem um 50 % reduzierten Gesundheitszustand verbracht werden, entsprechen 1 Jahr in vollständiger Gesundheit beziehungsweise einem QALY.

möglicht der Einsatz von QALYs auch den Vergleich zwischen ganz unterschiedlichen Krankheitsgebieten und/oder Interventionen und somit die objektive Bewertung eines spezifischen Kosten-Nutzwert-Verhältnisses in Relation zu anderen gesundheitsbezogenen Maßnahmen. Zu diesem Zweck sind die durchschnittliche in einem bestimmten Gesundheitszustand verbrachte Zeit sowie die Gesundheitsbeeinträchtigung während dieses Zeitraums in Form eines so genannten Utility Score im Intervall von 0–1 zu erfassen, wobei 0 den schlechtesten denkbaren Zustand beschreibt (für gewöhnlich den Tod des Individuums) und 1 einen Zustand vollständiger Gesundheit [62]. Einen Überblick über die verschiedenen verfügbaren Methoden der Ermittlung von Utility Scores für spezifische Gesundheitszustände gibt beispielsweise [63].

Ein Utility Score bezüglich an Lungenkrebs erkrankter Personen, gemessen mithilfe der visuellen Analogskala (VAS¹⁷) wie auch dem deskriptiven Klassifikationssystems im Rahmen des EuroQol 5D – eines generischen Instruments zur subjektiven Beschreibung und Bewertung von Gesundheitszuständen¹⁸ – ist lediglich für eine italienische Patientenpopulation verfügbar. Die Ergebnisse der Studie durch Trippoli et al. [64] weisen diesbezüglich einen Wert von 0,58 ($\sigma=0,2$) aus. Dieser geht in das Entscheidungsmodell ein, da für Deutschland keine spezifischen Daten verfügbar sind und die Ergebnisse von Gesundheitsmessungen mithilfe des EuroQol 5D-Instruments in europäischen Ländern zumeist eine hohe Ähnlichkeit aufweisen [65, 66]. Zudem zeigt eine internationale Vergleichsstudie [67], dass der durchschnittliche Gesundheitszustand der italienischen und deutschen Normalbevölkerung, gemessen mit dem EuroQol 5D sehr ähnlich ist. Hinzu kommt, dass insbesondere regionalspezifische Unterschiede bezüglich der Behandlungsqualität, die theoretisch den Utility Score der Erkrankten beeinflussen können, bei Lungenkrebs von untergeordneter Bedeutung sind, da kaum wirksame Therapien bestehen und ein Grossteil der Patienten innerhalb kurzer Zeit an der Krankheit verstirbt. In der Sensitivitätsanalyse werden Utility Scores für Lungenkrebs im In-

¹⁷ Auf der VAS wird der spezifische Gesundheitszustand durch ein Individuum auf einer Skala zwischen 0 und 100 angegeben

¹⁸ Vgl. <http://www.euroqol.org>

tervall 0,5–0,6 variiert, entsprechend den Werten, die von Clegg et al. [68] im Rahmen eines systematischen Reviews internationaler Studien ermittelt wurden.

Zur Berechnung des Gesundheitszuwachses durch Radoninterventionsstrategien in Form von QALYs muss ferner auch der durchschnittliche Gesundheitsstatus in der gesamten deutschen Bevölkerung berücksichtigt werden. In einer repräsentativen Untersuchung unter der deutschen Normalbevölkerung wurde mit der VAS ein Durchschnittswert von 0,774 ($\sigma=0,19$) ermittelt [69]. Um auf Basis der beschriebenen Daten die Anzahl gewonnener QALYs je verhinderten Lungenkrebsfall zu berechnen wird die folgende Formel zu Grunde gelegt:

$$QALY_{LK} = LE_{LK} * (US_{NB} - US_{LK}) + (LLY_{LK} * US_{NB})$$

wobei LE_{LK} die erwartete Restlebensdauer zum Zeitpunkt der klinischen Manifestation der Lungenkrebserkrankung darstellt; US_{LK} und US_{NB} bezeichnen die Utility Scores erkrankter Personen beziehungsweise der Normalbevölkerung (adjustiert für die erkrankten Personen) und LLY_{LK} die Zahl durchschnittlich durch Lungenkrebs verlorener Lebensjahre. Somit ergibt sich als beste Schätzung ein Wert von 11,6 gewonnenen QALYs je verhinderten Lungenkrebsfall. Sensitivitätsanalysen werden anhand der Unsicherheitsbereiche jedes Inputparameters zur QALY-Berechnung vorgenommen.

Mangels verfügbarer Daten unberücksichtigt bleiben in der Betrachtung etwaige Einschränkungen der Lebensqualität aufgrund möglicher psychischer Beeinträchtigungen durch die Unsicherheit, insbesondere bezüglich des Messergebnisses während der Dauer des Radonscreenings.

5. WEITERE GRUNDLEGENDE ANNAHMEN IM RAHMEN DER ENTSCHEIDUNGSTHEORETISCHEN MODELLIERUNG VON RADONINTERVENTIONSMAßNAHMEN

Zur Berechnung der Kosteneffektivität der Radonsanierung existierender Wohngebäude beziehungsweise des radonsicheren Bauens in Deutschland sind noch einige zusätzliche Annahmen zwingend erforderlich, die im folgenden Abschnitt kurz erläutert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die tatsächliche Innenraumbelastung ausschließlich über das Radonscreening präzise bestimmt werden kann und somit im Rahmen der Analyse der Radonsanierung existierender Wohngebäude in den universellen Screeningszenarien (S1 und 2) der gesamte Baubestand zu testen ist.

Darüber hinaus wird unterstellt, dass die Radonverteilung in Neubauten nach Baufertigstellung der Radonverteilung bestehender Gebäude in der jeweils betrachteten Region entspricht, wobei jedoch *a priori* keine Aussagen zur individuellen Belastung von Gebäuden möglich sind. Sanierungen werden annahmegemäß immer nur bei einem Testergebnis vorgenommen, welches das zuvor definierte Eingriffsniveau übersteigt. Interventionen bei geringeren Belastungen werden im Modell nicht berücksichtigt. Ferner wird gemäß [14] ein Zeitraum von zwei Jahren veranschlagt, innerhalb dessen Radonscreening und -intervention beziehungsweise der radonsichere Neubau abgeschlossen sind. Des Weiteren wird unterstellt, dass die Innenraumkonzentration mithilfe der Radonintervention nicht unter die durchschnittliche Außenluftkonzentration gesenkt werden kann. Alle Kosten und Effekte werden über eine Periode von insgesamt 40 Jahren betrachtet. Dieser Zeitraum entspricht annahmegemäß der durchschnittlichen Lebensdauer der Interventionsmaßnahme und wird in vielen internationalen Radoninterventionsstudien angesetzt (vgl. z.B.: [11-14, 70, 71]).

Ebenso liegt dem Modell die Annahme zu Grunde, dass sich exponierte und nicht-exponierte Personen sowie Bewohner von Neubauten und bestehenden Gebäuden innerhalb jeder der betrachteten räumlichen Einheiten – mit Ausnahme der Radonkonzentration – nicht systema-

tisch unterscheiden. Insbesondere wird eine innerhalb der betrachteten Region konstante, von der Radonbelastung unabhängige Exposition mit weiteren Risikofaktoren zu Grunde gelegt. Dagegen stellt die regionale Heterogenität, welche zwischen den untersuchten räumlichen Einheiten hinsichtlich dieser Faktoren besteht, einen expliziten Bestandteil der kleinräumigen Analysen auf unterschiedlichen regionalen Ebenen dar.

Die Bevölkerungsstruktur wird über den Beobachtungszeitraum hinweg konstant gehalten, entsprechend den Angaben des Statistischen Bundesamts (StBa) [37] für das zu Grunde liegende Basisjahr. Dementsprechend werden etwaige prognostizierte Änderungen der Bevölkerungsstruktur im Modell nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wird unterstellt, dass die Anzahl der Bewohner eines Gebäudes unabhängig ist von der Radonbelastung und dem Alter des Gebäudes. Infolge dessen kann implizit eine identische Radonverteilung für Gebäude und die darin lebenden Personen unterstellt werden.

Da die Kosten und vor allem auch die Effekte der Radonintervention teilweise erst mit erheblicher zeitlicher Verzögerung wirksam werden, kommt der Wahl der Diskontrate, welche den Umfang der Gegenwartspräferenz¹⁹ der Gesellschaft zum Ausdruck bringt, jeweils große Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang existieren für Deutschland bislang keinerlei verbindliche Vorgaben für Kosteneffektivitätsanalysen. Das US-amerikanische „Panel on cost effectiveness in Health“ empfiehlt eine identische Diskontrate für Kosten und Effekte von 3 % [72, 73], welche in vielen gesundheitsökonomischen Evaluationen Verwendung findet. Bezüglich gesundheitlicher Nutzenaspekte wird allerdings auch häufig eine geringere Diskontrate verwendet beziehungsweise in selteneren Fällen auch gänzlich auf die Diskontierung verzichtet. Begründet wird dies zumeist damit, dass Gesundheit kein Investitionsgut im eigentlichen Sinn darstellt [74]. Daher werden Kosten und Effekte der Radonintervention in dieser Studie gemäß den Vorgaben des Department on Health in Großbritannien [75] mit 3 % beziehungsweise 1,5 % diskontiert. Werte von 0 % und 5 % gehen jeweils in die Sensiti-

¹⁹ Eine niedrige Diskontrate hat die starke Gewichtung zukünftiger Interessen zur Folge, wohingegen eine hohe Diskontrate größeres Gewicht auf die gegenwärtige Wohlfahrt legt.

vitätsanalysen ein (für eine grundlegende Diskussion zu Diskontierung mit einem Fokus auf Umweltfragestellungen vgl. auch [76]).

6. ERGEBNISSE DES ARBEITSPAKET 2: ENTSCHEIDUNGSTHEORETISCHE MODELIERUNG ZUR KOSTENEFFEKTIVITÄT DER RADONINTERVENTION

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse der Radonsanierung bestehender Wohngebäude sowie des radonsicheren Bauens detailliert beschrieben. Dabei werden jeweils zunächst die Resultate der bundeseinheitlichen Interventionsstrategien erläutert. Anschließend erfolgt die Analyse für beide Interventionskontexte auf verschiedenen regionalen Ebenen:

- den 16 deutschen Bundesländern
- den 439 Landkreisen, einschließlich 116 kreisfreier Städte
- 2 unterschiedlich definierten Hochrisikogebieten mit überdurchschnittlicher Radonbelastung

6.1 Kosteneffektivität der Radonsanierung bestehender Wohngebäude

Die Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse von Radoninterventionen an existierenden Wohngebäuden beruhen auf der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Modellstruktur (vgl. auch Abbildung 4) und den in Tabelle 2 zusammengefassten Inputparametern. Es werden zunächst die Ergebnisse einer jeweils bundeseinheitlichen Umsetzung der betrachteten Strategien berichtet. Anschließend erfolgt die Analyse auf den verschiedenen untersuchten regionalen Ebenen.

6.1.1 Kosteneffektivität bundeseinheitlicher Radonsanierungsstrategien

Im Rahmen der Analyse bundeseinheitlicher Strategien der Radonsanierung werden die Ergebnisparameter der Szenarien 1–3 ohne regionale Differenzierung berechnet. Das heißt,

die betrachteten regulatorischen Eingriffe hinsichtlich Radonscreening und -sanierung übermäßig belasteter Gebäude gelten annahmegemäß für das gesamte Bundesgebiet.

6.1.1.1 Ergebnisse der deterministischen Analyse

Die zentralen Outcomeparameter der deterministischen Analyse des entscheidungstheoretischen Modells sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für jedes Szenario detailliert beschrieben.

Tabelle 4: Wesentliche Outcomeparameter der deterministischen Analyse für Radonsanierungen

Eingriffsniveau	Screeningkosten (a priori + kon- firmat.) ^a	Sanierungskosten (1. Maßnahme + Nachbesserung) ^a	Vermiedene Krankheits- kosten (direkt + indirekt) ^a	Nettogesamt- kosten ^a	Anzahl ver- miedener Lungenkrebs- fälle ^b	Anzahl gewonnener Lebensjahre	Anzahl gewonnener QALYs ^c	Kosten/ vermiedenen LK	Kosten/ gewonnenes Lebensjahr	Kosten / QALY ^{a,c}
A	B	C	D	E=B+C-D	F	G	H	I=E/F	J=E/G	K=E/H
Szenario 1: universelles Radonscreening und obligatorische Sanierung										
100 Bq/m ³	1.208.103.837	2.203.115.490	754.129.146	2.657.090.181	9.138	123.346	105.521	290.783	21.542	25.181
200 Bq/m ³	1.160.569.606	1.349.789.386	395.049.210	2.115.309.782	4.787	64.613	55.275	441.896	32.738	38.269
400 Bq/m ³	1.141.825.449	699.888.453	160.105.673	1.681.608.229	1.940	26.196	22.409	866.683	64.194	75.040
Szenario 2: universelles Radonscreening und fakultative Sanierung										
100 Bq/m ³	1.136.290.434	92.782.320	28.696.230	1.200.376.524	348	4.691	4.013	3.453.179	255.865	299.091
200 Bq/m ³	1.136.188.556	84.807.998	23.952.978	1.197.043.576	290	3.917	3.350	4.124.749	305.629	357.279
400 Bq/m ³	1.135.922.081	64.165.173	14.980.323	1.185.106.931	181	2.449	2.095	6.530.178	483.913	565.733
Szenario 3: fakultatives Radonscreening und fakultative Sanierung										
100 Bq/m ³	68.883.173	3.123.427	985.689	71.020.911	12	161	138	5.952.603	441.604	516.194
200 Bq/m ³	68.879.734	2.857.267	810.605	70.926.395	10	132	113	7.227.648	536.229	626.823
400 Bq/m ³	68.870.753	2.162.178	506.394	70.526.537	6	83	71	11.506.097	853.768	998.092

QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr

^a Alle Kostenparameter in €₂₀₀₆^c aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in dieser Darstellung nur QALYs als Outcomeparameter angegeben. Für eine detaillierte Analyse aller betrachteten Parameter siehe Text.

Quelle: eigene Darstellung

Base Case

Wenn keinerlei Maßnahmen zur Radonintervention unternommen werden, sterben jährlich bei einer durchschnittlichen Belastung von 44 Bq/m^3 Innenraumluft etwa 1.900 Personen (95 %-Konfidenzintervall: 652–4.759) an radoninduziertem Lungenkrebs. Über den gesamten Beobachtungszeitraum von 40 Jahren entspricht dies 75.840 Fällen. Direkte Behandlungskosten der Erkrankten und indirekte Kosten, verursacht durch Produktionsausfall (krankheitsbedingt sowie aufgrund vorzeitiger Todesfälle), belaufen sich für diese Fälle auf ca. 340 Mio. € pro Jahr beziehungsweise 6,81 Mrd. € für den gesamten Beobachtungszeitraum dieser Studie. Bei einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m^3 (200 Bq/m^3 ; 400 Bq/m^3) sind etwa 5,16 Mio. (1,78 Mio.; 0,45 Mio.) Personen in 2,50 Mio. (0,87 Mio. 0,32 Mio.) Haushalten mit unterschiedlich hohen Radonkonzentrationen $> \text{EN}$ belastet.

Szenario 1

In Szenario 1 betragen die Nettokosten für Screening und Sanierung aller betroffenen Wohngebäude abzüglich direkter und indirekter Kosten durch vermiedene Lungenkrebsfälle für ein Eingriffsniveau von 100 Bq/m^3 (200 Bq/m^3 ; 400 Bq/m^3) rund 2,66 Mrd. € (2,12 Mrd. €; 1,69 Mrd. €), wobei etwa 40 % (52 %; 67 %) der Aufwendungen allein durch das universelle Radonscreening entstehen. Die Sanierung der Gebäude einschließlich etwaiger Nachbesserungen verursacht Kosten von etwa 2,20 Mrd. € (1,35 Mrd. €; 0,70 Mrd. €). Die durchschnittliche Radonkonzentration in den belasteten Gebäuden kann durch diese Maßnahmen von 198 Bq/m^3 (327 Bq/m^3 ; 560 Bq/m^3) auf etwa 36 Bq/m^3 (62 Bq/m^3 ; 116 Bq/m^3) reduziert werden. Die Anzahl radonbedingter Lungenkrebserkrankungen sinkt dadurch um insgesamt 9.138 (4.787; 1.940) Fälle über den gesamten Beobachtungszeitraum, wobei Behandlungs- und Produktionsausfallkosten (direkte und indirekte Kosten) in Höhe von ca. 80,83 Mio. € (45,60 Mio. €; 19,29 Mio. €) jährlich eingespart werden können. Somit ergeben sich bei einer Diskontrate von 3 % für alle Kostenparameter und 1,5 % für Effektgrößen Aufwendungen von 290.783 € (441.896 €; 866.683 €) je verhinderten Lungenkrebs, 21.542 € (32.738 €;

64.194 €) je gewonnenes Lebensjahr und 25.181 € (38.269 €; 75.040 €) je gewonnenes qualitätsadjustiertes Lebensjahr.

Szenario 2

Szenario 2 weist gegenüber Szenario 1 ein deutlich schlechteres Kosteneffektivitätsverhältnis auf, da aufgrund der getroffenen Annahmen zur Compliance bei konstanten Kosten für das universelle Radonscreening – abhängig von dem jeweiligen Eingriffsniveau – nur 3,4–14,9% der Gebäude mit Innenraumkonzentrationen >EN tatsächlich saniert werden. Die Nettokosten für Screening und Sanierung abzüglich direkter und indirekter Krankheitskosten betragen bei einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ (200 Bq/m³; 400 Bq/m³) 1,20 Mrd. € (1,19 Mrd. €; 1,18 Mrd. €). Durch die Sanierung belasteter Gebäude sinkt die Lungenkrebsinzidenz insgesamt um 348 (290; 181) Fälle. Somit ergeben sich Kosten von 3.453.179 € (4.124.749 €; 6.530.178 €) je verhinderten Lungenkrebsfall, 255.865 € (305.629 €; 483.913 €) je gewonnenes Lebensjahr und 299.091 € (357.729 €; 565.733 €) je gewonnenes QALY.

Szenario 3

Interventionsszenario 3, welches nach Bereitstellen entsprechender Informationen und Empfehlungen vollständig auf eigenverantwortliches Testen und Sanieren belasteter Wohngebäude setzt, erweist sich als Strategie mit dem vergleichsweise ungünstigsten inkrementellen Kosteneffektivitätsverhältnis. Bei einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ (200 Bq/m³; 400 Bq/m³) werden unter den getroffenen Annahmen zur Compliance lediglich 0,11 % (0,26 %; 0,5 %) der Gebäude mit einer Belastung, die das jeweilige Eingriffsniveau übersteigt, saniert. Die Lungenkrebsinzidenz kann bei Nettokosten von insgesamt 71,02 Mio. € (70,93 Mio. €; 70,53 Mio. €) um insgesamt lediglich 12 (10; 6) Fälle gesenkt werden, da nur ein Bruchteil der Gebäude mit Radonbelastungen über dem Eingriffsniveau letztlich saniert wird. Dabei fallen Aufwendungen in Höhe von 5.952.603 € (7.227.648 €; 11.506.097 €) je verhinderten Lungenkrebsfall an. Die Kosten für ein gewonnenes Lebensjahr sowie ein ge-

wonnenes QALY betragen 441.604 € (536.229 €; 853.768 €) beziehungsweise 516.194 € (626.823 €; 998.092 €).

6.1.1.2 Ergebnisse der uni- und multivariaten deterministischen Sensitivitätsanalysen

Da die einzelnen Inputparameter des entscheidungstheoretischen Modells teilweise durch große Unsicherheitsbereiche gekennzeichnet sind, wurden umfangreiche deterministische und probabilistische Sensitivitätsanalysen in der Modellierung berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen der deterministischen Sensitivitätsanalyse zunächst eine multivariate Extremwertanalyse durchgeführt. Dabei werden für alle unsicheren Modellparameter gleichzeitig jeweils die extremsten Ausprägungen, die durch die entsprechenden Konfidenzbereiche abgedeckt sind, in das Modell implementiert, so dass sie sich insgesamt maximal zu Gunsten beziehungsweise gegen die Kosteneffektivität der jeweils betrachteten Handlungsalternative auswirken. Mithilfe der Extremwertanalyse kann somit geprüft werden, ob ein bestimmtes Ergebnis auch unter extremen Annahmen, die durch die Unsicherheit der Inputparameter gerade noch gerechtfertigt sind, stabil bleibt. Man erhält somit Best-Case- und Worst-Case-Szenarien für jede Interventionsstrategie.

Es zeigt sich, dass die Unsicherheitsbereiche für die Kosteneffektivität der einzelnen Interventionsstrategien sehr groß sind, wenn alle Modellparameter extreme Ausprägungen annehmen. Die Variationsbreite bezüglich der Kosten eines gewonnenen QALYs im kosteneffektivsten Szenario 1 (S1) in Kombination mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ erstreckt sich beispielsweise von 415 € im günstigsten bis zu 318.384 € im ungünstigsten Fall. Das heißt, dass unter Berücksichtigung der maximalen Parameterunsicherheit hinsichtlich des Modells die verpflichtende Messung und Sanierung von Wohngebäuden mit einer Belastung von mehr als 100 Bq/m³ sowohl annähernd Kosten sparend als auch exorbitant unwirtschaftlich sein kann. Die höchsten Kosten je QALY in den Szenarien 2 und 3 (EN=400 Bq/m³) betragen mindestens 91.511 € beziehungsweise 126.677 € und höchstens 6.643.738 € beziehungsweise 16.587.809 €. Die Ergebnisse der multivariaten Extremwertanalyse der

Kosteneffektivität der Radonsanierung im Rahmen des entscheidungstheoretischen Modells sind für alle Szenarien in Kombination mit allen Eingriffsniveaus in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der multivariaten Extremwertanalyse bezüglich der Ergebnisparameter des entscheidungstheoretischen Modells für die Radonsanierung (Beobachtungszeitraum: 40 Jahre)

Eingriffsniveau	Kosten/ vermiedenen Lungenkrebs (in € ₂₀₀₆)		Kosten/ gewonnenes Lebensjahr (in € ₂₀₀₆)		Kosten/ QALY (in € ₂₀₀₆)	
	Best Case*	Worst Case**	Best Case*	Worst Case**	Best Case*	Worst Case**
Szenario 1: universelles Radonscreening und obligatorische Sanierung						
100 Bq/m ³	6.747	2.364.875	384	250.066	415	318.384
200 Bq/m ³	46.516	3.005.813	2.649	317.840	2.862	404.674
400 Bq/m ³	167.328	5.207.616	9.527	550.663	10.295	701.103
Szenario 2: universelles Radonscreening und fakultative Sanierung						
100 Bq/m ³	841.516	31.669.737	47.914	3.348.814	51.776	4.263.708
200 Bq/m ³	978.315	33.520.339	55.703	3.544.500	60.192	4.512.855
400 Bq/m ³	1.487.345	49.347.998	84.686	5.218.145	91.511	6.643.738
Szenario 3: fakultatives Radonscreening und fakultative Sanierung						
100 Bq/m ³	1.172.595	78.494.575	66.765	8.300.156	72.146	10.567.751
200 Bq/m ³	1.360.296	83.188.083	77.452	8.796.456	83.694	11.199.640
400 Bq/m ³	2.058.901	123.210.034	117.229	13.028.448	126.677	16.587.809

QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr

*** Der Best Case beziehungsweise Worst Case wird erzeugt, indem alle unsicheren Parameter auf einen durch den Unsicherheitsbereich definierten Extremwert gesetzt werden, der sich maximal zu Gunsten beziehungsweise Ungunsten der Kosteneffektivität des betrachteten Szenarios auswirkt.

Quelle: eigene Darstellung

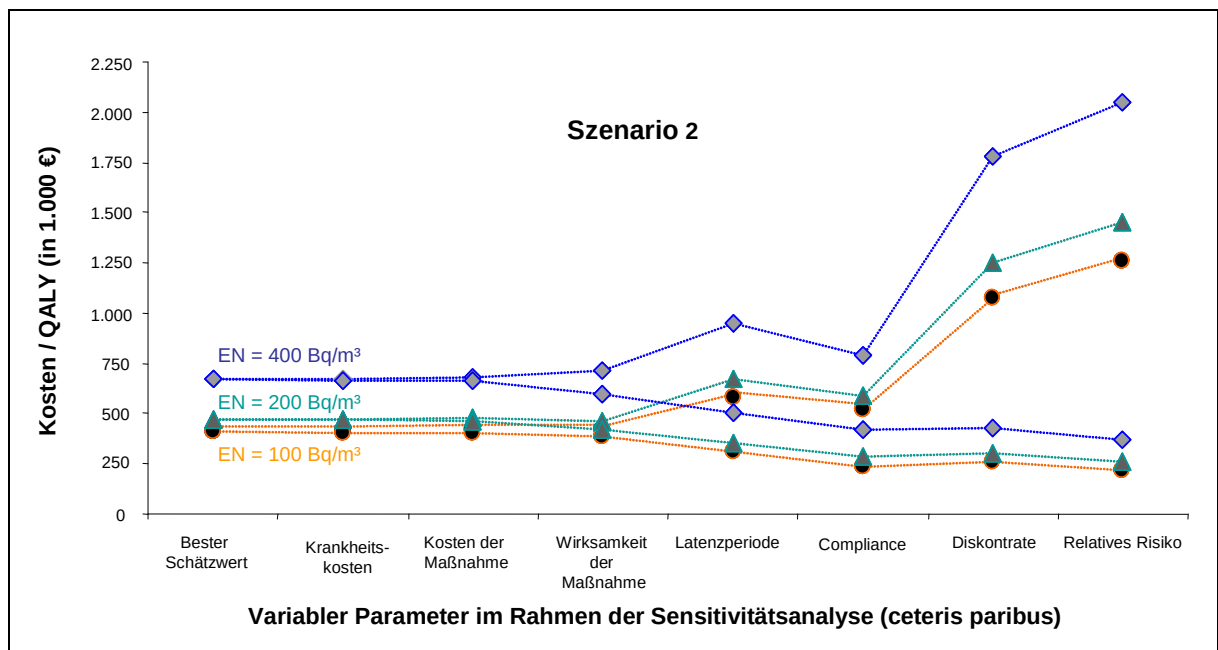
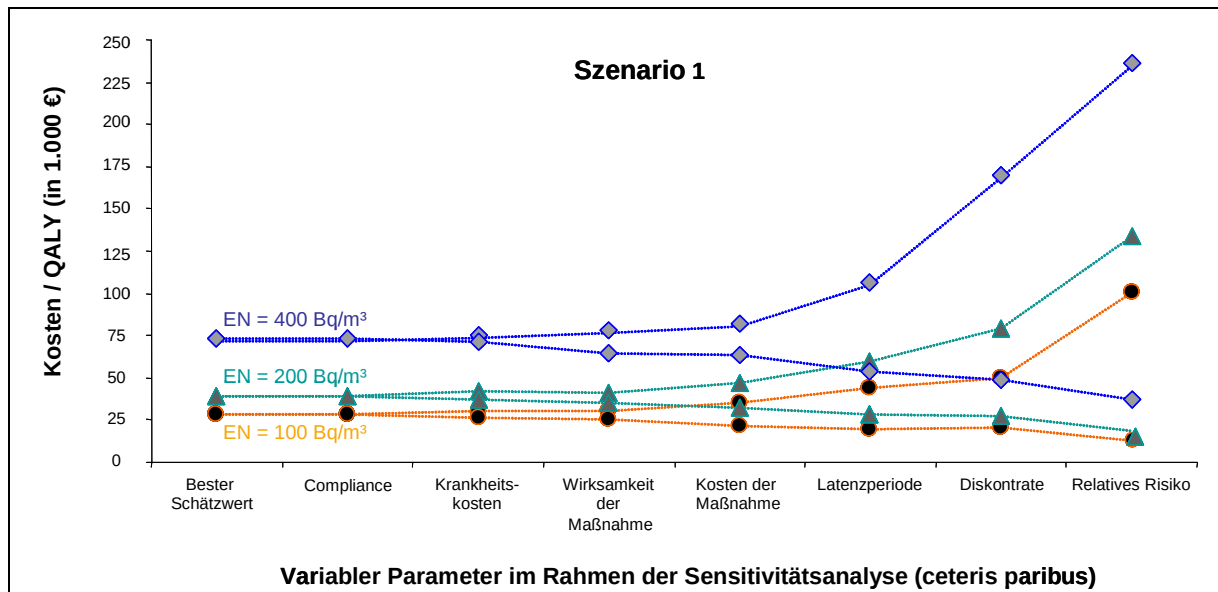
Neben der multivariaten deterministischen Sensitivitätsanalyse wurden auch univariate Extremwertanalysen durchgeführt. Dabei wird jeweils nur eine variable Größe verändert. Alle anderen Modellparameter gehen mit dem besten Schätzwert in die Berechnung ein (ceteris paribus), um somit den Einfluss eines jeden Werts auf das Gesamtergebnis quantifizieren zu können (vgl. Abbildung 13 für einen Überblick über den Einfluss der wichtigsten Parameter auf die Kosteneffektivität der Radonsanierung).

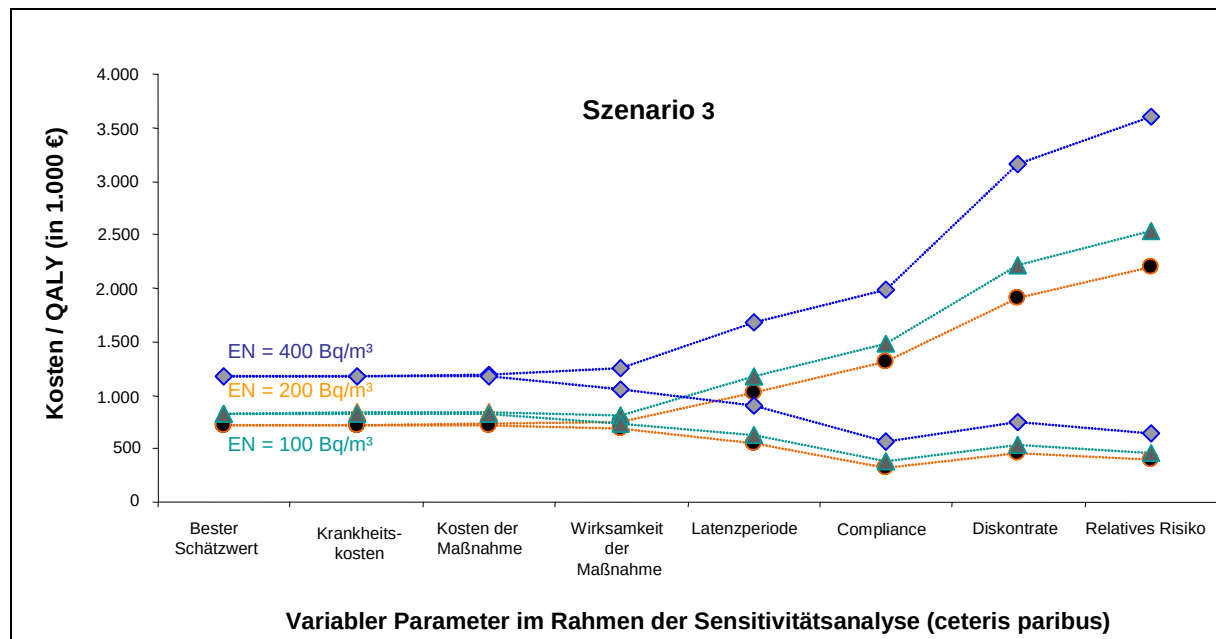
Dabei weist die Unsicherheit bezüglich des relativen Risikos der Radonexposition in jedem Szenario den stärksten Einfluss auf die Kosteneffektivität auf. In Szenario 1 (2; 3) sind etwa

30 % (25 %; 20 %) der Ergebnisvariation allein auf diesen Faktor zurückzuführen. Ein vergleichbarer Einfluss (15 %–25 %) geht aufgrund der langen Beobachtungsperiode von den verwendeten Diskontraten im Intervall von 0–5 % aus. Ferner ist das Ergebnis – insbesondere in Szenario 1 – in relativ hohem Maße von der jeweils berücksichtigten Latenzzeit bis zur klinischen Manifestation der Erkrankung abhängig (circa 5–8 %). Rund 6 % beziehungsweise 10 % der Variation in Szenario 2 und 3 sind durch die Compliance mit Richtlinien zur Radonintervention bestimmt. Definitionsgemäß hat diese jedoch aufgrund des universellen Screenings und der obligatorischen Sanierung keinen Einfluss auf die Modellergebnisse von Szenario 1.

Kontraintuitiv sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse hingegen in Bezug auf die verschiedenen Kostenparameter der Modellierung. Hat die Variation der Sanierungskosten in S1 und S2 noch einen vergleichsweise hohen Einfluss auf die Kosteneffektivität der Radon-sanierung (2,8–6 % je nach Eingriffsniveau), so ist dieser in S2 und S3 sehr gering (0,25–0,75 %). Ebenso beeinflusst die Variation der direkten und indirekten Kosten der Lungenkrebserkrankung im analysierten Intervall das Ergebnis nur unwesentlich (<1 %). Der schwache Zusammenhang zwischen diesen Faktoren und den Modellergebnissen ist dabei vor allem auf den hohen Anteil des konstanten Screeningaufwands an den Gesamtkosten der Intervention zurückzuführen, da je nach Szenario und Eingriffsniveau nur ein verhältnismäßig kleiner Anteil der getesteten Gebäude letztlich saniert wird. Die betrifft erwartungsgemäß insbesondere diejenigen Szenarien, die verstärkt auf die Compliance setzen. Innerhalb des definierten Unsicherheitsbereichs beeinflusst auch die Wirkung der Interventionsmaßnahme die Kosteneffektivität nur in vergleichsweise geringem Umfang. Ca. 2 % der Ergebnisvariation sind durch diesen Faktor bestimmt.

Abbildung 13: Univariate Extremwertanalyse der wichtigsten Modellparameter (ceteris paribus)





EN = Eingriffsniveau; QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr

Hinweis: die X-Achse zeigt die spezifischen Parameter, für welche jeweils die höchsten und niedrigsten Werte in das Modell implementiert werden (ceteris paribus). Die Y-Achse zeigt den korrespondierenden Effekt auf das Modellergebnis (die Skalierung variiert zwischen den einzelnen Darstellungen).

Quelle: eigene Darstellung

6.1.1.3 Ergebnisse der probabilistischen Sensitivitätsanalysen

Die probabilistische Sensitivitätsanalyse ist ein entscheidungsanalytisches Instrument, bei dem einzelnen, mit Unsicherheit behafteten Parametern geeignete statistische Verteilungen zugeordnet werden. Unter Verwendung eines Zufallsgenerators werden dann für jeden dieser unsicheren Parameter simultan Zufallswerte aus den jeweils definierten Verteilungen gezogen und das Modellergebnis auf Basis der gewonnenen Parameterausprägungen berechnet. Bei ausreichend häufiger Wiederholung der beschriebenen Prozedur können somit Verteilungen der Ergebnisparameter gewonnen werden. Dieses stochastische Verfahren, mithilfe wiederholter Zufallsberechnungen Effektverteilungen in unabhängig wiederholten Durchläufen des Modells zu erzielen, wird auch als Monte-Carlo-Simulation²⁰ bezeichnet.

²⁰ Die Monte-Carlo-Simulation weist gewisse Ähnlichkeiten mit dem Bootstrapping auf, wobei der wesentliche Unterschied darin besteht, dass Letztgenanntem eine einzelne Stichprobe aus der Grundgesamtheit zu Grunde liegt (Monte-Carlo-Simulationen basieren dagegen wie im vorliegenden Fall auf einem Datengenerierungsprozess mit bekannten Parametern).

Im Rahmen der probabilistischen Sensitivitätsanalyse in dieser Studie wurden für jeden variablen Parameter beziehungsweise für jede Parametergruppe des Modells Verteilungen gemäß [77, 78] spezifiziert (vgl. Tabelle 6 für eine Übersicht der verwendeten Verteilungen).

Tabelle 6: Parameterverteilungen der probabilistischen Sensitivitätsanalyse

Parameter(-gruppe)	Verteilungsannahme
Radonbelastung	
Innenraumkonzentration	Lognormalverteilung
Lungenkrebs	
Relatives LK-Risiko	Lognormalverteilung
YLL je Lungenkrebsfall	Normalverteilung
Utility Scores	β -Verteilung
Latenzzeit	Normalverteilung
Restlebenserwartung	Normalverteilung
Kosten des LK	γ -Verteilung
Radonmessung und -intervention	
Testgüte	Normalverteilung
Sanierungskosten	γ -Verteilung
Wirkung der 1. Maßnahme	β -Verteilung
Wirkung der Nachbesserung	β -Verteilung
Compliance	
(Konfirmatorischen) Test kaufen, durchführen, Sanieren, Nachbessern	β -Verteilung

Quelle: eigene Darstellung

Mithilfe eines Zufallszahlengenerators wurden im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation mit 5.000 Wiederholungen Werte aus diesen Verteilungen gezogen und auf Basis der 2,5- und 97,5-Perzentile der resultierenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Outcomeparameter 95 %-Konfidenzintervalle für die Kosteneffektivität der einzelnen Szenarien und Eingriffsniveaus geschätzt. Die probabilistischen Modellergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der probabilistischen Analyse von Radonsanierungsmaßnahmen (beste Schätzung und 95 % KI) für Diskontraten von 3 % (Kosten) und 1,5 % (Effekte) über den gesamten Beobachtungszeitraum

Eingriffsniveau	Kosten / vermiedener Lungenkrebs (in € ₂₀₀₆)	Kosten / gewonnenes Lebensjahr (in € ₂₀₀₆)	Kosten / gewonnenes QALY (in € ₂₀₀₆)
Szenario 1: universelles Radonscreening und obligatorische Sanierung			
100 Bq/m³	290.783	21.542	25.181
95 %-KI	84.218 – 998.828	6.228 – 77.958	7.371 – 90.593
200 Bq/m³	441.896	32.738	38.269
95 %-KI	158.680 – 1.419.220	11.446 – 111.791	13.517 – 128.516
400 Bq/m³	866.683	64.194	75.040
95 %-KI	352.574 – 2.614.187	25.034 – 205.083	29.847 – 241.336
Szenario 2: universelles Radonscreening und fakultative Sanierung			
100 Bq/m³	3.453.179	255.865	299.091
95 %-KI	1.512.712 – 10.246.390	107.609 – 798.173	127.218 – 912.002
200 Bq/m³	4.124.749	305.629	357.279
95 %-KI	1.813.017 – 12.364.020	128.352 – 974.664	150.681 – 1.125.602
400 Bq/m³	6.530.178	483.913	565.733
95 %-KI	2.851.377 – 19.996.272	202.463 – 1.566.675	240.449 – 1.831.015
Szenario 3: fakultatives Radonscreening und fakultative Sanierung			
100 Bq/m³	5.952.603	441.604	516.194
95 %-KI	2.532.500 – 18.439.678	183.884 – 1.432.058	216.136 – 1.664.953
200 Bq/m³	7.227.648	536.229	626.823
95 %-KI	3.094.365 – 22.800.194	222.096 – 1.773.986	263.381 – 2.047.420
400 Bq/m³	11.506.097	853.768	998.092
95 %-KI	4.864.284 – 37.234.099	351.540 – 2.875.680	417.808 – 3.331.200

KI = Konfidenzintervall; QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr

Quelle: eigene Darstellung

Bei EN=100 Bq/m³ (200 Bq/m³; 400 Bq/m³) beispielsweise liegen 95 % der Simulationsergebnisse für die Kosten je QALY in Szenario 1 zwischen 7.371 € und 90.593 € (13.517 €–128.516 €; 29.847 €–241.336 €). Die höchsten Kosten je QALY in Szenario 3 bewegen sich zwischen 216.136 € und 1.664.953 € (263.381 €–2.047.420 €; 417.808 €–3.331.200 €). Die 95 %-Konfidenzintervalle sind insgesamt erwartungsgemäß deutlich schmäler, als die Unsicherheitsbereiche der deterministischen Extremwertanalyse (vgl. Tabelle 4), da hier auch die Wahrscheinlichkeit mit der jeder Inputparameter eine spezifische Ausprägung annimmt explizit berücksichtigt wird.

Neben der tabellarischen Darstellung sind die Ergebnisse der probabilistischen Sensitivitätsanalyse in Abbildung 14 auch in Form einer so genannten cost effectiveness acceptability curve dargestellt. Diese bildet, in Abhängigkeit von der (hypothetischen) maximalen Zahlungsbereitschaft für ein QALY ($=WTP_{\max}$), für jede der untersuchten Handlungsalternativen die Wahrscheinlichkeit ab, die kosteneffektivste Strategie zu sein. Das Konzept der CEAC beruht dabei auf dem Net-Benefit-Ansatz.

Der Vorteil des Verfahrens gegenüber dem Standardansatz probabilistischer Analysen ist vor allem darin begründet, dass der gewonnene Kosteneffektivitätswert durch die Umformulierung in den Nettonutzen (= Net Benefit) eindeutig wird, d. h. eine Maßnahme ist nur dann kosteneffektiver als die betrachtete Alternative, wenn der Nettonutzen größer 0 ist. Die Transformation in den Net Benefit erlaubt es darüber hinaus, mit linearen Kombinationen zu arbeiten, statt immer zwei Verteilungen zu multiplizieren [79].

Um die Berechnung monetärer Werte zu ermöglichen, ist es jedoch notwendig, auch die Effektivitätseinheiten (z.B. gewonnene QALYs) in Geldeinheiten zu transformieren. Dies wird durch die Einführung eines Wertes λ (Lambda) erreicht:

$$ICER = \Delta \text{Kosten} / \Delta \text{Effekte} < \lambda$$

wobei (hypothetische) Werte für λ die maximale Zahlungsbereitschaft pro zusätzlichem Effekt einer Maßnahme (z. B. ein zusätzliches gewonnenes QALY) gegenüber der zu untersuchenden Alternative angeben. Der Net-Benefit (NB) wird dann berechnet als Produkt aus dem inkrementellen Effekt und dem Preis, den (in diesem Fall) die Gesellschaft pro zusätzlicher Einheit an Effektivität maximal bereit ist zu zahlen (λ), abzüglich den zugehörigen inkrementellen Kosten:

$$NB = \lambda * \Delta \text{Effekte} - \Delta \text{Kosten}$$

Im Modell werden für jedes der 5.000 Simulationsergebnisse im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation und jeden Wert für λ zwischen 0 und 100.000 € die zugehörigen Net-Benefits

berechnet und die jeweils kosteneffektive Strategie ermittelt. So kann für jede (hypothetische) Zahlungsbereitschaft für ein zusätzliches QALY innerhalb dieses Intervalls die optimale Handlungsalternative identifiziert werden.

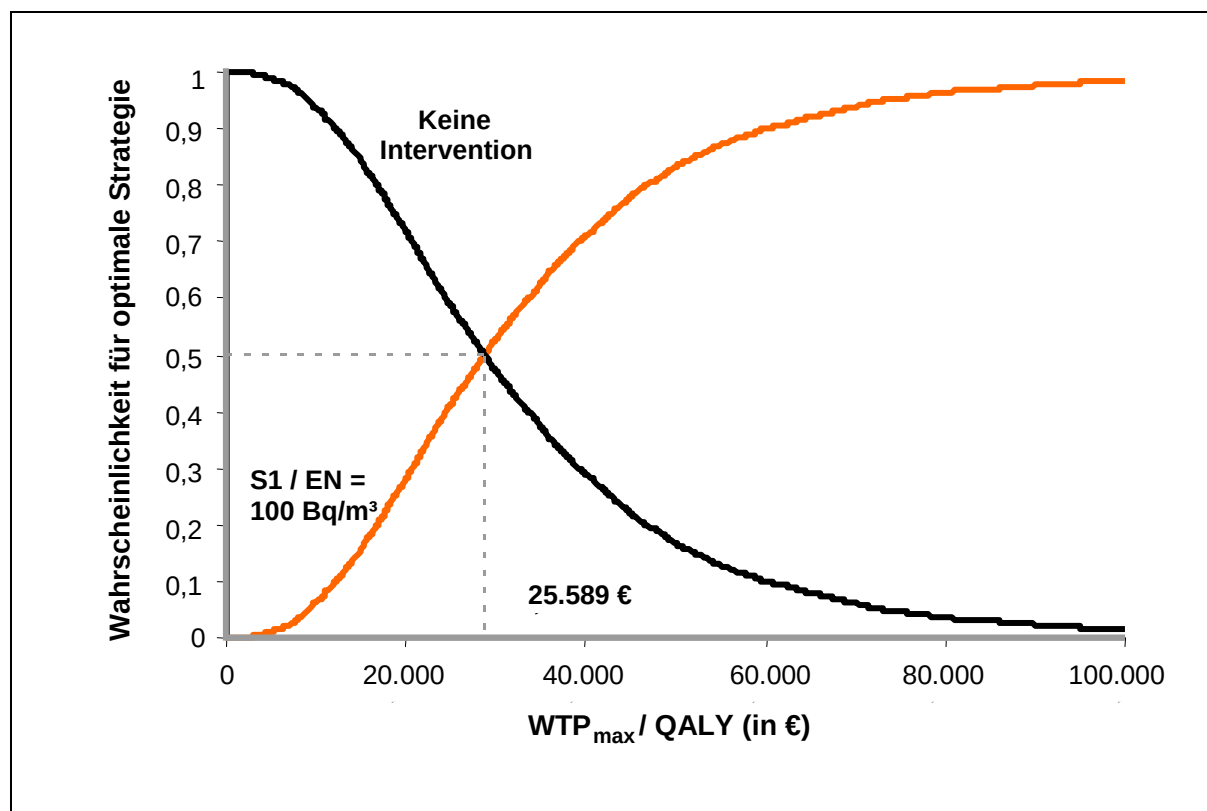
Die grafische Darstellung der Ergebnisse dieser Berechnungen in Abbildung 14 zeigt, dass für eine maximale Zahlungsbereitschaft von weniger als 25,589 €, welche definitionsgemäß dem Median der Verteilung der ICER von Szenario 1 entspricht, das Aufrechterhalten des Status Quo und somit der Verzicht auf jedwede Radoninterventionsmaßnahmen mit der höchsten Wahrscheinlichkeit die kosteneffektive Strategie darstellt. Die ist darin begründet, dass der Gewinn zusätzlicher QALYs in mehr als 50 % der Realisationen der Monte Carlo Simulation geringer bewertet wird, als die entsprechenden Kosten in einem der Szenarien. Mit zunehmender Zahlungsbereitschaft steigt die Wahrscheinlichkeit des ersten Szenarios bei $EN = 100 \text{ Bq/m}^3$ kosteneffektiv zu sein überproportional an.

Die Wahrscheinlichkeit aller anderen Strategien unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten das best mögliche Kosteneffektivitätsverhältnis aufzuweisen ist dagegen für kein $WTP_{\max}$ größer als 0, da diese immer von der Alternative dem Status Quo beizubehalten beziehungsweise Szenario 1 dominiert werden. In der CEAC erscheinen sie daher in dieser Darstellung nicht.

Abbildung 15 erweitert das beschriebene Konzept der CAEC und zeigt die Simulationsergebnisse auch in Form einer cost effectiveness acceptability frontier. Bei diesem Instrument wird die optimale Strategie nicht ausschließlich anhand der Wahrscheinlichkeit einer jeden Strategie Kosteneffektiv zu sein, sondern vielmehr anhand des Erwartungswerts der Net-Benefits für jeden Wert von λ bestimmt. Das heißt, eine Handlungsoption kann einer anderen auch dann überlegen sein, wenn sie mit geringerer Wahrscheinlichkeit zu einem besseren Ergebnis führt, vorausgesetzt sie weist einen entsprechend höheren zu erwartenden Nettonutzen auf. Es zeigt sich in dieser Darstellung, dass Szenario 1 mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m^3 bereits ab einer Zahlungsbereitschaft $>25.181 \text{ €/QALY}$ den höchsten Erwartungswert aufweist und daher ab diesem Wert die optimale Strategie darstellt, welche

allen anderen Handlungsalternativen, zumindest aus der Perspektive der Wirtschaftlichkeit, überlegen ist.

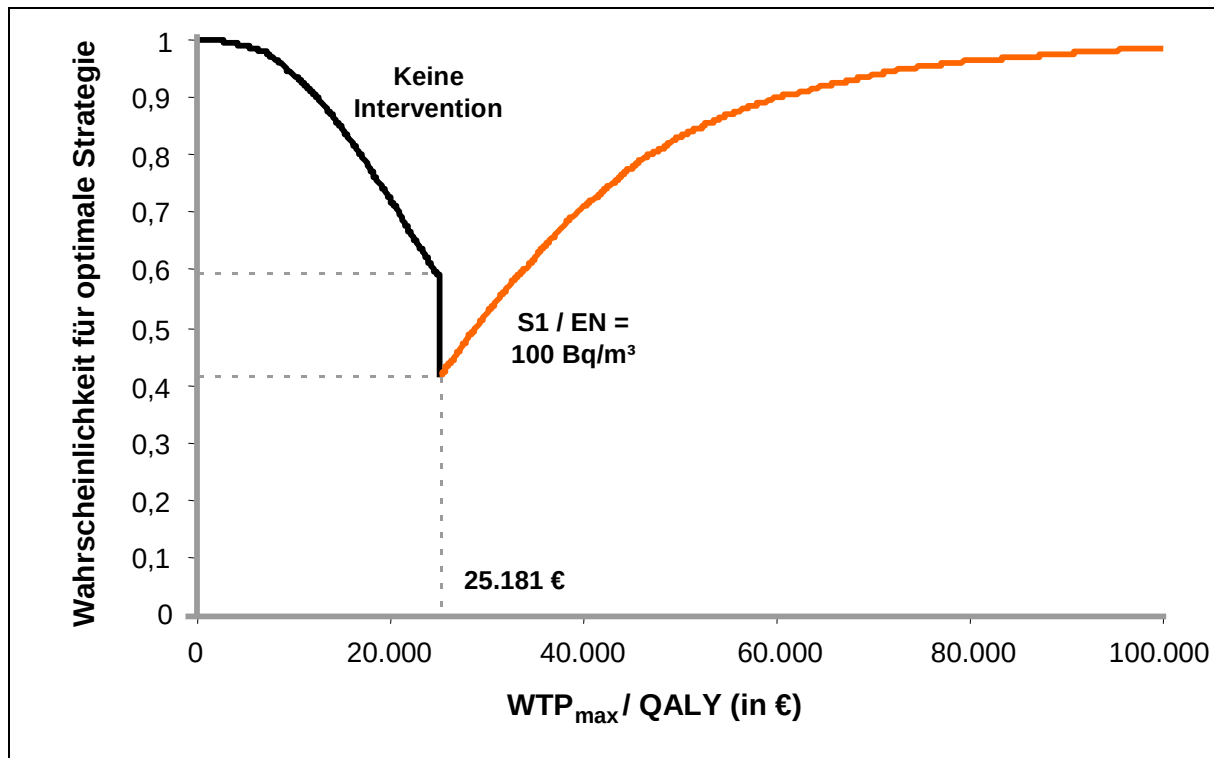
Abbildung 14: Cost-effectiveness acceptability curve



QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr
 EN = Eingriffsniveau
 S1 = Szenario 1
 WTP_{max} = maximale Zahlungsbereitschaft für ein QALY

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 15: Cost-effectiveness acceptability frontier



QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr
 EN = Eingriffsniveau
 S1 = Szenario 1
 WTP_{max} = maximale Zahlungsbereitschaft für ein QALY

Quelle: eigene Darstellung

6.1.2 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung auf Bundeslandebene

Im Rahmen der regional differenzierten Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung wurde das entscheidungstheoretische Modell zunächst für jedes der 16 deutschen Bundesländer separat berechnet. Die Modellanalyse erfolgt dabei analog zu der KEA bundeseinheitlicher Interventionsstrategien für die Szenarien 1–3 in Kombination mit Eingriffsniveaus von 100, 200 und 400 Bq/m³ Innenraumluft. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden unmittelbar die Ergebnisse der probabilistischen Analyse berichtet. Angaben zu Konfidenzintervallen basieren wiederum auf Monte-Carlo-Simulationen mit 5.000 Wiederholungen (vgl. 6.1.1.3), die für jedes Bundesland separat durchgeführt wurden.

Die regionale Verteilung der Modellergebnisse zeigt dabei erwartungsgemäß ein sehr heterogenes Bild (vgl. Abbildung 16 für eine Übersicht über die Modellergebnisse für alle Szenarien und Eingriffsniveaus).

Insgesamt dominiert jedoch auch für jedes Bundesland Szenario 1 mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ Innenraumluft alle anderen untersuchten Handlungsalternativen und stellt somit die optimale Interventionsstrategie dar. Das beste Kosteneffektivitätsverhältnis besteht dabei für das Bundesland Sachsen-Anhalt. Die Kosten je gewonnenes QALY²¹ betragen mit 16.984 € (95 %-KI: 3.555–62.197€) nur etwa 2/3 der Kosten einer bundseinheitlichen Umsetzung der Strategie. Dabei können etwa 826 Lungenkrebsfälle über den gesamten Betrachtungszeitraum (40 Jahre) verhindert werden. Ein überdurchschnittlich positives Kosteneffektivitätsverhältnis findet sich auch für die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern (18.229 €; 95 %-KI: 4.338–66.432 €; 452 vermiedene Fälle), Saarland (19.521 €; 95 %-KI: 7.774–72.664 €; 151 vermiedene Fälle), Thüringen (21.283 €; 95 %-KI: 6.320–72.803 €; 891 vermiedene Fälle) und Sachsen (22.974 €; 95 %-KI: 6.668–80.058 €; 1.215 vermiedene Fälle). Die Stadtstaaten Bremen (52.060 €, 95 %-KI: 18.720–168.916 €; 17 vermiedene Fälle) und Berlin (46.954 €, 95 %-KI: 15.308–169.805 €; 49 vermiedene Fälle) sowie das Bundesland Brandenburg (51.047 €, 95 %-KI: 18.367–161.342 €; 89 vermiedene Fälle) weisen dagegen die höchsten Kosten je QALY auf.

Insgesamt zeigt die Analyse, dass diejenigen Bundesländer, welche durch überdurchschnittliche Radonbelastungen gekennzeichnet sind, erwartungsgemäß geringere Kosten je gewonnenes qualitätsadjustiertes Lebensjahr aufweisen, da weniger Wohnhäuser getestet werden müssen, um ein sanierungsbedürftiges Gebäude zu identifizieren. So kann letztlich ein höherer durchschnittlicher Effekt je durchgeführte Interventionsmaßnahme erzielt werden.

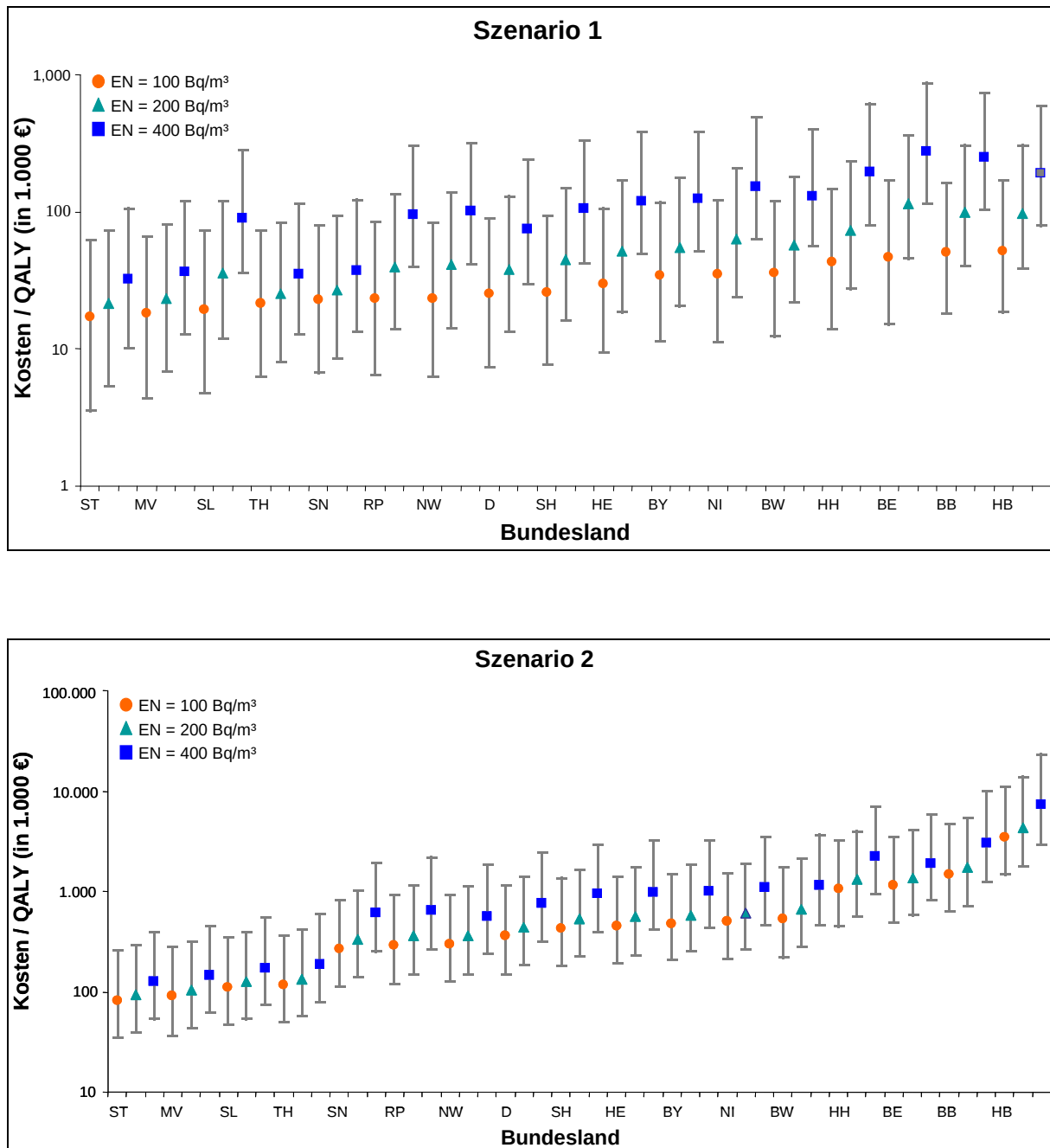
²¹ Alle Modellberechnungen wurden mit vermiedenen Lungenkrebsfällen, gewonnenen Lebensjahren und gewonnenen QALYs als Ergebnisparameter durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sowie einer besseren Vergleichbarkeit bleibt die Darstellung der Kosteneffektivität im weiteren Verlauf auf Kosten/ QALY beschränkt.

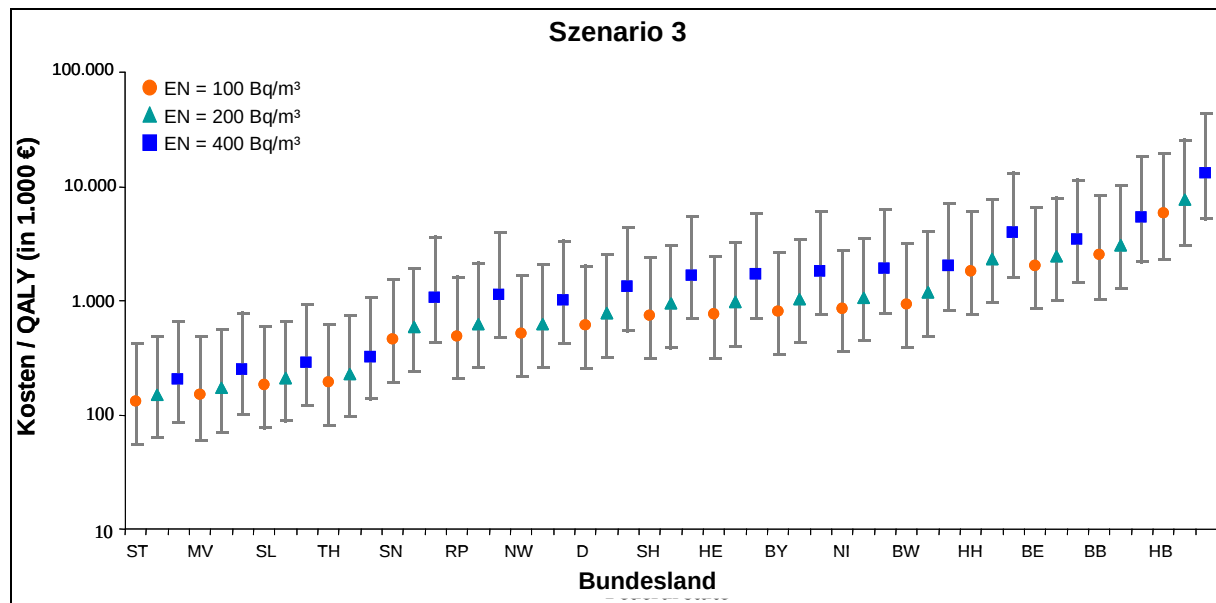
Jedoch können nicht alle regionalen Unterschiede hinsichtlich der Kosteneffektivität von Sanierungsmaßnahmen alleine durch die abweichende Höhe der Radonkonzentration erklärt werden. Diese werden auch durch weitere, regional heterogen verteilte Faktoren, insbesondere die Exposition mit radon-unabhängigen kanzerogenen Noxen, die unter anderem das Basisrisiko der Lungenkrebserkrankung determinieren, sowie Unterschieden in der Bevölkerungsstruktur signifikant beeinflusst. Besonders deutlich wird dies am Beispiel des Bundeslandes Saarland. Aufgrund des höheren Basisrisikos – neben anderen Einflussfaktoren verursacht durch eine überdurchschnittliche Rauchprävalenz – ist die Kosteneffektivität in Szenario 1 für $EN=100 \text{ Bq/m}^3$ vergleichsweise günstig. In S2 und S3 sowie für höhere EN kommt jedoch verstärkt die Tatsache zu tragen, dass der Anteil an Wohngebäuden mit hohen Belastungen nur geringfügig über dem Bundesdurchschnitt liegt. Dementsprechend ist das Kosteneffektivitätsverhältnis hinsichtlich dieser Strategien deutlich schlechter, als in Bundesländern mit vergleichsweise hohen Radonkonzentrationen, da überproportional weniger Sanierungen durchgeführt werden und dies nicht durch den größeren Effekt der Sanierung im Einzelfall – z. B. aufgrund des höheren Basisrisikos – kompensiert werden kann.

Anhand der Ergebnisse wird ferner deutlich, dass auch die Unterschiede zwischen den betrachteten Eingriffsniveaus aus der Perspektive der Kosteneffektivität in den Bundesländern mit hohen Radonmesswerten signifikant geringer ausfallen, da der Anteil an Gebäuden mit Belastungen > 200 beziehungsweise $> 400 \text{ Bq/m}^3$ in diesen Regionen größer ist. So sind beispielsweise die durchschnittlichen Kosten je gewonnenes QALY in Sachsen-Anhalt bei einem Eingriffsniveau von 200 Bq/m^3 (21.271 €; 95 %-KI: 5.380–73.806 €) nur geringfügig höher als bei $EN=100 \text{ Bq/m}^3$. Wird ausschließlich die Sanierungstätigkeit betrachtet, so können den entsprechenden Kosten im Einzelfall überproportional höhere Effekte gegenüberstehen. Jede durchgeführte Maßnahme führt dann zu mehr vermiedenen Erkrankungen, das Kosteneffektivitätsverhältnis wird also positiv beeinflusst. Der beschriebene Effekt wird jedoch auch hier durch den – relativ betrachtet – höheren Anteil der Screeningkosten an den Netto-Gesamtkosten jeder Strategie überkompensiert, da überproportional mehr Wohnge-

bäude hinsichtlich der Radonbelastung getestet werden müssen, um ein Sanierungsbedürftiges Gebäude (Radonbelastung > EN) zu identifizieren.

Abbildung 16: Ergebnisse der KEA auf Ebene der 16 deutschen Bundesländer





BB = Brandenburg, BE = Berlin, BW = Baden-Württemberg, BY = Bayern, GER = Germany, HB = Bremen, HE = Hessen, HH = Hamburg, MV = Mecklenburg-Vorpommern, NI = Niedersachsen, NW = Nordrhein-Westfalen, RP = Rheinland-Pfalz, SH = Schleswig-Holstein, SL = Saarland, SN = Sachsen, ST = Sachsen-Anhalt, TH = Thüringen

Hinweis: die 16 Bundesländer (einschließlich Deutschland als Referenzpunkt) sind auf der X-Achse, der Kosteneffektivität der Radonintervention entsprechend und in aufsteigender Reihenfolge angeordnet. Die Y-Achse zeigt das jeweilige Kosteneffektivitätsverhältnis. 95 %-Konfidenzintervalle werden durch die gestrichelten Linien angezeigt. Aufgrund der großen Variation der Ergebnisse weist die Y-Achse eine (zwischen den Einzeldarstellungen variierende) logarithmische Skalierung auf.

Quelle: eigene Darstellung

6.1.3 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung auf Landkreisebene

Landkreise stellen aufgrund der Messpunktdichte bei der Erstellung der empirischen Radonverteilung in Deutschland die kleinste geographische Einheit dar, für die die Kosteneffektivität der Radonsanierung sinnvoll ermittelt werden kann.

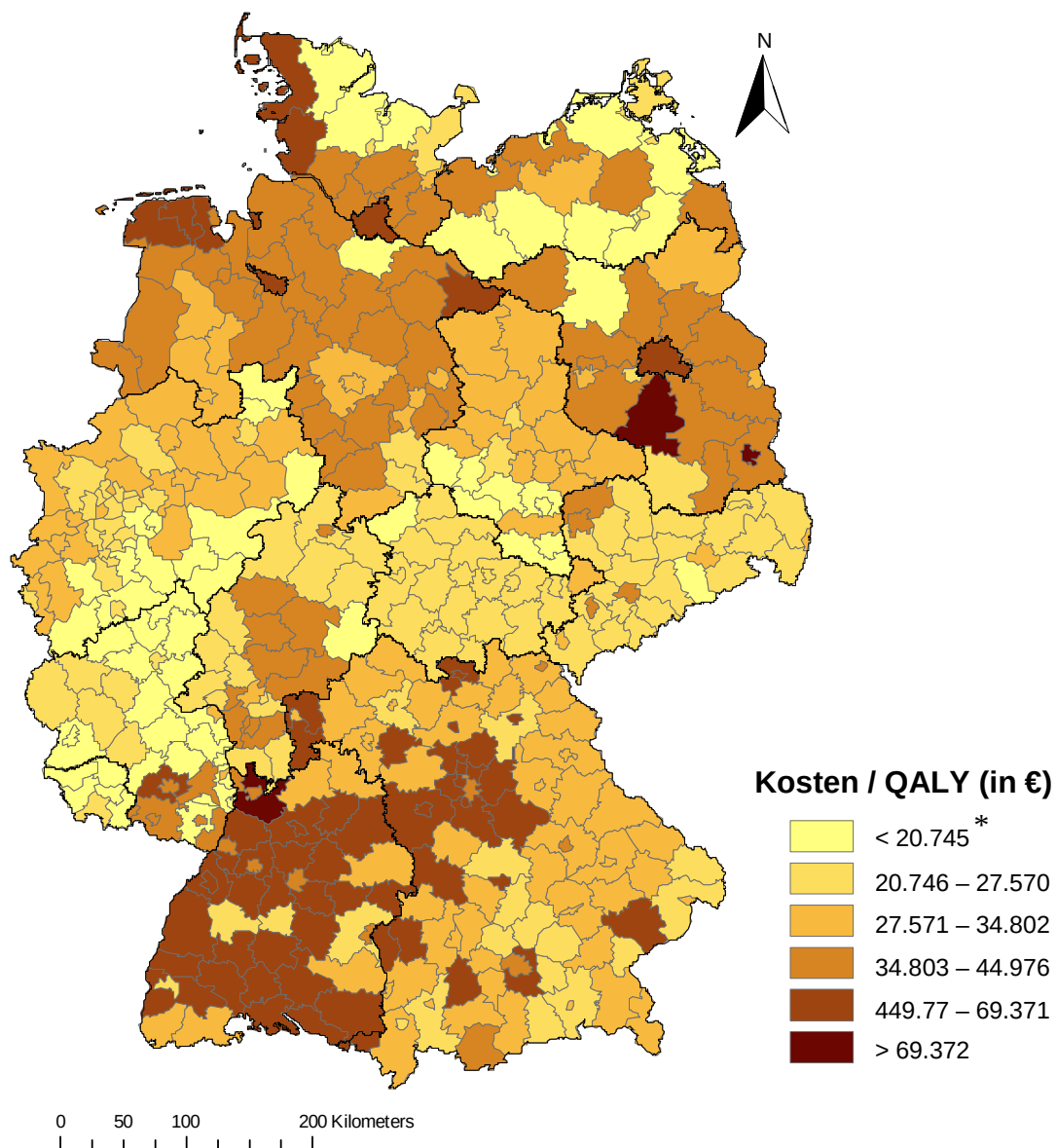
Es sei jedoch an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen, dass die Radonverteilung auf Landkreisebene teilweise auf Basis einer verhältnismäßig kleinen Anzahl individueller Messwerte erstellt wurde (vgl. 4.1). Mitunter standen weniger als 10 verwertbare Datensätze je Kreis zur Verfügung. Dementsprechend sollte berücksichtigt werden, dass auch die Kosteneffektivitätsanalyse auf dieser differenzierten lokalen Ebene nur eingeschränkte Aussagekraft haben kann. Alle Ergebnisse der kleinräumigen Untersuchung sind aufgrund dieser Unsicherheiten zurückhaltend zu interpretieren. Kapitel 6.1.3 ist daher nur geeignet, einen ersten Überblick über die kleinräumige Verteilung der Kosteneffektivität auf Basis des aktuell

besten verfügbaren Wissens zu geben. Die Berechnung konkreter Werte und Konfidenzintervalle erfolgt vor diesem Hintergrund exemplarisch.

Das entscheidungstheoretische Modell wurde analog zu der Analyse bundeseinheitlicher Strategien sowie der regionalen Differenzierung auf Bundeslandebene für alle 439 Landkreise Deutschlands, einschließlich der 116 kreisfreien Städte berechnet. Im Folgenden werden wiederum nur die probabilistischen Modellergebnisse detailliert erläutert. Obgleich Berechnungen für alle Ergebnisparameter durchgeführt wurden, bleibt die Darstellung der Kosteneffektivität aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit auf €/QALY beschränkt.

Dabei zeigt sich auch in dieser Betrachtung, dass Szenario 1 in Kombination mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m^3 Innenraumluft die optimale Handlungsalternative darstellt und alle untersuchten Alternativen auch auf Ebene der einzelnen Landkreise eindeutig dominiert werden. Die Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse für die dominante Interventionsstrategie sind in Abbildung 17 kartographisch dargestellt (detaillierte Übersichten für alle untersuchten Strategien und Eingriffsniveaus auf Landkreisebene finden sich im Anhang dieses Forschungsberichts). Die Intervallgrenzen in Abbildung 17 wurden mithilfe des Jenks-Caspell Algorithmus [80] definiert, einem statistischen Verfahren zur automatischen Klassifikation von Werten anhand so genannter Natural Breaks, welches darauf abzielt die Unterschiede innerhalb einer Klasse zu minimieren und gleichzeitig die Unterschiede zwischen den Klassen zu maximieren. Dies erlaubt es, Kategorien mit größtmöglicher Trennschärfe zu erzeugen.

Abbildung 17: Regionale Verteilung der Kosteneffektivität der Radonsanierung in Deutschland auf Landkreisebene (Szenario 1; EN=100 Bq/m³)



* Intervallgrenzen wurden mithilfe des Jenks-Caspell Algorithmus (Natural Breaks) definiert.

Quelle: eigene Darstellung

Das beste Kosteneffektivitätsverhältnis weisen die Landkreise Saarpfalkreis (11.666 € je gewonnenes QALY; 95 %-KI: 1.402–49.349 €), St. Wendel (11.744 €; 95 %-KI: 1.488–47.087 €) und Saarlouis (12.016 €, 95 %-KI: 1.182–48.549 €) im Saarland sowie die Landkreise Saalekreis (12.776€; 95 %-KI: 1.923–51.342 €) und Mansfeld-Südharz (12.778 €; 95 %-KI: 2.192–45.525 €) in Sachsen-Anhalt auf. Neben einer überdurchschnittlichen – je-

doch nicht exorbitanten – Radonexposition in den genannten Regionen sind diese Ergebnisse vor allem durch ein hohes, radonunabhängiges Basisrisiko der Lungenkrebserkrankung sowie eine aus der Perspektive der Kosteneffektivität günstige Bevölkerungsstruktur, insbesondere eine hohe Belegungsquote der einzelnen Wohneinheiten bedingt.

Die mit deutlichem Abstand höchsten Kosten je QALY finden sich im Rhein-Neckar Kreis im Norden Baden-Württembergs (285.894.863 €; 95 %-KI: 117.850.765–900.980.580 €) sowie in Teltow-Fläming (215.491.849 €; 95 %-KI: 91.518.872–670.475.517 €) und der kreisfreien Stadt Cottbus (118.257.408 €; 95 %-KI: 91.518.872–670.431.950 €), beide im südlichen Brandenburg gelegen. Ursächlich für diese extremen Ausreißer ist vor allem die geringe Innenraumradonkonzentration in den genannten Regionen, welche im Mittel nur geringfügig über der durchschnittlichen Außenluftbelastung in Deutschland ($\varnothing$ ca. 9 Bq/m³) liegt. Obgleich die absoluten Aufwendungen für die analysierten Interventionsstrategien in diesen Kreisen jeweils relativ gering wären, stehen vor allem den Kosten für das Screening potenziell belasteter Gebäude nur minimale Sanierungsaktivitäten und dementsprechend geringe Effekte gegenüber, die sehr nahe bei Null liegen. Dadurch kommt es zu einem sehr hohen Kosteneffektivitätsverhältnis, das unter Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten völlig inakzeptabel ist.

Um einen besseren Eindruck des Spektrums der Modellergebnisse auf dieser kleinräumigen Betrachtungsebene zu geben, wurden auch die 5 %- und 95 %-Quantile der Regionalverteilung der Kosteneffektivität (beste Schätzung ohne Berücksichtigung von Unsicherheitsbereichen) berechnet. Diese liegen bei 16.143 € beziehungsweise 55.394 €, d. h. 90 % aller betrachteten Gebiete weisen ein Kosteneffektivitätsverhältnis auf, welches innerhalb dieses Intervalls liegt. Wie bereits die Analyse anderer räumlicher Einheiten nahe legt, ist die Kosteneffektivität der Radonsanierung dabei in den weniger restriktiven Szenarien deutlich schlechter, insbesondere in Kombination mit höheren Eingriffsniveaus. Die entsprechenden Werte der 5 %- und 95 %-Quantile für alle weiteren analysierten Strategien sind:

- $S1_{200} = 22.005\text{--}209.443$
- $S1_{400} = 49.599\text{--}2.307.383 \text{ €}$
- $S2_{100} = 141.108\text{--}3.206.662 \text{ €}$
- $S2_{200} = 168.355\text{--}5.816.054 \text{ €}$
- $S2_{400} = 327.167\text{--}32.264.693 \text{ €}$
- $S3_{100} = 237.877\text{--}5.728.167 \text{ €}$
- $S3_{200} = 213.075\text{--}8.390.146 \text{ €}$
- $S3_{400} = 557.813\text{--}57.148.333 \text{ €}$

Die Ergebnisse werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Es sei daher auf die kartografischen Darstellungen im Anhang verwiesen.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse für die kleinräumige Betrachtung aller möglichen Strategien und Eingriffsniveaus nochmals im Rahmen dreier weiterer grafischer Analysen dargestellt. Dabei wurden für alle Szenarien (S1–S3) und Eingriffsniveaus (100, 200, 400 Bq/m³) alle Landkreise – beginnend mit dem Landkreis, der das jeweils individuell günstigste Kosteneffektivitätsverhältnis aufweist – in aufsteigender Reihenfolge in einem Diagramm angeordnet. In diesem Diagramm sind auf der X-Achse die Anzahl der in den jeweils betrachteten Regionen aufsummierten gewonnenen QALYs und auf der Y-Achse die kumulierten Nettogesamtkosten des jeweiligen Screening- und Sanierungsaufwands, abzüglich der ersparten Krankheitskosten abgetragen (durchgehende Linie). Die Darstellung kann somit auch als regionale inkrementelle Kosteneffektivität interpretiert werden, wobei jede regionale Interventionsstrategie als Technologie im Sinne des ICER-Konzepts betrachtet wird (vgl. Abschnitt 3.1.1 und Abbildung 5). Dadurch wird ersichtlich, wie sich durch die Hinzunahme weiterer Landkreise in das Interventionsszenario, im Rahmen einer spezifischen Strategie Kosten und resultierende Effekte in der Gesamtbetrachtung verändern. In diesem Sinne kann Abbildung

18 ebenso als – wenn auch rudimentäre – Budget-Impact-Analyse (BIA²²) verstanden werden (vgl. z. B. [77] für eine Übersicht über das allgemeine Konzept der BIA).

Um die Größenordnung des zugehörigen gesamten Kosteneffektivitätsverhältnisses in jedem Szenario und für jedes Eingriffsniveau besser einordnen zu können, finden sich in dem Diagramm auch verschiedene Ausprägungen einer (hypothetischen) maximalen Zahlungsbereitschaft je gewonnenes QALY (gestrichelte Linien) von 10.000 € bis zu 1000.000 €. Somit kann Abbildung 18 auch folgendermaßen interpretiert werden: solange sich die durchgezogene Linie unterhalb der gestrichelten Linie befindet, ist die gesamte Strategie, welche ein spezifisches regulatorisches Regime für eine bestimmte Anzahl an Landkreisen umfasst, kosteneffektiv. Das heißt, die durchschnittlichen Kosten je qualitätsadjustiertes Lebensjahr sind geringer als die maximale Summe, die der (hypothetische) Entscheider mit der jeweiligen Zahlungsbereitschaft dafür zu zahlen bereit wäre. Am Berührungspunkt der Grafen verändert die Ausdehnung der Strategie auf einen weiteren Landkreis das Kosteneffektivitätsverhältnis insofern, als das die Intervention aus ökonomischer Perspektive unwirtschaftlich wird. Die Kosten je QALY übersteigen dann die Zahlungsbereitschaft und die spezifische Intervention ist nicht kosteneffektiv.

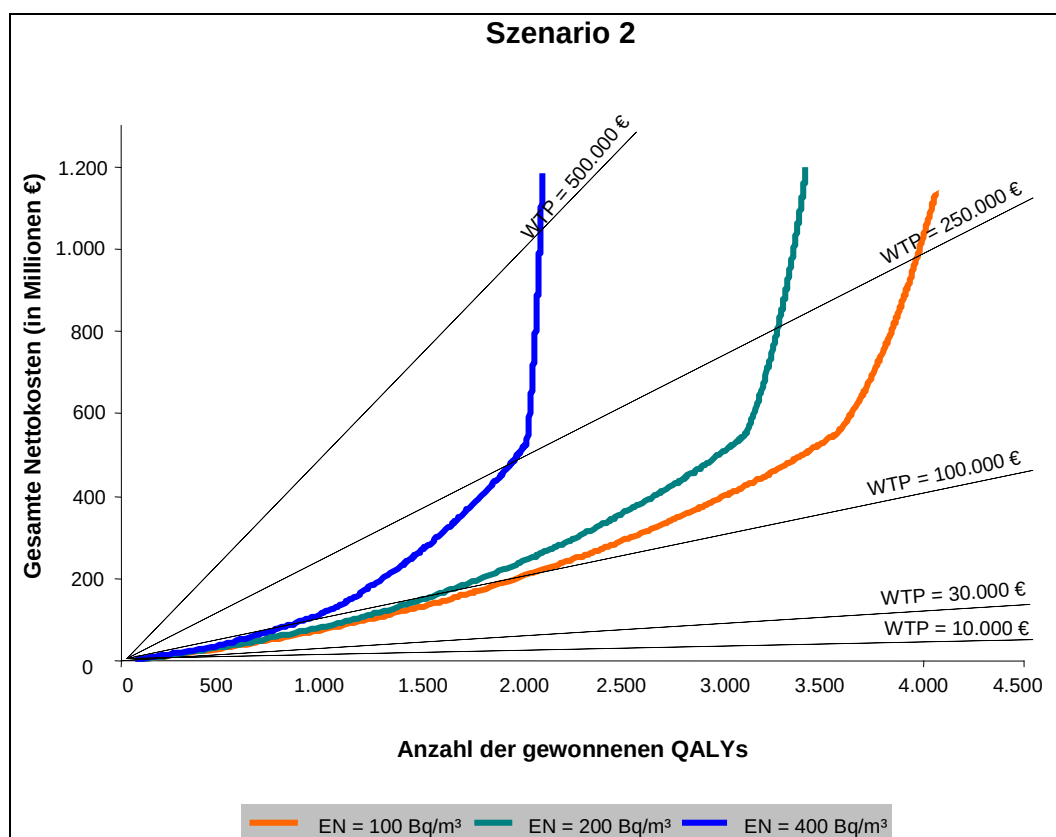
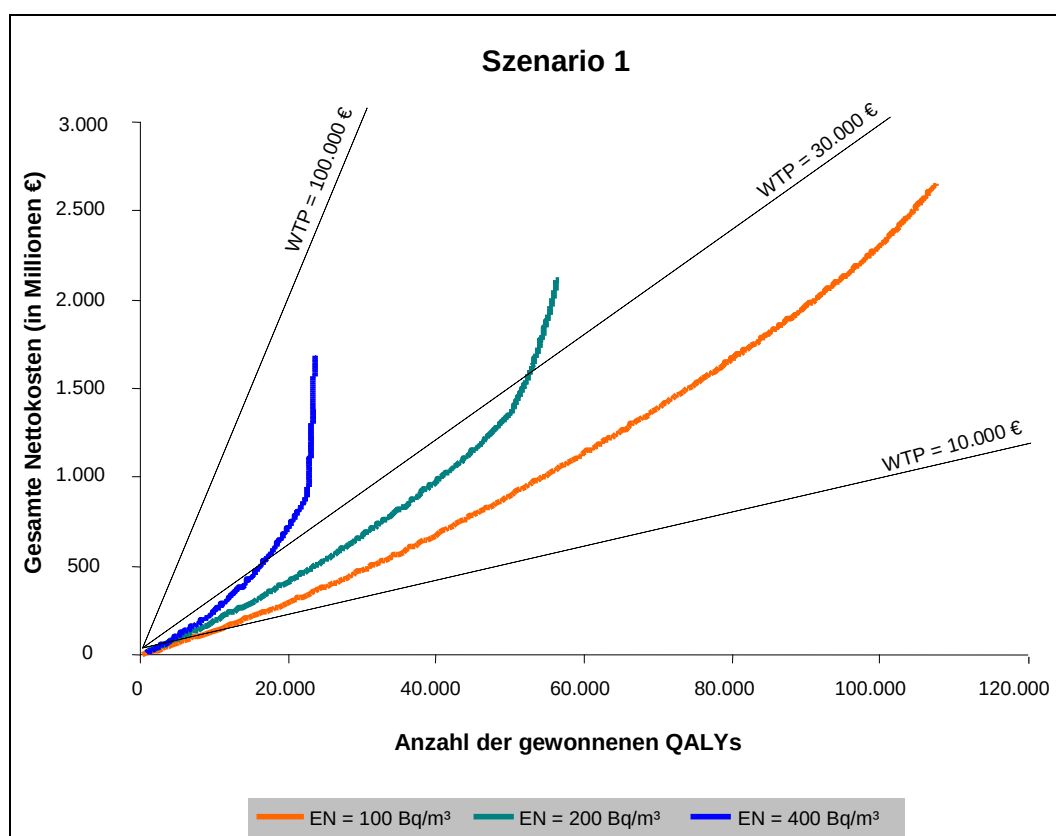
Diese grafische Darstellung offenbart, dass die Unterschiede bezüglich der Kosteneffektivität, die in den einzelnen Szenarien aus verschiedenen Eingriffsniveaus resultieren, für viele Regionen eher gering ausfallen. Insbesondere in Szenario 2 und – in etwas geringerem Umfang – Szenario 3 befindet sich das Kosteneffektivitätsverhältnis für $EN=100 \text{ Bq/m}^3$ und $EN=200 \text{ Bq/m}^3$ für einen hohen Anteil der Landkreise in einer vergleichbaren Größenordnung. Es wird deutlich, dass die signifikanten Abweichungen der Ergebnisse in der Gesamtbetrachtung für ganz Deutschland (= bundeseinheitliche Strategie) beziehungsweise die einzelnen Bundesländer, vor allem darauf zurückzuführen sind, dass ein kleinerer Anteil der analysierten Regionen ein extrem schlechtes Kosteneffektivitätsverhältnis aufweist. Insbe-

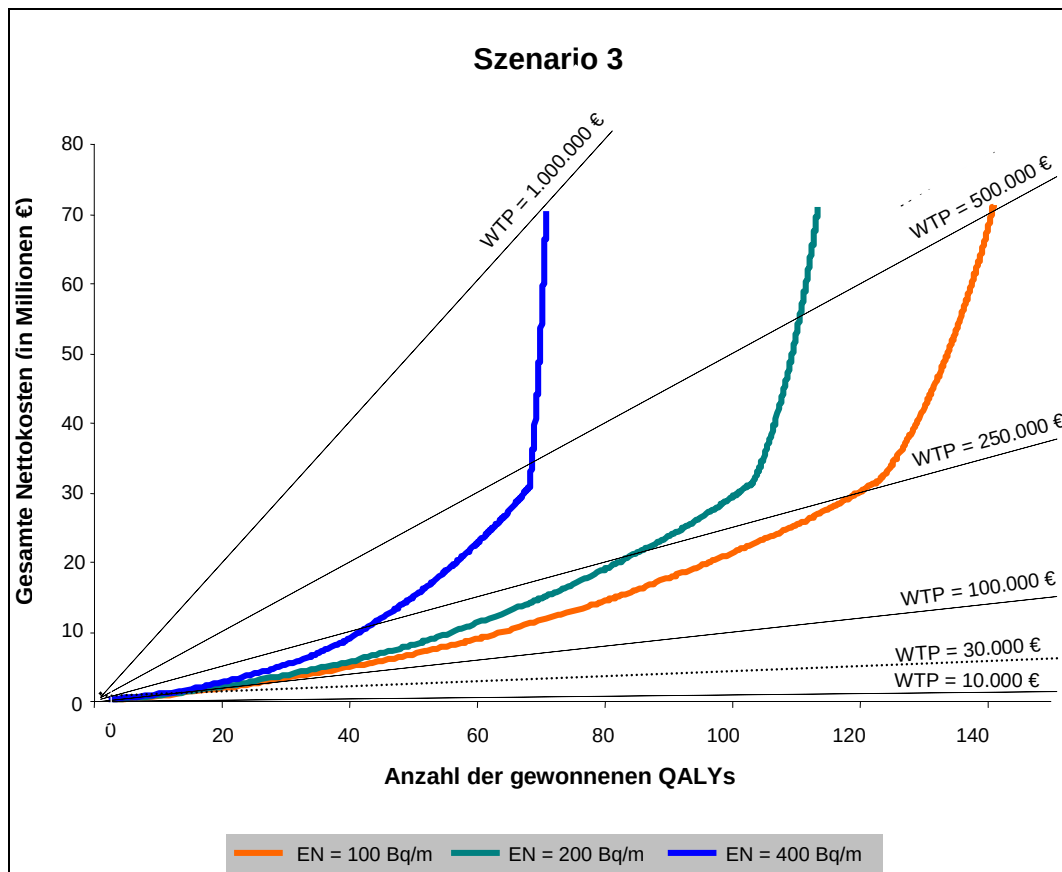
²² Budget-Impact-Analysen, auch als Budget-Einfluss-Analysen bezeichnet, stellen eine Ergänzung zu Kosteneffektivitätsanalysen dar und werden verwendet um die Auswirkungen einer Entscheidungsalternative auf das Budget eines Kostenträgers zu untersuchen. Besondere Bedeutung erlangt in diesem Zusammenhang naturgemäß die Wahl der Perspektive.

sondere für $EN=400 \text{ Bq/m}^3$ existiert in jedem Szenario ein Bereich, ab dem – bedingt vor allem durch das (universelle) Screening – Radoninterventionsmaßnahmen in erster Linie zusätzliche Kosten generieren (die Netto-Gesamtkosten steigen stark überproportional an) und kaum zusätzliche Lungenkrebsfälle vermieden werden können. Demgemäß verschlechtert sich das durchschnittliche Kosteneffektivitätsverhältnis durch die Hinzunahme weiterer Landkreise und die Strategie wird insgesamt unrentabel.

Die Darstellung der Ergebnisse der kleinräumigen Analyse in Abbildung 18 ermöglicht es dem Entscheidungsträger somit, entsprechend seiner maximalen Zahlungsbereitschaft für den Interventionseffekt (gewonnene QALYs) sowie seiner Präferenz bezüglich des Ausmaßes regulativer Einflussnahme auf die Radonintervention (S1–S3 in Kombination mit verschiedenen Eingriffsniveaus), eine individuell optimale, regional differenzierte Strategie zur Radonsanierung zu definieren, vor allem auch unter den Nebenbedingung beschränkter Ressourcen.

Abbildung 18: Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse der Radonsanierung auf Landkreisebene





QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr
 EN = Eingriffsniveau
 WTP = Zahlungsbereitschaft für ein QALY

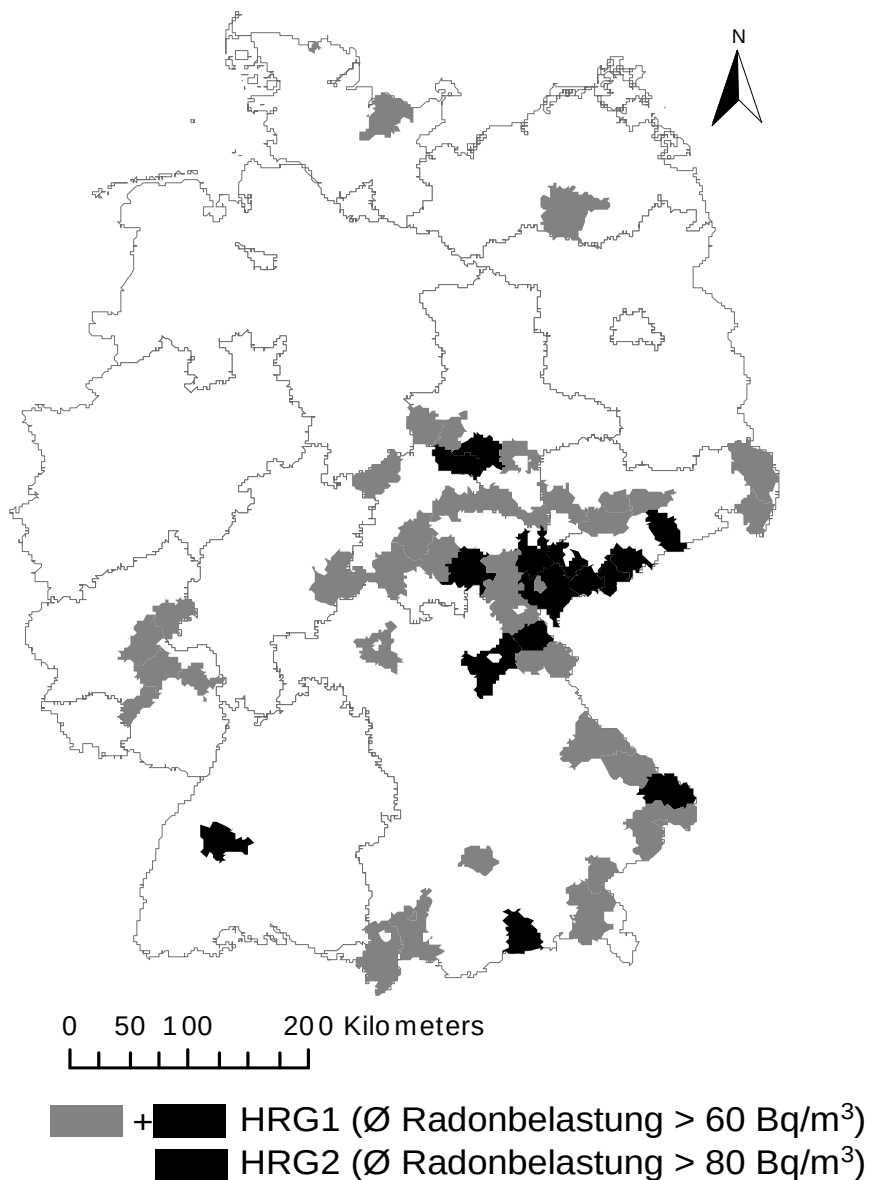
Hinweis: die durchgezogenen Kurven ergeben sich aus dem Zuwachs an Kosten (Y-Achse) und Effekten (X-Achse) durch die Hinzunahme weiterer, entsprechend dem Kosteneffektivitätsverhältnis in aufsteigender Reihenfolge, angeordneter Landkreise in das jeweilige Modell. Die gestrichelten Linien zeigen verschiedene hypothetische Ausprägungen einer maximalen Zahlungsbereitschaft des Entscheidungsträgers für ein QALY.

Quelle: eigene Darstellung

6.1.4 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung in Hochrisikogebieten

Für die regionalspezifische Analyse der Kosteneffektivität der Radonsanierung wurden für Deutschland zwei Klassen von Radon-Hochrisikogebieten (HRG) anhand des jeweiligen durchschnittlichen Radonvorkommens in Wohngebäuden gebildet (vgl. Abbildung 19 für eine Übersicht über alle Hochrisikogebiete gemäß der gewählten Definition).

Abbildung 19: Definierte Radon-Hochrisikogebiete in Deutschland



HRG1(2) = Hochrisikogebiet 1 (2)

Quelle: eigene Darstellung

HRG1 umfasst dabei alle Regionen deren durchschnittliche Innenraumbelastung 60 Bq/m³ übersteigt, also etwa 50% über dem nationalen Durchschnittswert liegt. Dies betrifft vor allem große Teile Thüringens und Sachsens, das südliche Sachsen-Anhalt sowie den Westen von Rheinland-Pfalz, eine Region in Baden-Württemberg und bestimmte Regionen in Bayern. In diesen Gebieten befinden sich circa 7,5 % der deutschen Wohngebäude und etwa 6,5 % der deutschen Bevölkerung.

HRG2 ist durch eine durchschnittliche Belastung $> 80 \text{ Bq/m}^3$ Innenraumluft definiert, welche etwa dem zweifachen der nationalen Durchschnittskonzentration entspricht. Dort befinden sich circa 1,5 % der Gesamtbevölkerung und circa 2 % aller Wohngebäude Deutschlands. Entsprechend exponierte Regionen konzentrieren sich überwiegend auf Mitteldeutschland, insbesondere Sachsen sowie einzelne Kreise in Bayern und einen Kreis in Baden-Württemberg. Die Analyse der Strukturvariablen der Hochrisikogebiete offenbart insbesondere, dass die absolute Lungenkrebsinzidenz in beiden Regionen signifikant höher ist als im Landesdurchschnitt. Nach der Kontrolle für den der Radonexposition zurechenbaren Anteil an der Erkrankung zeigt sich jedoch, dass in beiden Gebieten – insbesondere in HRG2 – gegenüber Gesamtdeutschland ein etwas geringeres Lungenkrebsrisiko zu verzeichnen ist.

Auch im Rahmen der Kosteneffektivitätsanalyse auf Ebene von Hochrisikogebieten wurde das Ergebnis der entscheidungstheoretischen Modellierung für die Szenarien 1–3 in Kombination mit Eingriffsniveaus von 100, 200 und 400 Bq/m^3 berechnet. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass die entsprechenden regulatorischen Eingriffe ausschließlich die als HRG1 beziehungsweise HRG2 gekennzeichneten Regionen betreffen.

Die Modellergebnisse zeigen, dass auch unter Berücksichtigung von Gebieten mit der höchsten Radonbelastung Szenario 1 bei einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m^3 alle anderen Strategien dominiert (vgl. Tabelle 8 für einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisparameter der probabilistischen Kosteneffektivitätsanalyse für alle untersuchten Szenarien und Eingriffsniveaus in ausgewählten Hochrisikobereichen).

Tabelle 8: Die Kosteneffektivität der Radonsanierung in ausgewählten Hochrisikogebieten

Eingriffsniveau	HRG1		HRG2	
	Anzahl verhinderter Lungenkrebsfälle	Kosten / QALY (in € ₂₀₀₆)	Anzahl verhinderter Lungenkrebsfälle	Kosten / QALY (in € ₂₀₀₆)
Szenario 1: universelles Radonscreening und obligatorische Sanierung				
100 Bq/m³	1.804,76	21.438	708,00	19.507
95 %-KI	719,67 – 3.556,47	6.089 – 74.319	288,01 – 1.387,01	5.466 – 66.957
200 Bq/m³	1.082,47	26.627	444,74	22.851
95 %-KI	428,10 – 2.153,63	8.685 – 90.835	182,28 – 876,17	7.164 – 76.104
400 Bq/m³	527,62	39.530	227,73	31.464
95 %-KI	207,72 – 1.060,52	14.825 – 127.895	93,08 – 451,32	11.325 – 100.385
Szenario 2: universelles Radonscreening und fakultative Sanierung				
100 Bq/m³	93,98	102.291	35,37	69.644
95 %-KI	35,76 – 191,19	44.060 – 308.441	14,20 – 71,00	29.503 – 206.021
200 Bq/m³	81,33	117.528	30,85	79.341
95 %-KI	30,85 – 164,73	50.416 – 361.047	12,26 – 61,97	34.007 – 236.417
400 Bq/m³	56,80	163.984	22,20	106.981
95 %-KI	20,91 – 117,35	71.181 – 494.560	8,52 – 45,57	47.008 – 318.898
Szenario 3: fakultatives Radonscreening und fakultative Sanierung				
100 Bq/m³	3,23	167.481	1,16	110.847
95 %-KI	1,03 – 7,10	72.220 – 525.554	0,39 – 2,71	46.966 – 345.022
200 Bq/m³	2,71	193.605	1,03	126.819
95 %-KI	0,90 – 6,20	84.156 – 604.825	0,32 – 2,45	53.836 – 399.759
400 Bq/m³	1,99	273.059	0,77	173.232
95 %-KI	0,65 – 4,39	118.323 – 873.149	0,26 – 1,68	75.598 – 547.296

HRG1(2) = Hochrisikogebiet 1 (2)

KI = Konfidenzintervall

QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr

Quelle: eigene Darstellung

Die Kosten je gewonnenes QALY unterscheiden sich dabei für HRG1 und HRG2 nur marginal. Dies deutet darauf hin, dass wiederum andere Faktoren, welche das Ergebnis der Analyse beeinflussen, eine deutliche regionale Heterogenität in den untersuchten Gebieten aufweisen.

Höhere Eingriffsniveaus im Rahmen von Szenario1 zeigen ein insgesamt schlechteres Kosteneffektivitätsverhältnis. Signifikante Unterschiede zwischen HRG1 und HRG2 werden jedoch erst bei EN=400 Bq/m³ deutlich. Größere Abweichungen treten dagegen in den Szenarien 2 und 3 zu Tage. Hier weist HRG2 ein deutlich besseres Kosteneffektivitätsverhältnis auf

als HRG1, da hohe Expositionen, die einen Wert von 200 Bq/m³ beziehungsweise 400 Bq/m³ überschreiten dort im Verhältnis zu der Anzahl getesteter Wohngebäude sehr viel häufiger auftreten und dieser Umstand den Einfluss der etwas ungünstigeren Bevölkerungs- und Gebäudestruktur überkompensiert.

Durch Radoninterventionen ausschließlich in HRG1 kann die radonattributable Lungenkrebsinzidenz um mehr als ein Fünftel der in Deutschland insgesamt vermeidbaren Fälle reduziert werden (maximal etwa 1.800 Fälle über den gesamten Betrachtungszeitraum von 40 Jahren in S1 für EN=100 Bq/m³), obgleich die entsprechenden Gebiete weniger als 8% der deutschen Bevölkerung abdecken. Radoninterventionen in HRG2 können die Lungenkrebsinzidenz um maximal 708 Fälle senken. Dies entspricht mehr als 10% aller radoninduzierten Lungenkrebserkrankungen, wobei nur rund 1,5 % der Bevölkerung Deutschlands ein Gebäude in einer der betroffenen Regionen bewohnt. Die Effekte in S2 und S3 sowie für höhere Eingriffsniveaus fallen dagegen deutlich geringer aus, insbesondere wenn höhere EN berücksichtigt werden, da auch bei sehr großen Innenraumbelastungen nur ein geringer Anteil der Gebäude freiwillig saniert wird.

6.2 Kosteneffektivität des radonsicheren Bauens

Im Folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse hinsichtlich präventiver Radonschutzmaßnahmen im Zuge des Neubaus von Wohngebäuden detailliert erläutert. Die Analyse erfolgt dabei anhand der Modellstruktur in Abbildung 6. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur die Outcomeparameter der probabilistischen Analyse berichtet, basierend auf Monte Carlo Simulationen analog zu 6.1.1.3. Um unnötige Redundanzen zu vermeiden, werden die weiteren Erkenntnisse aus den durchgeführten Sensitivitätsanalysen nur dann explizit dargestellt, wenn diese für das radonsichere Bauen spezifisch sind und für die Gesamtbetrachtung wesentliche Implikationen geben.

6.2.1 Kosteneffektivität bundeseinheitlicher Interventionsstrategien der präventiven Radonintervention

An dieser Stelle werden analog zu 6.1.1 die Ergebnisse einer bundeseinheitlichen Interventionsstrategie berichtet, welche kein regional differenziertes Vorgehen beinhaltet und nicht die regionale Heterogenität der Inputparameter berücksichtigt. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der probabilistischen Kosteneffektivitätsanalyse findet sich in Tabelle 9.

Tabelle 9: Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse einer bundeseinheitliche Präventionsstrategie (beste Schätzung und 95 %-Konfidenzintervalle)

Eingriffs-niveau	Anzahl vermiedener Lungenkrebsfälle	Kosten je vermiedenen Lungenkrebsfall (in € ₂₀₀₆)	Kosten je gewonnenes Lebensjahr(in € ₂₀₀₆)	Kosten je QALY (in € ₂₀₀₆)
Szenario 1: obligatorische Radonprävention; obligatorisches Screening und ggf. weitere Maßnahmen				
100 Bq/m³	263,5	803.000	59.326	69.367
95 %-KI	99,9 – 548,5	311.064 – 2.397.231	22.081 – 190.804	26.104 – 222.269
200 Bq/m³	261,88	802.582	59.294	69.329
95%-KI	99 – 545,3	310.930 – 2.391.686	22.069 – 191.190	26,009 – 221.853
400 Bq/m³	260,98	804.476	59.433	68.166
95 %-KI	98,7 – 543,2	312.018 – 2.399.868	22.122 – 191.540	26.119 – 222.655
Szenario 2:obligatorische Radonprävention; keine weiteren Maßnahmen				
–*	262,45	747.291	55.456	64.855
95 %-KI	98,4 – 547,1	267.287 – 2.392.363	19.343 – 186.379	22.390 – 217.025

* Eingriffs-niveaus sind für Szenario 2 nicht relevant, da jeder Neubau mit Radonschutzmaßnahmen ausgestattet, die Radonkonzentration nach Baufertigstellung nicht gemessen und dementsprechend auch keine etwaig angezeigten Nachbesserungen durchgeführt werden (vgl. 3.2)

Quelle: eigene Darstellung

Base Case

Gesetzt den Fall, dass Neubauten nicht mit Radonschutzmaßnahmen versehen werden, beziehen im Basisjahr der Analyse deutschlandweit rund 42.000 (14.500; 3.500) Personen ein neues Wohngebäude, dessen Innenraumbelastung einen Wert von 100 Bq/m³ (200 Bq/m³; 400 Bq/m³) übersteigt. Ohne weitere Maßnahmen erkranken von dieser Population nach der Latenzperiode jedes Jahr rund 24,3 Personen (95 %-KI: 5,31–38,77) an radonbe-

dingtem Lungenkrebs. Direkte und indirekte Krankheitskosten, die durch die Behandlung der Betroffenen sowie den entsprechenden Produktionsausfall entstehen, belaufen sich dabei auf 3,08 Mio. € jährlich. Unter Berücksichtigung einer Diskontrate von 3 % für Kostenparameter ergeben sich somit Gesamtkosten von 25,78 Mio. € über die Beobachtungsperiode von 40 Jahren.

Szenario 4

Unter der Annahme, dass alle Neubauten des Basisjahres mit geeigneten Radonschutzmaßnahmen versehen werden, das Ergebnis der Intervention nach Baufertigstellung zu überprüfen und gegebenenfalls Nachbesserungen durchzuführen sind, entstehen Kosten für das radonsichere Bauen sowie obligatorische Tests und gegebenenfalls zusätzliche Sanierungsmaßnahmen in Höhe von insgesamt 213,33 Mio. €. (95 %-KI: 184,81–228,55 Mio. €) bei einem Eingriffsniveau²³ von 100 Bq/m³. Der Großteil dieser Summe ist dabei auf die obligatorische Intervention im Zuge des Neubaus zurückzuführen, wohingegen konfirmatorische Tests und zusätzliche Maßnahmen weniger als 5% zu den Gesamtkosten beitragen. Mithilfe des präventiven Radonschutzes kann die radonbedingte Lungenkrebsinzidenz während der Beobachtungsperiode um 263,5 (95 %-KI: 99,85–548,47) Fälle reduziert werden. Dadurch verringern sich die Krankheitskosten um rund 2,6 Mio. € je Jahr beziehungsweise insgesamt 21,66 Mio. € (95 %-KI: 1,89–64,35 Mio. €). Werden Diskontfaktoren von 3 % für Kosten- und 1,5 % für Effektparameter zu Grunde gelegt, so ergibt sich ein inkrementelles Kosteneffektivitätsverhältnis relativ zum Status Quo von 803.000 € (95 %-KI: 311,064–2.397.231 €) je vermiedenen Lungenkrebsfall, 59.326 € (95 %-KI: 22.081–190.804 €) je gewonnenes Lebensjahr und 69.367 € (95 %-KI: 26.104–222.269 €) je gewonnenes QALY.

Die Berücksichtigung höherer Eingriffsniveaus von 200 Bq/m³ beziehungsweise 400 Bq/m³ hat lediglich einen marginalen Einfluss auf die Outcomeparameter der Kosteneffektivitäts-

²³ Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass sich das Eingriffsniveau in diesem Fall lediglich auf eine etwaige Nachbesserung des Radonschutzes bei fertig gestellten Gebäuden bezieht, da *a priori* keine Aussagen zu individuellen Belastungen möglich sind (somit haben Grenzwerte im Rahmen des radonsicheren Bauens annahmegemäß keinen Einfluss auf die Modellierungsergebnisse in Szenario 5).

analyse des radonsicheren Bauens, welcher weniger als 0,5 % beträgt (vgl. Tabelle 9). Dies ist in der Tatsache begründet, dass sich zwei gegenläufige Effekte mehr oder weniger vollständig aufheben. Zum einen führen höhere EN dazu, dass ein höherer durchschnittlicher Effekt (= mehr vermiedene Krankheitsfälle) je saniertes Wohngebäude erreicht werden kann. Dies wirkt sich positiv auf das Kosteneffektivitätsverhältnis aus. Andererseits muss eine größere Anzahl an Gebäuden getestet werden, um eines zu identifizieren, das sanierungsbedürftig ist. Dieser Umstand hat wiederum höhere durchschnittliche Screeningkosten je Gebäude zur Folge und führt somit tendenziell zu einem schlechteren Kosteneffektivitätsverhältnis. Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass exorbitante Innenraumkonzentrationen, insbesondere solche, die einen Wert von 400 Bq/m³ übersteigen in radonsicher erbauten Gebäuden äußerst selten sind.

Szenario 5

Eine Interventionsstrategie, die kein zusätzliches Screening nach erfolgter Radonprävention und somit auch keine weiteren Sanierungsmaßnahmen an fertig gestellten Gebäuden vorsieht, weist ein etwas besseres inkrementelles Kosteneffektivitätsverhältnis auf, als Szenario 4. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein relativ geringfügiger Rückgang vermiedener Lungenkrebsfälle, aufgrund eines etwas weniger effektiven Radonschutzes, durch einen signifikanten Rückgang der Kosten für zusätzliche Sanierungsmaßnahmen und insbesondere das obligatorische Screening nach Baufertigstellung überkompensiert wird. Wird auf Radontests und demzufolge etwaige Nachbesserungen an fertig gestellten Gebäuden verzichtet, so beträgt das Kosteneffektivitätsverhältnis im Vergleich zum Status Quo (keine Maßnahmen zum Radonschutz) 747.291 € (95 %-KI: 267.287–2.392.363 €) je vermiedenen Lungenkrebsfall, 55.456 € (95%-KI: 19.343–186.379 €) je gewonnenes Lebensjahr und 64.855 € (95 %-KI: 22.390–217.025 €) je gewonnenes qualitätsadjustiertes Lebensjahr.

Dieser absolute Vergleich beider Strategien täuscht jedoch über die Tatsache hinweg, dass die inkrementelle Kosteneffektivität von Szenario 4 im Vergleich zu Szenario 5 äußerst ungünstig ist und S4 somit aus ökonomischer Perspektive auf der Ebene einer bundeseinheitli-

chen Interventionsstrategie völlig inakzeptabel erscheint. Durch das obligatorische Screening aller neu erbauten, mit entsprechenden Radonschutzmaßnahmen ausgestatteten Wohngebäude sowie obligatorische zusätzliche Maßnahmen, falls immer noch ein Grenzwert von 100 Bq/m^3 überschritten wird, kann lediglich etwas mehr als ein weiterer statistischer Lungenkrebsfall während der gesamten Beobachtungsperiode vermieden werden. Dem stehen jedoch zusätzliche Kosten in Höhe von rund 10,5 Mio. € entgegen, wobei mehr als 90 % dieser Summe allein dem *ex-post*-Screening der bereits mit einem Radonschutz versehenen Gebäude zugerechnet werden kann.

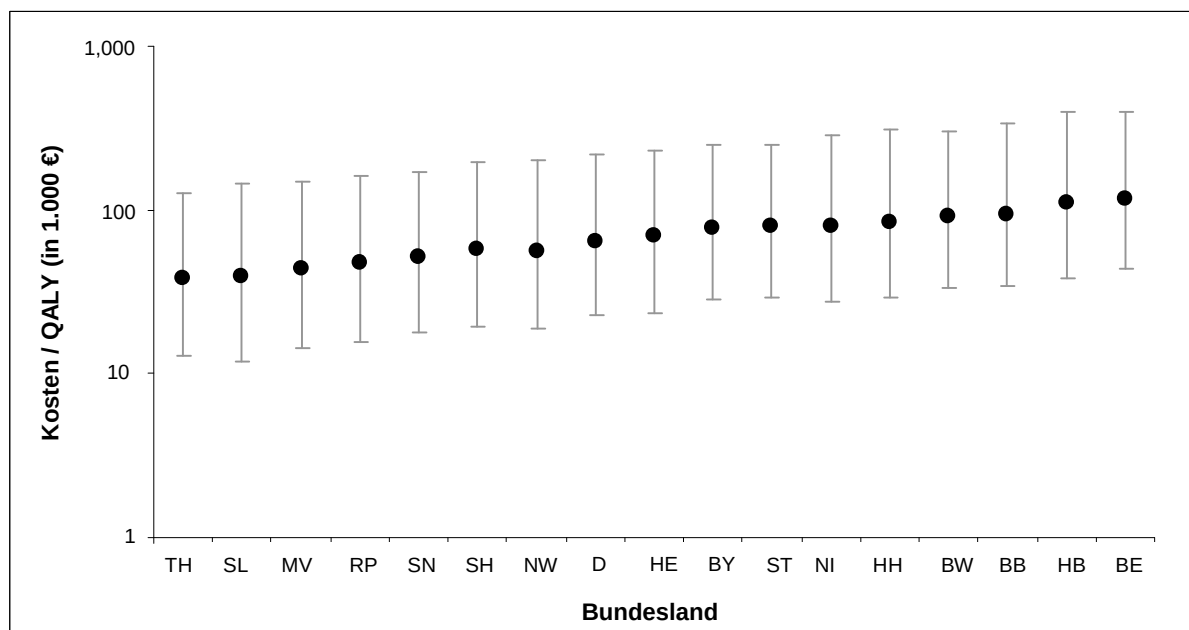
Das inkrementelle Kosteneffektivitätsverhältnis von S4 gegenüber S5 ist noch deutlich schlechter, wenn der Betrachtung höhere Eingriffsniveaus von 200 beziehungsweise 400 Bq/m^3 zu Grunde gelegt werden, da die Zahl der Neubauten mit derart hohen Innenraumkonzentrationen nach erfolgten präventiven Maßnahmen sehr gering ausfällt. Dementsprechend kann die Lungenkrebsinzidenz in noch deutlich geringerem Umfang reduziert werden. Dagegen bleiben die Gesamtkosten annähernd konstant, aufgrund der Tatsache, dass der überwiegende Anteil der notwendigen Aufwendungen allein durch das Testen der individuellen Radonkonzentration verursacht wird und somit von einem etwaigen Eingriffsniveau unabhängig ist.

6.2.2 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der präventiven Radonintervention auf Bundeslandebene

Analog zu der gesundheitsökonomischen Betrachtung der Radonsanierung bestehender Gebäude (vgl. 6.1.2) wurde auch die Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens auf der Ebene der 16 deutschen Bundesländer regional differenziert. Die Modellanalyse erfolgt dabei analog zu der KEA bundeseinheitlicher Interventionsstrategien für die Szenarien 4 (in Kombination mit Eingriffsniveaus von 100, 200 und 400 Bq/m^3 Innenraumluft) und 5 (ohne weitere Differenzierung nach Eingriffsniveaus). Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden unmittelbar die Ergebnisse der probabilistischen Analyse berichtet. Alle Angaben

zu Konfidenzintervallen basieren auf Monte-Carlo-Simulationen mit 5.000 Wiederholungen (vgl. 6.1.1.3), separat für jede regionale Untersuchungseinheit. Eine grafische Übersicht der Ergebnisse der Modellierung findet sich in Abbildung 20.

Abbildung 20: Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens auf Ebene der 16 deutschen Bundesländer



BB = Brandenburg, BE = Berlin, BW = Baden-Württemberg, BY = Bayern, GER = Germany, HB = Bremen, HE = Hessen, HH = Hamburg, MV = Mecklenburg-Vorpommern, NI = Niedersachsen, NW = Nordrhein-Westfalen, RP = Rheinland-Pfalz, SH = Schleswig-Holstein, SL = Saarland, SN = Sachsen, ST = Sachsen-Anhalt, TH = Thüringen

Hinweis: die 16 Bundesländer (einschließlich Deutschland als Referenz) sind auf der X-Achse, in aufsteigender Reihenfolge entsprechend der Kosteneffektivität der Radonintervention, angeordnet. Die Y-Achse zeigt das jeweilige Kosteneffektivitätsverhältnis. 95%-Konfidenzintervalle werden durch die hellen Linien angezeigt. Aufgrund der großen Variation der Ergebnisse ist die Y-Achse logarithmisch skaliert.

Quelle: eigene Darstellung

Die Ergebnisse zeigen wiederum ein hohes Maß an regionaler Heterogenität. Vor allem aus der Perspektive der inkrementellen Kosteneffektivität ist die obligatorische Ausstattung von Neubauten mit Radonschutzmaßnahmen, ohne weiteres Screening und etwaige zusätzliche Maßnahmen nach Baufertigstellung (Szenario 5), jedoch in jedem Bundesland einer Strategie vorzuziehen, die solche Maßnahmen berücksichtigt (Szenario 4). Dies gilt unabhängig von dem betrachteten Eingriffsniveau, welches die Notwendigkeit etwaiger Nachbesserun-

gen in S4 kennzeichnet. Daher werden im Folgenden lediglich die Ergebnisse der optimalen Strategie detailliert erläutert.

Das insgesamt beste Kosteneffektivitätsverhältnis kann in Thüringen erreicht werden. Die Kosten je gewonnenes QALY in dieser Region betragen 38.612 € (95 %-KI: 12.920–125.021 €) und somit lediglich etwas mehr als die Hälfte des Aufwandes einer bundeseinheitlichen Umsetzung der präventiven Interventionsstrategie. Durch die Ausstattung aller Wohngebäude mit Radonschutzmaßnahmen im Zuge des Neubaus kann die Lungenkrebsinzidenz während der gesamten Beobachtungsperiode in dieser Region um 9,55 Fälle (95 %-KI: 3,74–18,72) verringert werden. Überdurchschnittliche Kosteneffektivitätsverhältnisse wurden in weiteren sieben Bundesländern berechnet, insbesondere in Saarland (39.713 €/QALY; 95 %-KI: 11.773–143.645 €; 3,61 vermiedene Lungenkrebsfälle) und Mecklenburg-Vorpommern (43.877 €/QALY; 95 %-KI: 14.492–147.023 €; 11,36 vermiedene Lungenkrebsfälle). Die Stadtstaaten Berlin (116.058 €/QALY; 95 %-KI: 44.146–393.131 €; 4,26 vermiedene Lungenkrebsfälle) und Bremen (109.691 €/QALY; 95 %-KI: 37.836–392.876 €; 0,77 vermiedene Lungenkrebsfälle) sowie die Bundesländer Brandenburg (95.060 €/QALY; 95 %-KI: 34.256–336.352 €; 9,68 vermiedene Lungenkrebsfälle) und Baden-Württemberg (91.004 €/QALY; 95 %-KI: 32.991–302.660 €; 25,65 vermiedene Lungenkrebsfälle) hingegen zeigen eine deutlich schlechtere Kosteneffektivität.

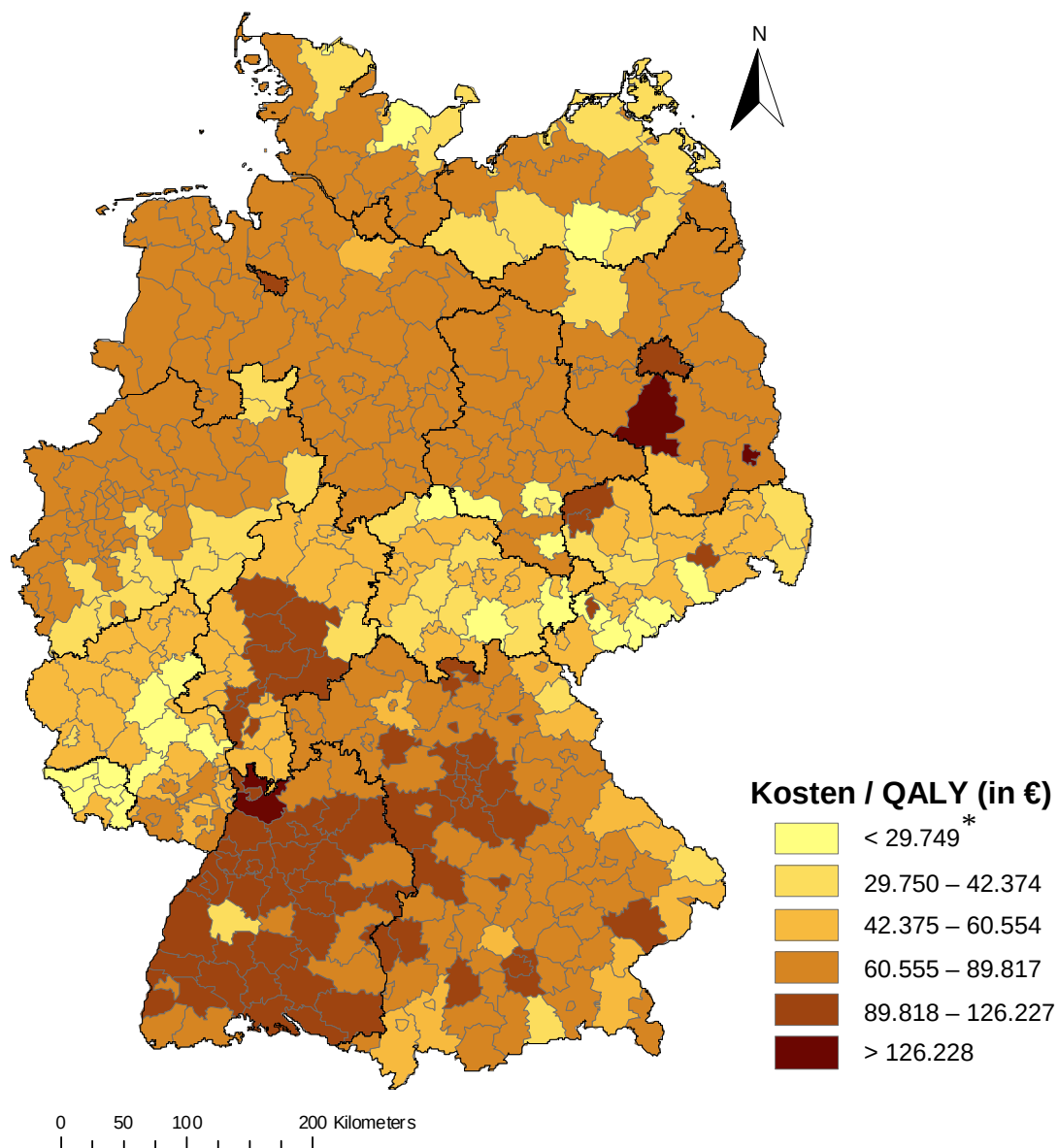
Erwartungsgemäß weisen diejenigen Bundesländer, welche durch höhere durchschnittliche Radonbelastungen gekennzeichnet sind auch ein besseres Kosteneffektivitätsverhältnis auf. Allerdings wird – analog zu der Analyse von Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden – auch hier deutlich, dass das individuelle Belastungsniveau nicht die gesamte Ergebnisheterogenität der KEA zu erklären vermag und insbesondere weitere heterogen verteilte Faktoren diesbezügliche Unterschiede beeinflussen.

6.2.3 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der präventiven Radonintervention auf Landkreisebene

Auch in der regional differenzierten Betrachtung der Kosteneffektivität des radonsicheren Bauens stellen Landkreise aufgrund der Dichte der verfügbaren Messpunkte die kleinste räumliche Einheit dar, für die eine sinnvolle Analyse im Rahmen der Modellierung möglich ist (wobei auch hier die unter 6.1.3 genannten Einschränkungen bezüglich der Validität der kleinräumigen Modellergebnisse zu beachten sind und die erzielten Modellergebnisse daher vorsichtig interpretiert werden müssen). Analog zur kleinräumigen KEA der Radonsanierung wurde das entscheidungstheoretische Modell für alle 439 deutschen Landkreise, einschließlich 116 kreisfreier Städte berechnet.

Auch auf dieser regionalen Ebene zeigt sich, dass das radonsichere Bauen ohne *ex-post*-Screening und weitere nachträgliche Maßnahmen der Radonreduktion (Szenario 5) ein signifikant besseres Kosteneffektivitätsverhältnis aufweist, als die Vergleichsstrategie, die solche weiterführenden Eingriffe beinhaltet (Szenario 4). Dieses Ergebnis ist ebenso unabhängig von der Höhe des betrachteten Eingriffsniveaus in S4 (100, 200 oder 400 Bq/m³). Abbildung 21 bietet eine Übersicht über die Ergebnisse der regional differenzierten KEA auf Landkreisebene in kartografischer Form.

Abbildung 21: Regionale Verteilung der Kosteneffektivität des radonsicheren Bauens in Deutschland auf Landkreisebene



* Intervallgrenzen wurden mithilfe des Jenks-Caspell Algorithmus (Natural Breaks) definiert

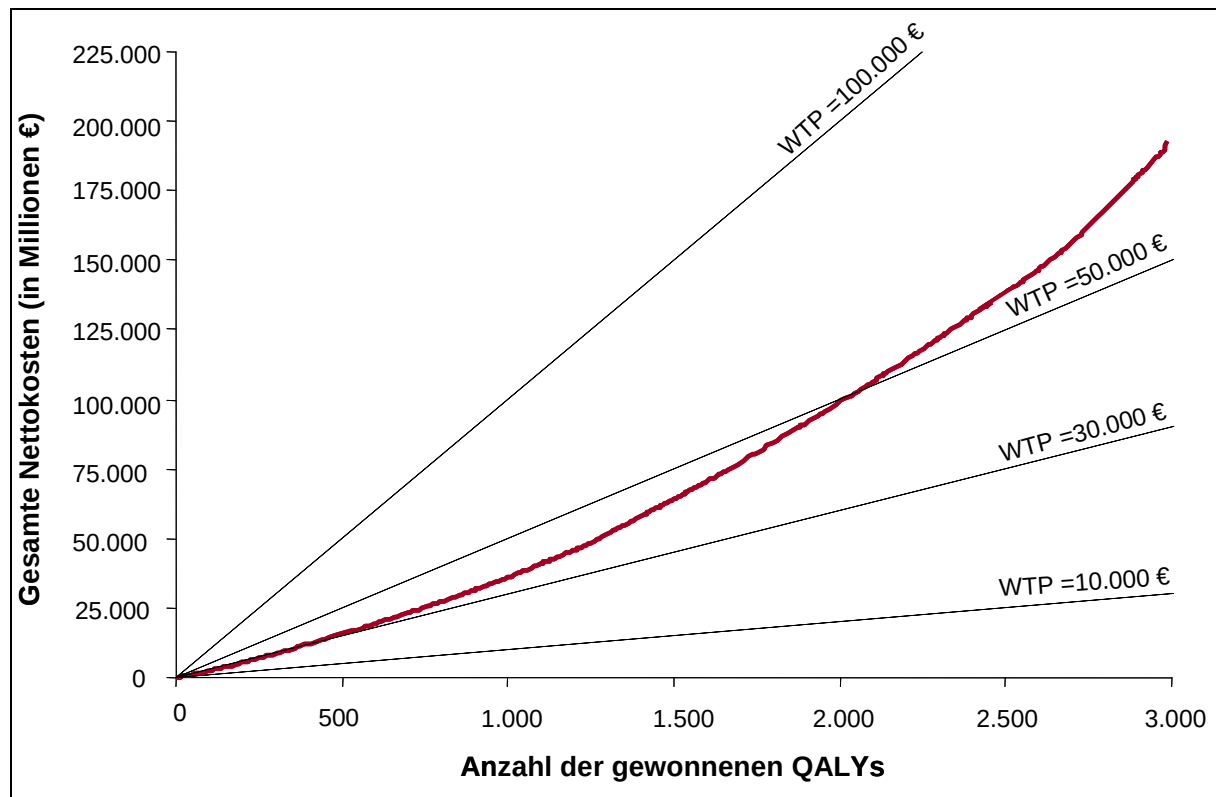
Quelle: eigene Darstellung

Das beste Kosteneffektivitätsverhältnis im Rahmen der kleinräumigen Analyse findet sich für die optimale Strategie (S5: radonsicheres Bauen, ohne anschließendes Screening und weitere Maßnahmen) in den Landkreisen Mansfeld-Südharz (15.209 €/QALY; 95 %-KI: 2.425–64.600 €) und Harz (21.268 €/QALY; 95 %-KI: 4.709–86.709 €), beide im Bundesland Sachsen-Anhalt sowie in Greiz im östlichen Thüringen (23.190 €; 95 %-KI: 5.593–92.150 €). Die

mit Abstand höchsten Kosten je qualitätsadjustiertes Lebensjahr lassen sich für den Rhein-Neckar Kreis im Norden Baden-Württembergs (854.600 €/QALY; 95 %-KI: 297.140–3.557.279 €) beziehungsweise für Teltow-Fläming (589.536 €/QALY; 95 %-KI: 208.632–2.466.695 €) sowie die kreisfreie Stadt Cottbus (575.750 €/QALY; 95 %-KI: 204.213–2.412.166 €), beide im Bundesland Brandenburg, berechnen. Diese extremen Ausreißer sind vor allem durch sehr niedrige Radonkonzentrationen begründet, die nur geringfügig über dem nationalen Durchschnitt der Außenluftbelastung liegen. Die 5 %- beziehungsweise 95 %-Quantile der regionalen Verteilung der Kosteneffektivität auf Landkreisebene liegen bei 29.749 € und 126.227 €, d. h. in 90 % aller betrachteten Regionen befinden sich die Kosten je gewonnenes QALY innerhalb dieses Intervalls.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der kleinräumigen Analyse für die optimale Strategie wiederum in einer weiteren diagrammatischen Darstellung aufbereitet, analog zu Abbildung 18, welche dieses für die regional differenzierte KEA der Radonsanierung bestehender Gebäude illustriert.

Abbildung 22: Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse des radonsicheren Bauens auf Landkreisebene für Szenario 5



Hinweis: die durchgezogene Kurve ergibt sich aus dem Zuwachs an Kosten (Y-Achse) und Effekten (X-Achse) durch die Hinzunahme weiterer, entsprechend dem Kosteneffektivitätsverhältnis in aufsteigender Reihenfolge, angeordneter Landkreise in das jeweilige Modell. Die gestrichelten Linien zeigen verschiedene Ausprägungen der (hypothetischen) maximalen Zahlungsbereitschaft für ein QALY.

Quelle: eigene Darstellung

Die Analyse zeigt, dass die Steigung der Kurve für einen Großteil der betrachteten Regionen relativ flach verläuft. Das Kosteneffektivitätsverhältnis des radonsicheren Bauens im Rahmen der optimalen Strategie bewegt sich bis ca. 750 gewonnenen QALYs nur geringfügig oberhalb der Linie, die eine Zahlungsbereitschaft von 30.000 €/QALY kennzeichnet und bleibt bis ca. 2.100 gewonnenen QALYs teilweise deutlich unterhalb einer hypothetischen Zahlungsbereitschaft von 50.000 €/QALY. Bereits ab etwa 1.400 gewonnenen QALYs und insbesondere im letzten Drittel der X-Achse nimmt die Steigung der Kurve jedoch überproportional stark zu.

Analog zu der KEA der Radonsanierung kann die Kosteneffektivität der bundeseinheitlichen Strategie daher zu einem gewissen Teil auf einige wenige Gebiete zurückgeführt werden, in

welchen nur eine geringe Zahl zusätzlicher Lungenkrebsfälle durch obligatorische radonsichere Neubauten verhindert werden kann (der Effekt fällt allerdings geringer aus, für weitergehende Analysen vgl. auch 6.4). Dementsprechend steigt das Kosteneffektivitätsverhältnis durch die Implementierung der Interventionsstrategie in weiteren Landkreisen und das gesamte Szenario wird zunehmend unwirtschaftlicher.

6.2.4 Regional differenzierte Analyse der Kosteneffektivität der präventiven Radonintervention in Hochrisikogebieten

Bei der Analyse der Kosteneffektivität des radonsicheren Bauens findet die gleiche Definition von Hochrisikogebieten Anwendung, die auch der KEA der Radonsanierung bestehender Wohngebäude (vgl. 6.1.4) zu Grunde liegt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Dieses Vorgehen beruht jedoch insbesondere auf der Annahme, dass die Radonkonzentration in Neubauten nach Baufertigstellung genauso verteilt ist, wie in den bereits existierenden Gebäuden in derselben Region.

In HRG1 (durchschnittliche Radonbelastung $> 60 \text{ Bq/m}^3$) befinden sich 6,9 % aller neu erbauten Wohngebäude des Basisjahres und 6,03 % der Gesamtpopulation, die ein neues Gebäude bezieht. Die entsprechenden Zahlen für HRG2 sind 1,41 % beziehungsweise 1,20 %. Demzufolge ist die Bauaktivität in beiden Hochrisikogebieten im Vergleich zu dem Anteil, den bestehende Gebäude am gesamten Wohnbestand haben, etwas geringer.

Die Ergebnisse der entscheidungstheoretischen Modellierung zeigen, dass auch unter ausschließlicher Berücksichtigung der höchstbelasteten Regionen Deutschlands Szenario 5 (obligatorische Ausstattung aller Neubauten mit Radonschutzmaßnahmen ohne *ex-post*-Screening und weiterführende Interventionen) die optimale Strategie im Rahmen des radonsicheren Bauens darstellt. Präventive Maßnahmen im Zuge des Neubaus von Wohngebäuden in HRG1 (HRG2) können die Lungenkrebsinzidenz im Vergleich zu einer bundeseinheitlichen Umsetzung der optimalen Strategie um etwa 9,36 % (2,26 %) senken. Das heißt, 24,66 (95 %-KI: 9,44–48,28) beziehungsweise 5,96 (95 %-KI: 2,45–11,62) Lungenkrebsfälle

können während der gesamten Beobachtungsperiode von 40 Jahren verhindert werden. Das entsprechende Kosteneffektivitätsverhältnis beträgt 44.396 € je qualitätsadjustiertes Lebensjahr (95 %-KI: 14.614–143.866 €) in HRG1, wohingegen ein deutlich besseres Ergebnis in HRG2 erzielt werden kann: 34.003 €/QALY (95 %-KI: 11.069–111.264 €).

Im Vergleich zu den übrigen betrachteten regionalen Ebenen ist der relative Effekt, den zusätzliche Interventionsmaßnahmen nach Baufertigstellung (Szenario 5) in HRG1 und, insbesondere HRG2, aufweisen – mit Ausnahme einiger weniger Landkreise – aufgrund der starken Innenraumbelastung in diesen Regionen deutlich größer. Dennoch kann die Anzahl vermiedener Lungenkrebserkrankungen durch ein zusätzliches Screening nach Baufertigstellung, in Kombination mit obligatorischen weiterführenden Maßnahmen im Falle einer unzureichenden Reduktion der Radonbelastung nur marginal erhöht werden. Daher ist das inkrementelle Kosteneffektivitätsverhältnis von Szenario 4, verglichen mit der optimalen Strategie (Szenario 5), sehr hoch, selbst wenn lediglich die Regionen mit der höchsten Belastung betrachtet werden.

Durch ein Screening aller neu erbauten Wohngebäude in HRG1 (HRG2) sowie entsprechende weiterführende Maßnahmen, wenn ein Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ überschritten wird, lassen sich lediglich etwa 0,30 (0,11) zusätzliche Lungenkrebsfälle verhindern. Die zusätzlichen Kosten durch Radontests und bauliche Veränderungen bereits fertig gestellter Neubauten belaufen sich jedoch auf ca. 1,25 Mio. € (318.556 €), wobei der Großteil dieser Summe auch auf der Ebene von Hochrisikogebieten allein der Identifikation übermäßig belasteter Gebäude zugeschrieben werden kann. Dementsprechend müssen 359.670 € aufgewendet werden, um in HRG1 ein zusätzliche QALY zu gewinnen. In HRG2 fällt diese Summe mit 269.962 €/QALY etwas geringer aus, da die durchschnittliche Belastung – auch der bereits mit Radonschutzmaßnahmen ausgestatteten Bauten – insgesamt höher ist als in HRG1 und daher weniger Tests durchgeführt werden müssen, um ein sanierungsbedürftiges Gebäude zu identifizieren. Werden höhere Eingriffsniveaus von 200 Bq/m³ beziehungsweise 400 Bq/m³ zu Grunde gelegt, so besteht in Szenario 4 ein noch deutlich schlechteres inkrementelle Kosteneffektivitätsverhältnis, da der größere durchschnittliche Effekt, den zusätzliche

Maßnahmen auf der Ebene eines einzelnen Gebäudes haben durch den damit einhergehende Anstieg der relativen Screeningkosten stark überkompensiert wird.

6.3 Analyse der Determinanten der regionalen Ergebnisheterogenität

Die regionalen Analysen sowohl der Radonsanierung bestehender Wohngebäude, als auch des radonsicheren Bauens zeigen, dass die jeweilige Schadstoffkonzentration beziehungsweise deren Verteilung, nicht den alleinigen Bestimmungsfaktor der räumlichen Variation der Modellergebnisse darstellt, die auf jeder untersuchten Ebene der Kosteneffektivitätsanalyse zu Tage tritt.

Vielmehr wird die Kosteneffektivität durch weitere Faktoren beeinflusst, welche ebenso heterogen verteilt sind. Dies sind insbesondere die Exposition der Bevölkerung mit anderen kancerogenen Substanzen, die das Basisrisiko der Lungenkrebserkrankung bestimmen sowie regional variierende Bevölkerungs- und Gebäudestrukturen. Besonders deutlich wird dies beispielsweise im Bundesland Saarland. Aufgrund eines signifikant erhöhten Lungenkrebsrisikos, bedingt unter anderem durch eine überdurchschnittliche Rauchprävalenz und berufsbedingte Expositionen mit krebserregenden Schadstoffen (z. B. im Bergbau), ist das Kosteneffektivitätsverhältnis der Radonsanierung in Szenario 1, in Kombination mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ relativ niedrig (da ein verhältnismäßig großer Effekt durch die Intervention erreicht werden kann), obgleich die durchschnittliche Radonbelastung in dieser Region nicht exorbitant hoch ist. Allerdings gewinnt bei höheren Eingriffsniveaus die Tatsache, dass nur ein verhältnismäßig kleiner Anteil der Gebäude stark belastet ist, zunehmend an Bedeutung für die Effizienz der Intervention. Dementsprechend ist die Kosteneffektivität dieser Strategien deutlich niedriger als in anderen Regionen mit höheren Innenraumbelastungen, da vergleichsweise wenige Gebäude tatsächlich saniert werden. Dieser negative Einfluss kann auch nicht mehr durch den größeren Effekt der Intervention im Einzelfall kompensiert werden, welcher durch das höhere Basisrisiko bedingt ist.

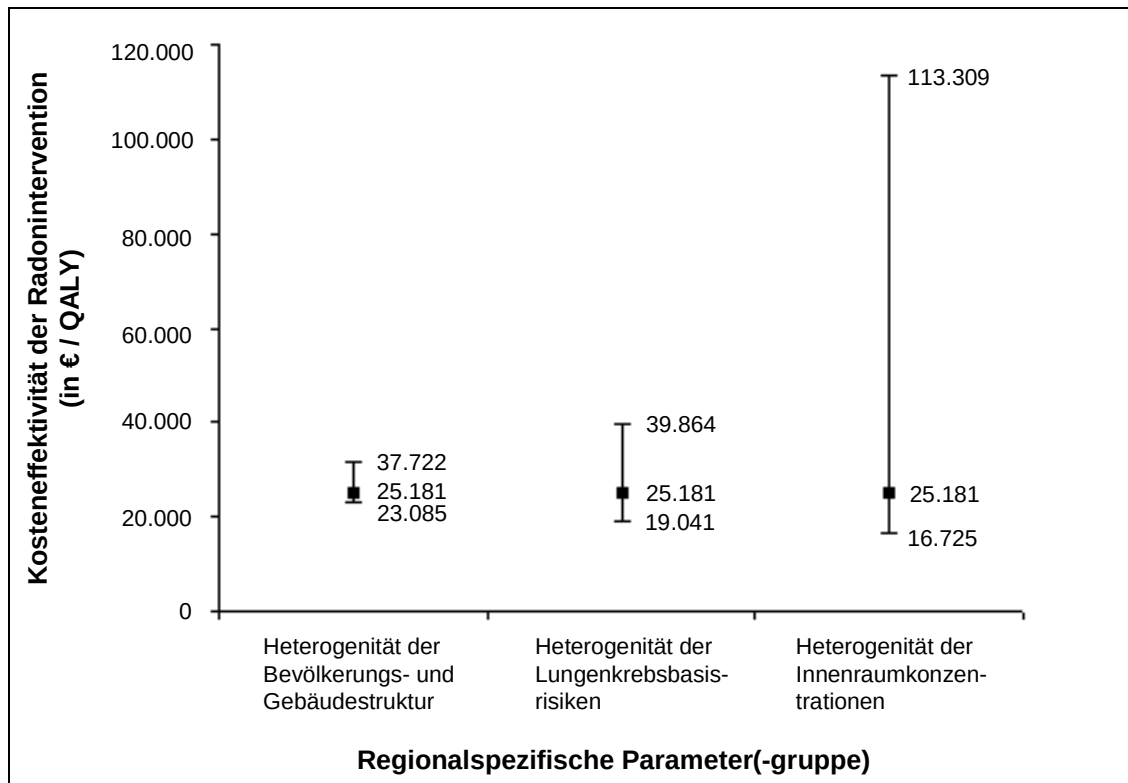
Um den Effekt der regionalen Heterogenität weiterer Einflussfaktoren auf die regionalspezifischen Unterschiede der Kosteneffektivität der Radonintervention detaillierter zu untersuchen, wurde eine adjustierte Version des Modells im Rahmen der kleinräumigen Analyse auf Landkreisebene programmiert. Dabei wurden zunächst die wesentlichen Modellparameter mit dem größten Einfluss auf die räumliche Variabilität identifiziert und in drei Gruppen zusammengefasst:

- Faktoren, welche die Bevölkerungs- und Gebäudestruktur betreffen
- die Basisrisiken der Lungenkrebserkrankung
- sowie die durchschnittliche Innenraumkonzentration in den betrachteten Regionen.

Dadurch war es möglich im Rahmen einer Analyse der räumlichen Varianz für jeden Faktor beziehungsweise jede Gruppe von Faktoren individuell zu kontrollieren, indem alle übrigen Parameter auf den nationalen Durchschnittswert gesetzt wurden.

Abbildung 23 zeigt das Spektrum der Modellergebnisse exemplarisch für Szenario 1 in Kombination mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m^3 , unter der Annahme, dass die Ausprägungen jeweils nur einer Gruppe von Parametern entsprechend ihrer regionalen Verteilung variiert werden (*ceteris paribus*). Das heißt, die zugehörigen Intervalle (die durchgezogenen Linien in der Grafik), die jeweils das Ergebnisspektrum für 90 % der untersuchten Landkreise abdecken, ergeben sich allein aus der regionalen Heterogenität eines Inputparameters / einer Gruppe von Inputparametern.

Abbildung 23: Variation der Modellergebnisse, die der regionalen Heterogenität spezifischer Parameter(-gruppen) zugerechnet werden kann (Radonsanierung: Szenario 1; EN = 100 Bq/m³)



QALY = qualitätsadjustiertes Lebensjahr

Hinweis: die durchgezogenen Linien zeigen das Intervall, das die Modellergebnisse von 90% der deutschen Landkreise abdeckt wenn jeweils ein Inputparameter beziehungsweise eine Gruppe von Inputparametern variiert wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine Darstellung der Unsicherheitsbereiche verzichtet (die Grafik zeigt lediglich die besten Schätzwerte)

Quelle: eigene Darstellung

Die Analyse zeigt, dass von den unterschiedlichen Verteilungen der Innenraumkonzentrationen erwartungsgemäß der größte Einfluss auf die regionale Variabilität der Modellergebnisse ausgeht. Jedoch haben auch die Bevölkerungs- und Gebäudestruktur, insbesondere die Belegungsrate und die Anzahl der Haushalte je Wohngebäude, sowie die (radonadjustierten) Basisrisiken der Lungenkrebserkrankung einen deutlichen Effekt auf die Kosteneffektivität der Intervention. Dabei konnten vor allem Letztere nicht detaillierter untersucht werden, da präzise, kleinräumige Daten hinsichtlich der wesentlichen Einflussfaktoren nicht zur Verfügung stehen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Lungenkrebsrisiko überwiegend durch den aktiven Tabakkonsum bestimmt ist (etwa 90 % der gesamten Inzidenz kann die-

sem Faktor zugerechnet werden). Andere Expositionen (z. B. aufgrund weiterer Lifestyle-Faktoren oder berufs- beziehungsweise umweltbedingt) sowie spezifische individuelle Faktoren (z. B. die individuelle genetische Dispositionen eines Individuums) haben dagegen einen vergleichsweise geringen Einfluss [81]. Da die Rauchprävalenz in Deutschland regional starke Unterschiede aufweist [82], ist anzunehmen, dass ein Großteil der regionalen Heterogenität der Lungenkrebsbasisrisiken darauf zurückgeführt werden kann.

Eine detaillierte Analyse aller untersuchten Szenarien zeigt, dass der relative Einfluss, den die Radonverteilung auf die räumliche Ergebnisvariabilität ausübt, weiter ansteigt, wenn der Analyse höhere Eingriffsniveaus zu Grunde gelegt werden. Dies ist vor allem dadurch bedingt, dass in den Gebäuden mit Belastungen $> \text{EN}$ höhere Radonkonzentrationen vorliegen und somit der Effekt einer durchschnittlichen Sanierungsmaßnahme auf die Lungenkrebsinzidenz ebenfalls größer ist. Auch in den Szenarien 2 und 3 übt die Radonverteilung einen größeren Effekt auf die regionale Variabilität der Modellergebnisse aus, da diese den Anteil der letztlich sanierten Gebäude stärker beeinflusst.

Im Rahmen der Analyse des radonsicheren Bauens zeigt sich, dass die strukturellen Inputparameter des Modells insofern einen etwas größeren Einfluss auf die Ergebnisvariabilität auf regionaler Ebene haben, als dass diese im Hinblick auf Neubauten anders verteilt sind als bei bestehenden Wohngebäuden. Besonders deutlich wird dies in den betrachteten Hochrisikogebieten. Die Kosteneffektivität der Radonsanierung ist in beiden Regionen sehr ähnlich (zumindest für die günstigeren Strategien), wohingegen das radonsichere Bauen in HRG2 deutlich kosteneffektiver ist, nicht zuletzt da hier durchschnittlich deutlich mehr Personen von einer Interventionsmaßnahme profitieren.

6.4 Zusammenfassender Vergleich der Kosteneffektivität von Radonsanierung bestehender Gebäude und radonsicherem Bauen

Für die Entwicklung einer unter Wirtschaftlichkeitsaspekten optimalen Interventionsstrategie ist es unerlässlich, sowohl präventive Maßnahmen im Zuge des Neubaus von Wohnhäusern,

als auch die Radonsanierung bereits bestehender Gebäude in der Kosteneffektivitätsanalyse zu berücksichtigen, da hier zwei gegenläufige Effekte zu Tage treten. Einerseits ist die Radonprävention mit geringeren durchschnittlichen Kosten der Intervention sowie einem höheren durchschnittlichen Effekt je Gebäudeeinheit verbunden. Andererseits kann die zu erwartende Belastung *a priori* kaum bestimmt werden, so dass ein Großteil der sanierten Gebäude auch ohne Intervention je nach Eingriffsniveau nur vergleichsweise niedrige Innenraumkonzentrationen, überwiegend unterhalb des EN aufweisen würde.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Ergebnisse der Kosteneffektivitätsanalyse beider Interventionskontexte zunächst separat betrachtet und detailliert beschrieben. Im Folgenden wird daher ein zusammenfassender Vergleich der einzelnen Strategien angestrebt.

Die KEA der Radonsanierung zeigte, dass ein obligatorisches Screening in Kombination mit der verpflichtenden Intervention bei Überschreiten einer definierten Belastungsgrenze (Szenario 1) das niedrigste Kosteneffektivitätsverhältnis aufweist. Darüber hinaus ist ein Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ unter Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten in jedem untersuchten Szenario höheren Grenzwerten vorzuziehen. Dieses Ergebnis bestätigt sich auch für jede untersuchte räumliche Einheit im Rahmen der regional differenzierten Analyse auf verschiedenen Ebenen. Hinsichtlich des radonsicheren Bauens ist eine Strategie, die nach der ersten Intervention auf weitere Tests und etwaige zusätzliche Maßnahmen verzichtet, der Alternative, die solche Eingriffe berücksichtigt, deutlich überlegen. Dies gilt ebenso für alle Eingriffsniveaus sowie auf jeder räumlichen Ebene für jede untersuchte regionale Einheit.

Ein direkter Vergleich der Kosteneffektivität präventiver Maßnahmen mit der Radonsanierung bestehender Gebäude offenbart wesentliche Implikationen für eine geeignete Interventionsstrategie. Das zentrale Ergebnis der Analyse besagt, dass – zumindest aus der Perspektive der Kosteneffektivität – ein verpflichtendes Screening aller Wohnhäuser, in Kombination mit der Sanierung von Gebäuden, deren Radonbelastung einen Wert von 100 Bq/m³ übersteigt, dem radonsicheren Bauen in fast allen Fällen deutlich überlegen ist. Dies bestätigt sich für bundeseinheitliche Strategien und regional differenzierte Interventionen auf Ebene der Bun-

desländer sowie für die beiden untersuchten Hochrisikogebiete. Auf Landkreisebene existieren lediglich drei Regionen, in welchen die Kosten je gewonnenes QALY für präventive Radonschutzmaßnahmen niedriger ausfallen, als für das nachträgliche Sanieren existierender Gebäude. Dies betrifft dabei ausschließlich diejenigen Kreise mit den niedrigsten durchschnittlichen Radonkonzentration, geringen Basisrisiken der Lungenkrebserkrankung (radoninduziert und nicht radoninduziert) und dementsprechend dem schlechtesten Kosteneffektivitätsverhältnis (sowohl bezüglich der Radonsanierung als auch der Sanierung bestehender Gebäude).

Dieses Ergebnis ist vor allem in der Tatsache begründet, dass den Kosten des universellen Screenings existierender Gebäude in den genannten Regionen, welche unabhängig sind von der (unbekannten) individuellen Radonkonzentration, nur geringe Sanierungsaktivitäten und dementsprechend nur minimale Effekte hinsichtlich der Lungenkrebsinzidenz gegenüberstehen. Das radonsichere Bauen dagegen beeinflusst die Zahl der Lungenkrebserkrankungen in höherem Ausmaß, da auch vergleichsweise niedrige Schadstoffkonzentrationen (unterhalb eines hypothetischen Eingriffsniveaus) weiter verringert werden können (es werden alle Neubauten mit Radonschutzmaßnahmen versehen).

Die Unterschiede hinsichtlich der Kosteneffektivität der Sanierung und des präventiven Radonschutzes fallen darüber hinaus auch in Regionen mit sehr hoher durchschnittlicher Belastung relativ gering aus. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass mit steigender durchschnittlicher *a-priori*-Belastung, auch die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein Screening der Gebäude in vielen Fällen obsolet wird, da ein relativ großer Anteil der Wohnhäuser in einer Region ohnehin mit Radonschutzmaßnahmen ausgestattet werden würde – bereits im Zuge des Baus oder *ex post*, im Rahmen einer Sanierung nach Baufertigstellung (und einem "positiven" Testergebnis). Dennoch werden die niedrigeren Durchschnittskosten, die bei radonsicherem Bauen je Gebäude anfallen, durch die niedrigere durchschnittliche Effektivität der Maßnahme, aufgrund der geringeren Radonkonzentrationen in den betroffenen Häusern, in jedem Fall überkompensiert. Dies führt letzten Endes auch in diesen Regionen zu einer insgesamt geringeren Kosteneffektivität.

Es gilt jedoch zu beachten, dass die Radonsanierung bestehender Gebäude bei höheren Eingriffsniveaus (200 beziehungsweise 400 Bq/m³) ein zunehmend schlechteres Kostenefektivitätsverhältnis aufweist, als das radonsichere Bauen.

In Szenario 1, in Kombination mit einem Eingriffsniveau von 200 Bq/m³ (400 Bq/m³), weisen bereits etwa 55 % (100 %) der deutschen Landkreise höhere Kosten je gewonnenes QALY auf als im Rahmen der optimalen Strategie der Radonprävention (Szenario 5) in den betreffenden Gebieten anfallen. Sowohl Szenario 2 als auch Szenario 3 sind für jedes Eingriffsniveau weniger kosteneffektiv und das radonsichere Bauen wäre unter reinen Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten für jede betrachtete räumliche Einheit dem nachträgliche Sanieren vorzuziehen.

Der direkte Vergleich der untersuchten Strategien offenbart ein weiteres Differenzierungsmerkmal. Da die Anzahl der Gebäude, die mit Radonschutzmaßnahmen ausgestattet werden – relativ zu der gesamten betrachteten Population – im Rahmen des radonsicheren Bauens höher ist als bei der Sanierung bestehender Wohnhäuser und insbesondere auch der Screeningaufwand in diesem Fall nicht von Bedeutung ist, haben die Kosten der eigentlichen Maßnahmen einen insgesamt deutlich größeren Einfluss auf die gesamte Kosteneffektivität der Intervention. Daher hätte eine Reduktion dieser Kosten, anders als in den Szenarien 1–3, eine signifikante Verbesserung der Modellergebnisse zur Folge. Bei der Radonsanierung dagegen liegt der Fokus der Betrachtung auf der Identifikation der Gebäude, deren Innenraumbelastung das jeweilige Eingriffsniveau übersteigt. Aus diesem Grund würde eine Reduktion der durchschnittlichen Screeningkosten je saniertes Gebäude, d. h. ein verbessertes Testverfahren, einen größeren Beitrag zur Steigerung der Kosteneffektivität eines jeden analysierten Szenarios leisten, als es potenzielle Kosteneinsparungen hinsichtlich der Interventionsmaßnahmen vermögen.

Die KEA des präventiven Radonschutzes im Zuge von Neubauten offenbart darüber hinaus ein exorbitant hohes inkrementelles Kosteneffektivitätsverhältnis einer Strategie, die ein obligatorisches Screening aller Neubauten sowie weitere Maßnahmen bei Überschreiten eines definierten Grenzwertes beinhaltet (Szenario 4), in Relation zu Szenario 5, welches solche

weiterführenden Eingriffe nicht vorsieht und lediglich die obligatorische Ausstattung von Neubauten mit spezifischen Radonschutzmaßnahmen beinhaltet. Im Rahmen der Sanierung bestehender Gebäude finden sich entsprechende Ergebnisse für konfirmatorische Tests und obligatorische Nachbesserungen bei unzureichendem Radonschutz hingegen nicht. Das lässt sich vor allem damit begründen, dass in diesem Fall sehr viel weniger Radontests durchgeführt werden müssen, um ein Gebäude zu identifizieren, welches zusätzlicher Maßnahmen bedarf, da ohnehin nur diejenigen Wohnhäuser zu testen sind, deren Belastung bereits vor der ersten Intervention das Eingriffsniveau überschritten hat.

Ein weiterer Unterschied zwischen Radonsanierung und Radonprävention an Neubauten wird durch die kleinräumige Analyse deutlich. Die Radonsanierung existierender Gebäude weist für jede untersuchte Strategie – am deutlichsten in den Szenarien 2 und 3 – einen Punkt auf, an dem die regionale Ausdehnung der Intervention auf zusätzliche Landkreise zu einem stark überproportionalen Anstieg des Kosteneffektivitätsverhältnisses führt (vgl. Abbildung 18), da die zusätzliche Reduktion der Lungenkrebsinzidenz sehr gering ausfällt, wohingegen die Screeningkosten definitionsgemäß weiterhin proportional zu der Zahl der getesteten Gebäude ansteigen. Im Kontext des radonsicheren Bauens verläuft die Kurve des so bezeichneten regionalen ICER dagegen vergleichsweise flach (vgl. Abbildung 22). Der wesentliche Grund dafür ist, dass keinerlei Screeningkosten anfallen und selbst geringe Radonkonzentrationen noch gesenkt werden können, so dass auch in Regionen mit sehr niedriger durchschnittlicher Radonbelastung eine messbare Reduktion der Lungenkrebsfälle zu erreichen ist. Daher ist das radonsichere Bauen in Relation zur betrachteten Studienpopulation insgesamt auch sehr viel effektiver als die nachträgliche Sanierung und auch extreme Ausreißer bezüglich der Kosteneffektivität der Intervention treten in deutlich geringerem Umfang auf. Dementsprechend ist auch die regionale Differenzierung einer Interventionsstrategie für die Effizienz der Maßnahmen weniger Bedeutend, als sie es im Rahmen der Radonsanierung ist.

Das radonsichere Bauen unterscheidet sich auch insofern von der Sanierung bestehender Gebäude, als dass die Kosten der Intervention unabhängig von der ursprünglichen Belas-

tung sind. Daher weisen Regionen mit hohen Innenraumkonzentrationen ein vergleichsweise niedriges Kosteneffektivitätsverhältnis auf. Besonders deutlich wird dies bei der Analyse der betrachteten Hochrisikogebiete. So sind präventive Radonschutzmaßnahmen im Zuge von Neubauten in HRG2 sehr viel kosteneffektiver als in HRG1, wohingegen deutlich geringere Unterschiede bei der Sanierung bestehender Gebäude auftreten.

7. WESENTLICHE ANSATZPUNKTE ZUR INTERPRETATION DER ERZIELTEN MODELLERGEBNISSE

Im Rahmen von Kosteneffektivitätsanalysen wird das Verhältnis der Kosten, die mit einer Intervention verbunden sind und der daraus resultierenden Effektgrößen bestimmt. Sie erlauben jedoch nur bedingt unmittelbare Aussagen darüber, ob eine oder mehrere potentielle Maßnahmen *per se* umsetzungswürdig sind. Nicht zuletzt stellt sich daher die Frage, wie die in Kapitel 6 erzielten Ergebnisse der Untersuchung durch den Entscheidungsträger bewertet werden können.

Zunächst gilt es in diesem Zusammenhang zu beachten, dass in der deutschen Umwelt- und Gesundheitspolitik bislang keine allgemein akzeptierten Grenzwerte bezüglich der Zahlungsbereitschaft für einen bestimmten Gesundheitszuwachs, etwa in Form eines vermiedenen Lungenkrebsfalles, eines gewonnenen Lebensjahres oder eines gewonnenen QALYs, existieren. Im Ausland hingegen gibt es dazu einige Fallbeispiele, die als Orientierungspunkte bei der Einordnung der Ergebnisse dieser Studie herangezogen werden können. In den Niederlanden beispielsweise gelten medizinische Interventionen mit Kosten bis zu 20.000 €/QALY als effizient, wobei kürzlich auch ein deutlich höherer Schwellenwert von 80.000 € empfohlen wurde. In Großbritannien werden Kosten von 20.000 £ bis 30.000 £ je QALY ($\pm$ 23.000–34.500 €) gemeinhin als akzeptabel erachtet [83], wobei jedoch auch immer wieder Maßnahmen implementiert werden, die diesen Wert teilweise deutlich übersteigen [63]. Auch US-amerikanische Autoren verwenden mitunter einen Grenzwert für die Beurteilung einer möglichen Implementierung gesundheitsbezogener Interventionen. Dieser beträgt etwa 50.000 \$/QALY [84] ($\pm$ 37.500 €). Die WHO dagegen gibt den Wert eines QALYs als Faustregel mit dem dreifachen Bruttoinlandsprodukt/Kopf/Jahr an [85]. In Bezug auf

Deutschland entspricht dies ca. 90.000 €²⁴. Es bleibt jedoch anzumerken, dass eine schlüssige theoretische Fundierung der Bestimmung der nationalen Zahlungsbereitschaft in den einzelnen Ländern bislang ebenso fehlt, wie eine umfassende methodisch fundierte Untersuchung und monetäre Bewertung von Präferenzen, als Grundlage der tatsächlichen WTP.

Ferner geht neben den Kosten spezifischer Gesundheitszuwächse noch eine Reihe weiterer Faktoren in die Überlegungen zur Implementierung spezifischer Interventionsstrategien ein (z. B. der Budget Impact – also die Wirkung auf das Budget des Kostenträgers – sowie die Präsenz der jeweiligen Thematik in der öffentlichen Diskussion oder bestimmte Partikularinteressen einzelner an der spezifischen Entscheidung beteiligter (Personen-)Gruppen). Eine Analyse von 109 internationalen Kosteneffektivitätsanalysen im Bereich der Gesundheitsintervention durch Azimi und Welch [86] ergab, dass bei Kosten von mehr als 166.000 \$/QALY ($\pm$ 125.000 €) die Implementierung der Maßnahme durch die jeweiligen Autoren der untersuchten Studien überwiegend abgelehnt wurde. Bei niedrigeren Summen konnten dagegen keine eindeutigen Aussagen gewonnen werden.

Eine weitere Möglichkeit der Beurteilung von Interventionsmaßnahmen besteht darin, zu analysieren, welche Interventionen in der Praxis bereits umgesetzt wurden und welches Kosteneffektivitätsniveau dabei erreicht werden konnte. Im Bereich umweltbeeinflusster Gesundheitsstörungen existieren für Deutschland keine diesbezüglichen Untersuchungen. Für den US-amerikanischen Raum finden sich dagegen Studien z. B. für die Beseitigung von Trihalomethan im Trinkwasser, Sicherheitsstandards für Radionuklide in Uranminen, Grenzwerte bezüglich der Benzol- und Arsenexposition am Arbeitsplatz oder ein Verbot von Asbest in Baumaterialien [87]. Dabei zeigt sich, dass mitunter auch Maßnahmen umgesetzt wurden, deren Kosteneffektivitätsverhältnis gängige Grenzwerte um ein vielfaches übersteigt (für eine Übersicht ausgewählter Studienergebnisse vgl. Tabelle 10).

²⁴ StBa:

<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/Querschnittsveroeffentlichungen/WirtschaftStatistik/VGR/Bruttoinlandsprodukt2008.psml>

Tabelle 10: Beispiele für die Kosteneffektivität verschiedener Interventionen im Bereich umweltbeeinflusster Gesundheitsstörungen

Intervention	Kosten je vermiedenen Todesfall in Millionen € ₂₀₀₆ *
Sicherheitsgurte/ Airbags in KFZ	0,09
Beseitigung von Trihalomethan im Trinkwasser	0,53
Grenzwerte für berufsbedingte Benzolexposition	9,44
Grenzwerte für berufsbedingte Arsenexposition	113,41
Verbot von Asbest in Baumaterialien	117,42
Abdecken/ Versetzen industrieller Absetzanlagen im Uranbergbau	119,2
Grenzwerte für berufsbedingte Formaldehydexposition	228.407

* Umrechnung auf Basis von Kaufkraftparitäten (PPP) gemäß OECD Health Data 2009 [88]; inflationsbereinigt mithilfe des Konsumentenpreisindex des Statistischen Bundesamts [89]

Hinweis: Die in dieser Studie gefundenen Kosten bzgl. Radonsanierung liegen für das optimale Szenario (S1; AL=100 Bq/m³) im Bereich zwischen 84.218 € und 998.828 € und würden sich in der Rangfolge der Tabelle an 2. bis 3. Position befinden

Quelle: eigene Darstellung nach Viscusi *et al.* (2000)

In diesem Zusammenhang ist für die vorliegende Untersuchung insbesondere das Beispiel der Asbestsanierung von Bedeutung, da dieses gewisse Parallelen zu der Radonproblematik aufweist.

Asbest bezeichnet verschiedene, natürlich vorkommende Silikat-Mineralen, die aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften (hohe Festigkeit, Hitze- und Säurebeständigkeit, leichte Verarbeitung) in vielen Industriezweigen, insbesondere auch bei der Herstellung von Baumaterialien, Anwendung fanden. Die Inhalation von bei der Bearbeitung und dem Umgang mit asbesthaltigen Materialien freigesetzten Fasern führt, neben anderen Lungenerkrankungen, ebenso wie die Radonexposition, zu einem erhöhten Lungenkrebsrisiko. Die industrielle Verwendung von Asbest wurde daher seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts stark eingeschränkt und 1990 fast vollständig verboten [90]. Dabei ist davon auszugehen, dass ein Großteil der as-

bestbedingten Lungenkrebsfälle nach dem Verbot bis etwa 2020 klinisch manifest wird. Gemäß einer aktuellen Schätzung der Berufsgenossenschaften betrug die diesbezügliche Inzidenz in 2003 etwa 1.000 Fälle jährlich²⁵, wobei allerdings mit einem weiteren Anstieg zu rechnen ist [91]. Das Asbestverbot und vor allem auch die Sanierung belasteter Gebäude ist mit hohen Kosten verbunden, die den Aufwand der Radonintervention im Einzelfall um ein Vielfaches übersteigen können, da die technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 519) zu berücksichtigen sind und das zu sanierende Objekt staubdicht nach außen verschlossen werden muss. Zudem muss im Innenbereich unter Unterdruck gearbeitet werden, wobei die Arbeitsbereiche nur über Schleusen betreten werden dürfen. Ferner ist das Gebäude bis zum Abschluss der Arbeiten unbewohnbar.

Auch wenn die Daten zur Kosteneffektivität aus dem US-amerikanischen Kontext (vgl. Tabelle 10) im Detail nicht auf Deutschland übertragen werden können, so ist aufgrund der ähnlichen Rechtslage dennoch zumindest von einer vergleichbaren Größenordnung der zu Grunde liegenden Problematik auszugehen. Damit ist die Asbestsanierung ein gutes Beispiel dafür, dass auch sehr viel weniger kosteneffektive Interventionen in Deutschland akzeptiert sein können und in der Praxis bereits umgesetzt werden, selbst wenn die mit der Maßnahme zu erzielende Wirkung, d. h. in diesem Fall die erreichbare Reduktion der Lungenkrebsinzidenz, zumindest nicht deutlich höher ausfällt als dies bei der Radonsanierung der Fall ist.

Insgesamt bestätigen die genannten internationalen Erfahrungen somit, dass insbesondere Szenario 1, in Kombination mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ für den überwiegenden Anteil der untersuchten regionalen Zusammenhänge ein vergleichsweise günstiges Kosten-effektivitätsverhältnis aufweist, auch dann noch wenn alle vorhandenen Unsicherheitsbereiche der vorliegenden Analyse berücksichtigt werden. Ein verpflichtendes Radonscreening mit anschließender Sanierung bei Überschreiten eines Grenzwertes von 100 Bq/m³ kann daher für viele Regionen Deutschlands sowie im Rahmen einer bundeseinheitlichen Inter-

²⁵ Es ist allerdings anzumerken, dass aus Gründen der Datenerfassung von einer gewissen Dunkelziffer ausgegangen werden muss.

ventionsstrategie zumindest aus Wirtschaftlichkeitsperspektive durchaus gerechtfertigt werden.

Obgleich alle anderen Strategien in jedem regionalen Kontext dominiert werden, zeigen die Ergebnisse der regionalspezifischen Analysen, dass in einzelnen Untersuchungszusammenhängen auch andere Interventionsstrategien ein akzeptables Kosteneffektivitätsverhältnis aufweisen können. Ebenso kann das radonsichere Bauen unter bestimmten Voraussetzungen den Anforderungen an ökonomisch vertretbare Interventionen gerecht werden. Entsprechende Maßnahmen erscheinen beispielsweise dann sinnvoll, wenn der Fokus des Entscheidungsträgers auf der Effektivität der Intervention liegt – da alle Gebäude mit Radon-schutzmaßnahmen versehen werden und die absolute Reduktion der Lungenkrebsinzidenz im Rahmen präventiver Maßnahmen somit höher ist – oder strikte Regulierungen mit niedrigen Grenzwerten nicht erwünscht oder durchsetzbar sind. Unter den genannten Aspekten scheint es daher gerechtfertigt, das Aufrechterhalten des Status Quo der Radonintervention in Deutschland nochmals einer intensiven Prüfung zu unterziehen.

8. DISKUSSION DER ERGEBNISSE DES FORSCHUNGSVORHABENS UND WESENTLICHE IMPLIKATIONEN DER ANALYSE

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens „gesundheitsökonomische Betrachtung zu Radon-sanierungsmaßnahmen) wurde erstmals für Deutschland eine Kosteneffektivitätsanalyse verschiedener Interventionsstrategien zur Verringerung der Radonkonzentration in Wohngebäuden auf verschiedenen regionalen Ebenen durchgeführt. Dabei wurden neueste epidemiologische Erkenntnisse bezüglich der Radonverteilung und des Lungenkrebsrisikos durch Radonexposition berücksichtigt.

Es wurde darüber hinaus eine Methode entwickelt, die es dem Entscheidungsträger ermöglicht, entsprechend seiner maximalen Zahlungsbereitschaft für den Interventionseffekt (z. B. gewonnene qualitätsadjustierte Lebensjahre) sowie seiner Präferenz bezüglich des Umfangs regulativer Einflussnahme, unter der Nebenbedingung beschränkter Ressourcen, eine individuell optimale und auf verschiedenen Ebenen regional differenzierte Strategie zur Radonsanierung zu definieren.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die höchste inkrementelle Kosteneffektivität im Vergleich zum Status Quo mit rund 25.000 € je gewonnenes qualitätsadjustiertes Lebensjahr bei Einführung eines universellen Screeningprogramms und der obligatorischen Sanierung aller Gebäude mit Belastungen $>100 \text{ Bq/m}^3$ (S1) erreicht werden kann. Diese optimale Strategie gilt sowohl für Gesamtdeutschland, als auch auf Ebene einzelner Bundesländer und Landkreise sowie für definierte Hochrisikogebiete mit den höchsten gemessenen Radonvorkommen in deutschen Wohngebäuden. Andere Interventionen, die vor allem auf eigenverantwortliches Testen und Sanieren belasteter Wohngebäude setzen, haben dagegen einen weitaus geringeren Einfluss auf die Lungenkrebsinzidenz und weisen – verglichen mit dem Status Quo – deutlich niedrigere inkrementelle Kosteneffektivitätsverhältnisse auf, da auch bei hohen Konzentrationen überwiegend keine Interventionsmaßnahmen durchgeführt

werden. Dadurch steigen insbesondere die Screeningkosten je saniertes Wohnhaus überproportional an.

In den Regionen mit hoher Kosteneffektivität fallen diese Unterschiede jedoch geringer aus, da die Kosten für den Kauf und die Auswertung von Radontests belastungsunabhängig anfallen, dem aber aufgrund des größeren Anteils sanierter Gebäude deutlich mehr vermiedene Krankheitsfälle gegenüberstehen. Höhere Eingriffsniveaus führen ebenso durchweg zu schlechteren Kosteneffektivitätsverhältnissen als das optimale EN (100 Bq/m^3), wobei auch diesbezügliche Unterschiede in den Regionen mit einem hohen Anteil stark belasteter Wohngebäude signifikant geringer ausfallen, da höhere Eingriffsniveaus zu mehr vermiedenen Erkrankungen je durchgeführter Sanierung führen. Dies wird jedoch auch in diesem Fall immer durch den steigenden Anteil der Screeningkosten an den Netto-Gesamtkosten jeder Strategie überkompensiert, da eine höhere Zahl an Tests durchgeführt werden muss, um ein sanierungsbedürftiges Gebäude zu identifizieren.

Aufgrund der Tatsache, dass nahezu jeder Modellparameter selbst durch mehr oder weniger große Konfidenzintervalle geprägt ist, weisen alle Ergebnisse der entscheidungstheoretischen Analyse naturgemäß gewisse Unsicherheiten auf. Diese bewegen sich jedoch in einem für modellbasierte gesundheitsökonomische Evaluationen üblichen Rahmen. Dies gilt insbesondere im Kontext umweltbezogener Interventionen, deren modellrelevante Einflussfaktoren meist durch noch weitaus größere Unsicherheiten gekennzeichnet sind als beispielsweise klinische Parameter. Dabei leistet – wie in den univariaten Sensitivitätsanalysen dargelegt – das relative Risiko mit einem 95%-KI von immerhin 1,05–1,31 den größten Beitrag zur gesamten Ergebnisunsicherheit. Hier könnte weiterführende (epidemiologische) Forschung ansetzen und die Konfidenzintervalle der Studienergebnisse erheblich reduzieren.

Es ist jedoch zu beachten, dass die berechneten Modellergebnisse bezüglich des optimalen Szenarios auf der vergleichsweise restriktiven Annahme beruhen, dass etwaige (gesetzliche) Regelungen auch vollständig erfüllt werden. Das Beispiel Schweden, wo bereits seit 1980 ein striktes Radonschutzgesetz, ähnlich der in Szenario 1 untersuchten Interventionsstrategie – allerdings mit einem Zielwert $<200 \text{ Bq/m}^3$ – in Kraft ist, zeigt jedoch, dass eine vollstän-

dige Compliance auch mit verpflichtenden gesetzlichen Vorschriften nur schwer zu erreichen ist. Schätzungen deuten darauf hin, dass dort nur etwa 50 % der notwendigen Sanierungen tatsächlich durchgeführt wurden [92]. Wird den Modellberechnungen die Annahme zu Grunde gelegt, dass eine höhere Compliance mit etwaigen gesetzlichen Regelungen in Deutschland nicht durch ein entsprechendes Monitoring erreicht werden kann (*ceteris paribus*), würde sich die inkrementelle Kosteneffektivität einer gesetzlichen Regelung für EN=100 (200; 400) Bq/m³ auf etwa 40.296 € (62,869 €, 130,186 €) je QALY verringern (jeweils beste Schätzung). Auch unter diesen Umständen wäre jedoch eine verbindliche Intervention den Szenarien 2 und 3 immer noch deutlich überlegen.

Die Analyse der 16 deutschen Bundesländer offenbart ein Spektrum der Kosteneffektivität von etwa 17.000 €/QALY in Sachsen-Anhalt bis circa 52.000 €/QALY in Bremen. Die kleinräumige Analyse auf Basis der deutschen Landkreise zeigt, dass die Kosten für ein gewonnenes qualitätsadjustiertes Lebensjahr in bestimmten Gebieten mit – aus der Perspektive der Kosteneffektivität betrachtet – günstigen Voraussetzungen etwa 12.000 € und somit weniger als die Hälfte des durchschnittlichen Aufwands für Deutschland betragen können. Andere Regionen dagegen weisen auch im Rahmen der optimalen Strategie im Extremfall ein Kosteneffektivitätsverhältnis von mehreren Hundert Millionen € je QALY auf.

Werden allein die höchst belasteten Gebiete Deutschlands bei der KEA berücksichtigt, welche lediglich 7,5 % (HRG1) beziehungsweise etwas über 2 % (HRG2) der deutschen Wohngebäude beinhalten, so kann ein Kosteneffektivitätsverhältnis von rund 20.000 €/QALY erreicht werden. Dabei ließe sich die radonbedingte Lungenkrebsinzidenz um circa 20 % beziehungsweise circa 10 % der insgesamt im Rahmen einer national einheitlichen Strategie vermeidbaren Fälle reduzieren.

Die Ausstattung von Wohngebäuden mit Radonschutzmaßnahmen im Zuge von Neubauten weist im direkten Vergleich mit der nachträglichen Sanierung ein deutlich schlechteres inkrementelles Kosteneffektivitätsverhältnis gegenüber dem Status Quo auf. So betragen die Kosten/QALY im Rahmen einer bundeseinheitlichen Strategie rund 65.000 € (Szenario 5).

Wird das Ergebnis der Radonintervention nach Baufertigstellung durch einen konfirmatorischen Test überprüft und werden gegebenenfalls weitere Maßnahmen ergriffen (Szenario 4), verschlechtert sich die inkrementelle Kosteneffektivität in Relation zu der aktuellen Situation auf circa 69.000 €, da dem erheblichen Aufwand für das Screening der betroffenen Wohnhäuser nur geringe Effekte gegenüberstehen. Im Einzelfall können die Kosten für ein zusätzliches gewonnenes QALY durch konfirmatorisches Screening und weitere Maßnahmen nach erfolgter Intervention jedoch mehr als 10 Mio. € betragen.

Die obligatorische Radonprävention ohne weitere Eingriffe erweist sich auch auf allen regionalen Ebenen als dominante Strategie gegenüber Szenario 4. Das Ergebnisspektrum auf Bundeslandebene bewegt sich dabei zwischen circa 39.000 € in Thüringen und circa 116.000 € in Berlin. In einzelnen Landkreisen kann bestenfalls ein Kosteneffektivitätsverhältnis von rund 15.000 €/QALY erreicht werden, in seltenen Fällen betragen die Kosten je qualitätsadjustiertes Lebensjahr bis zu 1 Mio. €. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse bezüglich der Dominanz von Szenario 5 gegenüber Szenario 4 auf der Annahme beruhen, dass die Qualität der Radonschutzmaßnahmen unabhängig von der Überprüfung der *ex-post*-Belastung durch einen konfirmatorischen Test gewährleistet werden kann. Dies mag unter realen Bedingungen nicht immer der Fall sein.

Darüber hinaus sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass neben den betrachteten Szenarien eine weitere potentielle Strategie der präventiven Radonintervention in dieser Studie nicht explizit berücksichtigt wurde. Theoretisch wäre es möglich, bereits vor Baubeginn Bodenluftmessungen am jeweiligen Standort durchzuführen und etwaige Interventionen von den diesbezüglichen Messergebnissen und zuvor definierten Grenzwerten abhängig zu machen. Es gilt jedoch als wissenschaftliche Tatsache, dass Innenraumkonzentrationen auf der Basis solcher Messungen im Bauuntergrund nicht präzise vorhergesagt werden können. Eine entsprechend geringe Sensitivität beziehungsweise Spezifität der Bodenluftmessungen hätte zur Folge, dass auf der einen Seite eine bestimmte Anzahl an Gebäuden „grundlos“ mit Radonschutzmaßnahmen versehen werden würde. Andererseits könnten auch viele hoch belastete Wohnhäuser nicht identifiziert und die Radonkonzentration dementsprechend nicht

reduziert werden. Hinzu kommt, dass die Kosten solcher Tests deutlich höher ausfallen, als im Rahmen des Screening bestehender Innenräume, nicht zuletzt da diese nur von qualifiziertem Fachpersonal durchgeführt werden können (Sicherstellung einer standardisierten Bodenluftentnahme bezüglich Tiefe, Anzahl der erforderlichen Messungen und Vermeidung von Kontaminationen). Darüber hinaus ist auch die fachkundige Bewertung des Bauuntergrunds zu beachten, z. B. hinsichtlich der Gasdurchlässigkeit des Bodens. Durch den nötigen Messaufwand kann es auch zu Verzögerungen im Baufortschritt und einer damit einhergehenden Erhöhung der Baukosten kommen.

Valide Daten hinsichtlich der Sensitivität/ Spezifität sowie anderer wesentlicher Parameter der skizzierten Strategie sind nicht in ausreichendem Umfang verfügbar. Um dennoch zu einer ersten Schätzung bezüglich der Kosteneffektivität zu gelangen, wurde eine adjustierte Version des Basismodells für eine bundeseinheitliche Umsetzung dieses zusätzlichen Szenarios programmiert, welche auf drei stark vereinfachenden Annahmen beruht:

- (i) es treten keine Messfehler auf und Innenraumkonzentration können präzise durch Bodenluftmessungen vorhergesagt werden
- (ii) die Kosten dieser Messungen entsprechen den Kosten des Screenings bestehender Gebäude
- (iii) (iii) es entstehen keine zusätzlichen Kosten, z. B. aufgrund einer verlängerten Bauzeit.

Es zeigt sich, dass die betrachtete Vorgehensweise in Kombination mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m³ auch unter diesen sehr restriktiven Annahmen nur zu einem geringfügig besseren Kosteneffektivitätsverhältnis führt, als die nachträgliche Radonsanierung.

Dieses Ergebnis lässt sich vor allem auf abweichende Kostenstrukturen zurückführen, da die Kosten der Maßnahmen im Rahmen des radonsicheren Bauens unabhängig sind von der individuellen Belastung. Ferner hat der konstante Aufwand für das universelle Screening sowohl bei der Radonsanierung, als auch dem zusätzlichen Szenario der Radonprävention

einen großen Anteil an den Gesamtkosten, so dass sich der größere durchschnittliche Effekt der Intervention nur geringfügig auf die Kosteneffektivität auswirkt. Höhere Eingriffsniveaus führen zwar zu einem relativen Anstieg der vermiedenen Lungenkrebsfälle je durchgeführter Maßnahme, werden jedoch durch die relative Zunahme der Screeningkosten überkompensiert. Obgleich mehr Daten nötig sind, um die beschriebene Strategie detaillierter zu untersuchen, deutet diese erste Analyse dennoch darauf hin, dass höchst wahrscheinlich kein signifikant besseres Kosteneffektivitätsverhältnis erreicht werden kann, als durch das universelle Screening bestehender Gebäude in Kombination mit einem Eingriffsniveau von 100 Bq/m^3 – zumindest im Rahmen einer bundeseinheitlichen Strategie.

Die Ergebnisse dieser Studie, vor allem im Rahmen der kleinräumigen Analyse, zeigen auch, dass die Effekte von Radoninterventionsmaßnahmen neben der individuellen Radonbelastung des betrachteten Gebiets in erheblichem Maße durch weitere Faktoren determiniert sind, die bislang bei der Planung von Interventionsstrategien fast vollständig vernachlässigt wurden. Daher kann nicht unmittelbar von dem Radonvorkommen in einer Region auf die Kosteneffektivität von Interventionen – radonsicheres Bauen oder nachträgliche Radonsanierung – geschlossen werden. So hat insbesondere das Basisrisiko der Lungenkrebserkrankung einen signifikanten Einfluss auf die Kosteneffektivität der jeweiligen Strategie. Da die relativen Risiken der Radonexposition und weiterer lungenkrebsverursachender Noxen (z.B.: Tabakkonsum) häufig einen multiplikativen Zusammenhang aufweisen [30], haben Sanierungsmaßnahmen in Regionen mit hohen radonunabhängigen Basisrisiken der Lungenkrebserkrankung einen größeren Wirkungsgrad, als in Regionen mit geringen diesbezüglichen Belastungen.

Ebenso von Bedeutung für die Kosteneffektivität der Radonsanierung sind bestimmte Parameter der Bevölkerungs- und Gebäudestruktur, insbesondere die Anzahl der Personen je sanierter Wohneinheit, da bei einer hohen Belegungsquote mehr Individuen von der Reduktion der Schadstoffexposition profitieren und somit insgesamt ein größerer Effekt erzielt werden kann. In Deutschland finden sich diesbezüglich erhebliche regionalspezifische Unterschiede. Werden diese Faktoren bei der Gestaltung einer optimalen regionalen Interventi-

onsstrategie (Szenario 1; EN = 100 Bq/m³) berücksichtigt, so könnte beispielsweise das Ziel, die radonbedingte Lungenkrebsinzidenz um 30 % zu reduzieren mit einem um 15% niedrigeren finanziellen Aufwand erreicht werden als bei einer Interventionsstrategie, welche lediglich an der Radonbelastung orientiert ist.

Es gilt in diesem Zusammenhang jedoch zu beachten, dass eine Strategie, die neben der Radonbelastung auch andere Faktoren berücksichtigt, die durch das individuelle Verhalten der betroffenen Personen determiniert sind (z. B. Lifestylefaktoren wie der aktive Tabakkonsum), unter Umständen ethische Fragestellungen berührt. Eine ausführliche Diskussion derartiger Problembereiche ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht möglich, sollte jedoch einen wesentlichen Bestandteil der möglichen Implementierung regulativer Eingriffe darstellen.

Bei der Umsetzung der möglicher Interventionsstrategien können die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ermittelten Ergebnisse zur Kosteneffektivität von Entscheidungsträgern – also der Politik oder von ihr beauftragten Institutionen – zur Beurteilung der wirtschaftlichen Auswirkungen von Entscheidungen herangezogen werden. In diesem Sinne liefert der Bericht Zahlengrundlagen für folgende Kategorien, die für Entscheidungsträger Orientierungspunkte beim Befinden über Interventionsmaßnahmen bilden können:

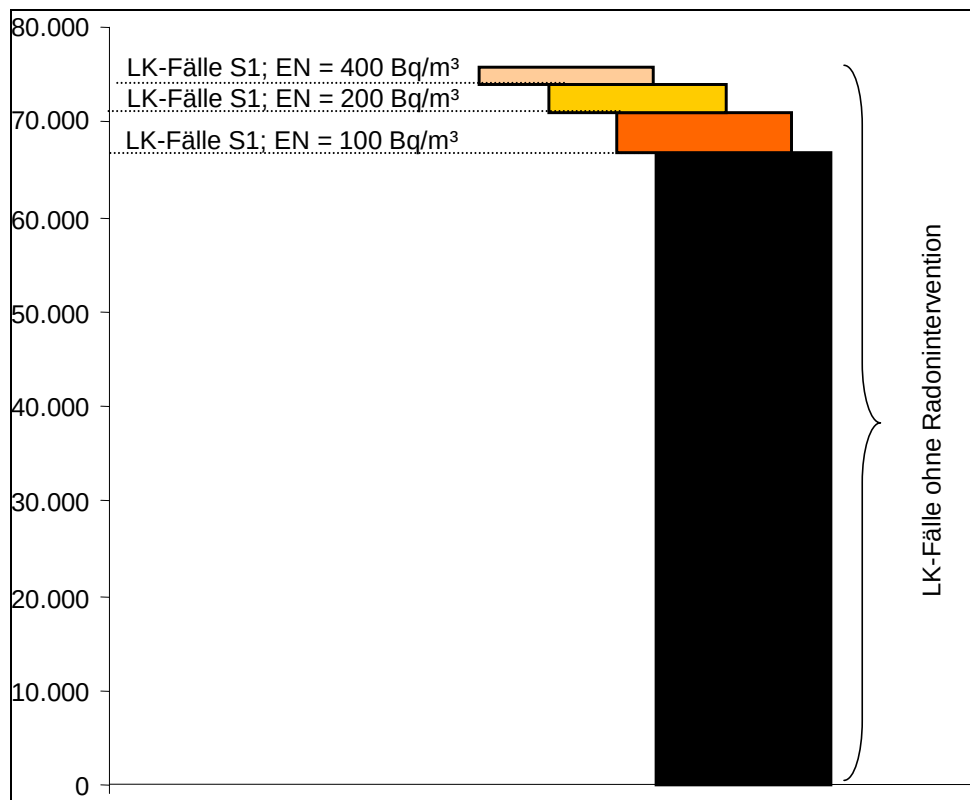
- Die mit der Exposition verbundene Krankheitslast (expositionsbedingte Inzidenz und Anteil an der Gesamtinzidenz von Lungenkrebs)
- Die durch optimalen Radonschutz reduzierbare Krankheitslast für verschiedene Präventionsstrategien
- Die Wirtschaftlichkeit dieser Präventionsstrategien.

Werden beispielsweise Maßnahmen bis zu 100.000 €/QALY akzeptiert, so wäre die verpflichtende Sanierungsstrategie ab 100 Bq/m³ als wirtschaftlich anzusehen, unter Berücksichtigung der Unsicherheit weniger restriktive Ansätze, höhere Eingriffsniveaus sowie die Neubausanierung jedoch nicht mehr – zumindest auf der Ebene bundeseinheitlicher Strate-

gien. Dabei ist jedoch zu beachten, dass in Entscheidungen für oder gegen spezifische Interventionsstrategien immer auch andere Aspekte einfließen können.

So sollte neben dem Aspekt der Kosteneffektivität für das Design einer Interventionsstrategie beispielsweise auch die Effektivität der in Frage kommenden Maßnahmen berücksichtigt werden. In Abbildung 24 ist die Wirkung des kosteneffektivsten Szenarios (S1) für alle Eingriffsniveaus nochmals in Relation zu der gesamten Lungenkrebsinzidenz während der Beobachtungsperiode grafisch dargestellt. Daraus wird deutlich, dass auch im Rahmen der wirtschaftlichsten und insgesamt effektivsten Handlungsalternative nur ein verhältnismäßig kleiner Teil aller Lungenkrebsfälle verhindert werden kann (alle weiteren betrachteten Szenarien haben einen noch sehr viel geringeren Effekt, so dass sie grafisch nicht sinnvoll in Relation zu der gesamten Inzidenz dargestellt werden können (vgl. 6.1)). Dies ist vor allem in der Tatsache begründet, dass die überwiegende Zahl der Wohngebäude in Deutschland eine Radonbelastung von weniger als 100 Bq/m³ aufweist (insbesondere sind Radonkonzentration von mehr als 200 Bq/m³ beziehungsweise mehr als 400 Bq/m³ äußerst selten (vgl. 4.1 und Abbildung 8)). Diese werden auch in dem restriktivsten Szenario der Modellanalyse als nicht sanierungsbedürftig eingestuft (auch im internationalen Vergleich finden sich in keinem Land Eingriffsniveaus <100 Bq/m³). Aufgrund der linearen Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen Radonbelastung und Lungenkrebs (vgl. 4.2) tragen jedoch auch geringe Dosen des Schadstoffs zu einer Erhöhung des Krankheitsrisikos bei, so dass in der Gesamtbetrachtung tatsächlich der Großteil der radonbedingten Lungenkrebsfälle Belastungen <100 Bq/m³ zugerechnet werden kann. In den Szenarien 2 und 3 kommt hinzu, dass die überwiegende Zahl der Gebäude auch bei Vorliegen eines entsprechenden Interventionsbedarfs (Radonkonzentration > EN) nicht saniert wird.

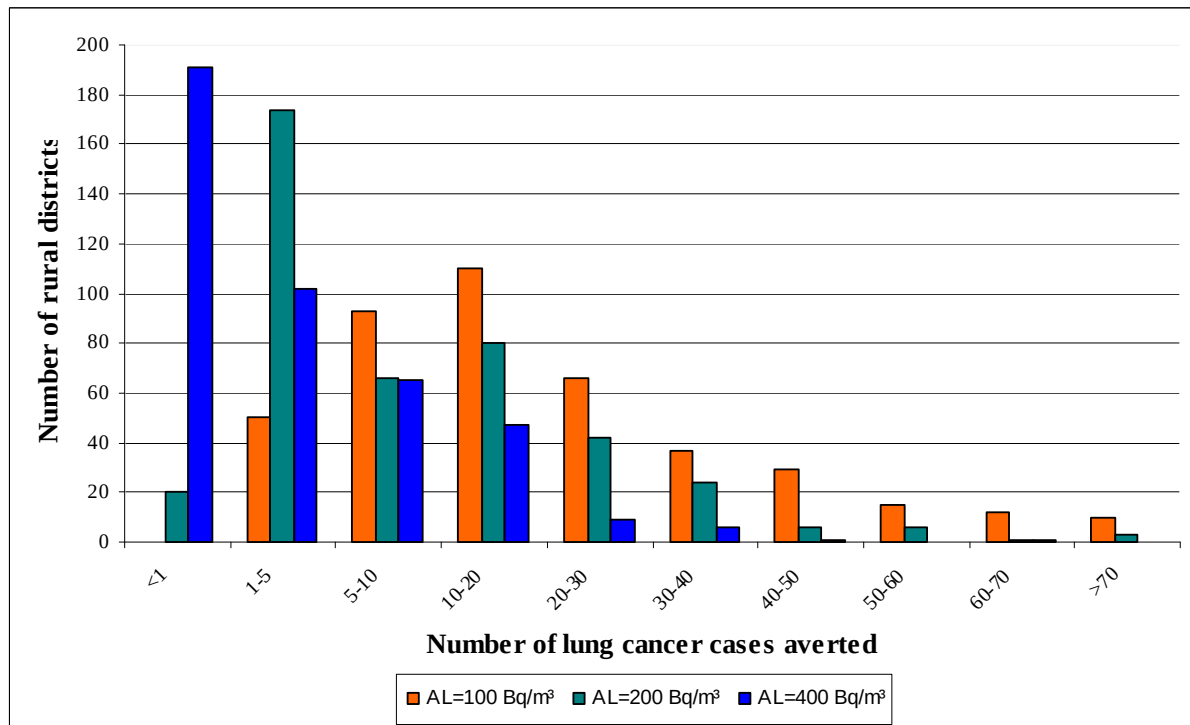
Abbildung 24: Effektivität der Radonsanierung im Rahmen von Szenario 1 in Relation zu der gesamten Lungenkrebsinzidenz während der Beobachtungsperiode



Quelle: eigene Darstellung

Auch die Perspektive der Effektivität der Radonintervention gewinnt insbesondere auf der Ebene kleinräumiger Betrachtungen an Bedeutung, da die Interventionseffekte demgemäß in bestimmten Regionen sehr gering sein können. Um diesen Gesichtspunkt detaillierter analysieren zu können, ist in Abbildung 25 die Anzahl der Landkreise dargestellt, in welchen jeweils eine bestimmte Größenordnung an Lungenkrebsfällen im Rahmen des optimalen Interventionsszenarios (S1) verhindert werden könnte.

Abbildung 25: Überblick über die absolute Effektivität der Radonsanierung auf Landkreisebene (Szenario 1)

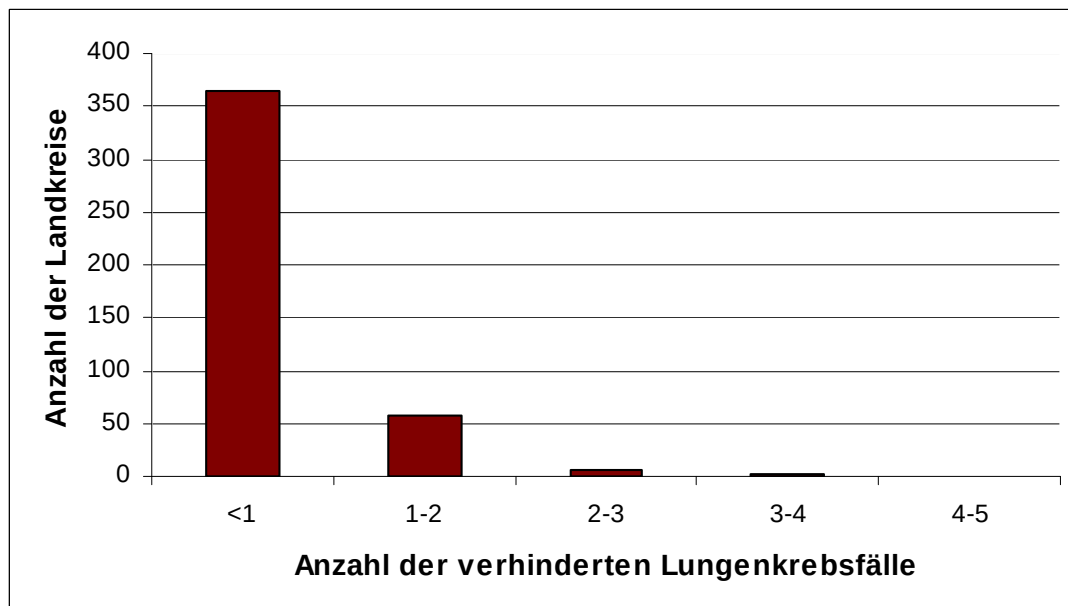


EN = Eingriffsniveau

Quelle: eigene Darstellung

Es zeigt sich, dass auch im Rahmen des wirtschaftlichsten und effektivsten Szenarios in einer Vielzahl von Landkreisen die Lungenkrebsinzidenz um weniger als einen statistischen Fall während der gesamten Beobachtungsperiode reduziert werden könnte, vor allem, wenn höhere Eingriffsniveaus zu Grunde gelegt werden. Wird ein Eingriffsniveau von 400 Bq/m³ berücksichtigt, so beträgt der Anteil dieser Regionen annähernd 50 %. In den Szenarien 2 und 3 (nicht in Abbildung 25 dargestellt) kann in der überwiegenden Zahl aller Landkreise die Lungenkrebsinzidenz nicht um mehr als einen Fall reduziert werden. Das gleiche gilt auch für die Effektivität des radonsicheren Bauens (für einen Überblick bezüglich Szenario 5 vgl. Abbildung 26; aufgrund der geringen Unterschiede zu Szenario 4 hinsichtlich der Effektivität der Intervention wird auf eine gesonderte Darstellung dieser Strategie verzichtet).

Abbildung 26: Überblick über die absolute Effektivität des radonsicheren Bauens auf Landkreisebene (Szenario 5)



Quelle: eigene Darstellung

Obgleich auch bedeutend kleinere Effekte für Umweltinterventionen, die bereits in der Praxis umgesetzt wurden nicht ungewöhnlich sind (vgl. beispielsweise den Effekt der Asbestregulierung [93, 94]), können sich daraus wesentliche Implikationen für die Politikgestaltung ergeben, insbesondere im Kontext einer regional differenzierten Umsetzung der Strategien.

Dies betrifft z. B. geeignete Formen der Risikokommunikation, vor allem bezüglich der Szenarien 2 und 3, da beide in hohem Maße von der individuellen Compliance abhängig sind. Darüber hinaus sollten auch konzertierte Maßnahmen in mehreren Regionen in Erwägung gezogen werden, um auf diese Weise einen gangbaren Ausgleich zwischen möglicherweise widersprüchlichen Zielen hinsichtlich Effektivität und Effizienz zu finden. Auch wenn eine detaillierte Analyse der Implementierung von Radoninterventionsstrategien nicht Bestandteil dieses Forschungsvorhabens ist, sollten diese Fragestellungen im Rahmen der politischen Entscheidungsfindung in jedem Falle ausreichend Beachtung finden.

Des Weiteren sind im Zusammenhang mit dem Entscheidungsprozess ebenso nicht weiter behandelte, aber möglicherweise relevante „Nebenbedingungen“ zu berücksichtigen, so et-

wa die Unterscheidung potentieller Interventionsmaßnahmen nach der haftungsrechtlichen Verantwortung für die Exposition. Anders als beispielsweise bei der Verwendung toxischer Baustoffe, handelt es sich bei Radongas um eine natürliche Exposition, für deren Vorhandensein eine eindeutige Zuordnung der Verantwortung, vor allem auch in juristischem Sinne, nicht möglich ist. Des Weiteren könnte auch die Orientierung an den international umgesetzten Präventionsstrategien (vgl. Tabelle 1) – hinsichtlich einer möglichen Sanierungspflicht beziehungsweise geltender Grenz- oder Richtwerte – für etwaige Regelungen in Deutschland Relevanz erlangen. Wenn z. B. die in Bezug auf das Kriterium der Kosteneffektivität optimale Strategie (S1) nicht verfolgt wird, weil eine zwingende Verpflichtung zur Maßnahmenausführung nicht erwünscht ist und sich mit 100 Bq/m³ ein niedrigerer Grenzwert als in den meisten anderen Ländern politisch nicht durchsetzen lässt, dann könnte die Radonintervention anhand der vorliegenden Ergebnisse aus wirtschaftlichen Gründen abgelehnt werden – zumindest im Sinne einer bundeseinheitlichen Strategie. Der starke Wirkungsverlust bei freiwilliger Maßnahmenausführung in den Szenarien 2 und 3 des Modells ist dabei insbesondere auf die Ergebnisse der Studie von Doyle et al. zurückzuführen, welche die aktuell beste verfügbare Evidenz darstellt, insbesondere da die Faktenüberprüfung durch die Autoren besonders intensiv und nachvollziehbar durchgeführt wurde. Ob diese Resultate das Verhalten deutscher Betroffener wirklich vollständig reflektieren können, müsste jedoch gegebenenfalls im Rahmen einer empirischen Untersuchung weiter analysiert werden.

Darüber hinaus können auch Fragen der Finanzierung und deren Einfluss auf die Anreizsysteme in der betroffenen Bevölkerung, welche nicht Bestandteil dieses Forschungsvorhabens sind, erhebliche Bedeutung für die Implementierung etwaiger Interventionen erlangen. So wäre etwa zu analysieren, inwiefern sich verschiedene Subventionsstrategien auf die Compliance mit Richtlinien zur Radonintervention auswirken, da die geringe Kosteneffektivität der weniger restriktiven Szenarien überwiegend auf Reibungsverluste im Rahmen des Screenings (Kauf, Durchführung und Auswertung von Radontests) und der anschließenden Realisierung baulicher Maßnahmen (Sanierung, Ergebniskontrolle, gegebenenfalls weitere Interventionen) zurückgeführt werden kann.

Durch geeignete Anreize, z. B. in Form von steuerlichen Erleichterungen hinsichtlich des Sanierungsaufwands, könnte die Compliance verbessert und somit auch ein besseres Kosteneffektivitätsverhältnis erreicht werden, wobei hier insbesondere auch die Perspektive der Analyse besondere Bedeutung erlangt. Für eine detaillierte Untersuchung dieser Fragestellung wäre es jedoch erforderlich, die Effektivität derartiger Subventionen hinsichtlich der angestrebten Verhaltensänderung zu analysieren. Auch in diesem Zusammenhang wäre die Durchführung einer empirischen Untersuchung erforderlich, da keine verlässlichen Daten in der Literatur vorliegen.

Als wesentliche Outcomeparameter der KEA unter Berücksichtigung solcher Maßnahmen und deren Wirkmechanismen wären insbesondere die Budgetwirkung (Budget Impact), also der erforderliche Aufwand des Subventionsgebers, die Veränderung der Lungenkrebsinzidenz (oder zusätzliche gewonnene Lebensjahre beziehungsweise QALYs), die Veränderung der Wirtschaftlichkeit des gesamten Programms sowie die inkrementelle Wirtschaftlichkeit des Programms im Vergleich zu den relevanten Vergleichsszenarien von Interesse.

Nicht zuletzt sind darüber hinaus für die etwaige Umsetzung der Ergebnisse dieser Untersuchung im Rahmen des politischen Entscheidungsprozesses gegebenenfalls auch gesetzliche Orientierungspunkte zu beachten. So könnte ein regional differenziertes Vorgehen, dass aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen durchaus sinnvoll erscheint, mit der Herstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse als Aufgabe des Bundes (Art. 72 GG) beziehungsweise dem Raumordnungsgesetz (§ 2 Abs. 2 Nr. 1 ROG) konkurrieren, welches „Im Gesamtraum der Bundesrepublik Deutschland und in seinen Teilräumen ausgeglichene soziale, infrastrukturelle, wirtschaftliche, ökologische und kulturelle Verhältnisse“ anstrebt. In diesem Sinne sollte die Untersuchung von Implementierungsgesichtspunkten insbesondere auch auf juristische Fragestellungen ausgeweitet werden.

Neben den oben genannten Aspekten der Umsetzung sind hinsichtlich der vorliegenden Untersuchung auch noch einige wichtige Restriktionen anzuführen. Für viele Daten, insbesondere bezüglich der Compliance, liegen nur Werte aus angloamerikanischen Studien vor. Inwiefern sich diese auf den deutschen Kontext übertragen lassen, ist naturgemäß mit einer

gewissen Unsicherheit behaftet. Auch war eine regionalspezifische Differenzierung dementsprechend nicht möglich. Darüber hinaus mussten im Rahmen der KEA des radonsicheren Bauens einige Modellparameter, insbesondere hinsichtlich der Populations- und Gebäudestruktur aus der Untersuchung bestehender Wohnhäuser extrapoliert werden. In dieser Hinsicht beruht die Kosteneffektivitätsanalyse vor allem auf der Annahme, dass die regionale Verteilung der Radonkonzentration in existierenden Gebäuden und Neubauten als identisch erachtet werden kann. Dem lässt sich jedoch entgegen halten, dass aufgrund einer verbesserten Bauweise auch ohne spezifische Intervention weniger Radongas aus dem Untergrund in den Innenraum eindringt und die durchschnittliche Exposition der Bewohner dementsprechend geringer ausfällt. Andererseits führt die Fokussierung auf eine möglichst energiesparende Gestaltung von Neubauten häufig zu einer Reduktion der Luftaustauschraten und somit auch zu der vermehrten Akkumulation des Schadstoffs im Gebäude. Erste Schätzungen gehen davon aus, dass als Ergebnis von Modernisierungsmaßnahmen an Gebäuden, die beispielsweise entsprechend den Vorgaben der Energieeinsparverordnung (EnEV 2002) mit dem Ziel der effizienteren Nutzung von Energie durchgeführt werden, die Radonkonzentration in etwa der Hälfte der Fälle sogar um den Faktor 2 bis 8 ansteigen könnte [95].

In der Modellierung der Kosteneffektivität der Radonprävention wurde unterstellt, dass sich die beschriebenen Effekte gegenseitig aufheben, wobei für eine abschließende Beurteilung eine detailliertere Untersuchung im Rahmen spezifischer Messkampagnen nötig wäre. Darüber hinaus wurde in dieser Studie unterstellt, dass die Gesundheitsfolgen in (Trink-)Wasser gelösten Radons sowie die Radonexhalation aus Baustoffen sowie bei der Verfeuerung von Kohle und Erdgas frei gesetztes Radon für Deutschland (und die meisten anderen europäischen Staaten) gemäß [4, 56] nur in Ausnahmefällen von Bedeutung ist, z. B. bei Verwendung von radioaktiv kontaminiertem Haldenmaterial in (ehemaligen) Bergbaugebieten. Allerdings führen einige Autoren an, dass insbesondere kontaminierte Baumaterialien, doch in signifikantem Umfang zur häuslichen Radonbelastung beitragen können (vgl. z. B. [96, 97]). Diese spezifische Forschungsfrage ist in der internationalen Literatur jedoch kontrovers diskutiert und insgesamt nur unzureichend dokumentiert.

Auch für die Kosten der Radonintervention konnten nur wenig detaillierte Daten erhoben werden, da diese *a priori* nur bedingt kalkulierbar sind und für Deutschland kaum empirische Daten vorliegen. In diesem Zusammenhang ist auch fraglich, ob die Kostenstruktur bezüglich einer weiteren Sanierung von Wohnhäusern, die bereits im Zuge des Neubaus mit Radon-schutzmaßnahmen ausgestattet wurden als analog zu den Kosten der Sanierung bestehender Gebäude ohne derartige Eingriffe erachtet werden kann. Es zeigte sich jedoch in der probabilistischen Analyse der Basismodelle, dass die Ergebnisse der KEA durch die Unsicherheit hinsichtlich der Kostenparameter der Analyse nur geringfügig beeinflusst werden. Des Weiteren wurde die dem Modell zu Grunde liegende Radonverteilung Deutschlands nicht für jede Region auf Basis der gleichen Messpunktdichte berechnet. Dünnbesetzte Kreise mussten teilweise durch bestimmte Extrapolationsverfahren aufgefüllt werden. Dies führt dazu, dass insbesondere die kleinräumigen Analysen durch gewisse Unsicherheiten gekennzeichnet sind. Vor allem die Ergebnisse auf der Ebene von Landkreisen sollten daher als Schätzwerte, basierend auf dem aktuell besten verfügbaren Wissen betrachtet werden, wobei sich die Informationsdichte zwischen den Landkreisen zum Teil deutlich unterscheidet. Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, anhand einer detaillierten Kosteneffektivitätsanalyse sowie weiterer Untersuchungen, aufgezeigt werden konnte, wie ein Entscheidungsträger optimale kleinräumige Strategien zur Verringerung der Radonkonzentration in deutschen Wohngebäuden definieren kann, basierend auf seiner Zahlungsbereitschaft für zusätzliche Gesundheit, in Verbindung mit individuellen Prämissen hinsichtlich Art und Umfang regulativer Einflussnahme. Substantielle Unsicherheiten in den Ergebnissen bestehen insbesondere darin, dass für einige Regionen keine hinreichend genauen Modellparameter verfügbar sind. Im Modell wurde dies jedoch im Rahmen umfangreicher Sensitivitätsanalysen berücksichtigt und nach Möglichkeit stets konservative Annahmen getroffen, so dass es nicht zu einer Überschätzung der Wirtschaftlichkeit der analysierten Interventionsmaßnahmen kommt. Insgesamt könnten die Modellergebnisse in ihren Unsicherheiten jedoch erheblich reduziert werden, wenn künftige Forschung genauere und detailliertere regional differenzierte Parameter liefert.

Das hier entwickelte Modell kann über Deutschland hinaus Bedeutung auch in anderen Regionen erlangen, da die Grundstruktur der Radonproblematik in vielen Ländern vergleichbar ist. Für eine genaue Abschätzung müssen allerdings jeweils regionalspezifische Parameter erhoben und in das Modell implementiert werden.

LITERATUR

- [1] Goretzki G. Medizinische Strahlenkunde physikalisch technische Grundlagen. Bielefeld: Urban & Fischer, 2004.
- [2] Henshaw DL, Eatough JP, Richardson RB. Radon as a causative factor in induction of myeloid leukaemia and other cancers. *Lancet* 1990; 335:1008-12.
- [3] Menzler S, Schaffrath-Rosario A, Wichmann HE, et al. Abschätzung des attributablen Lungenkrebsrisikos in Deutschland durch Radon in Wohnungen. Landsberg/Lech: ecomed MEDIZIN, 2006.
- [4] Brüske-Hohlfeld I, Kreienbock L, Wichmann H-E. Inhalation natürlicher Strahlung. Lungenkrebs durch Radon. *Mensch+Umwelt Spezial: Strahlung* 2006; 18:37-45.
- [5] Horvath S. Radon fordert jährlich 240 Lungenkrebstote. Ein starker, bisher wenig beachteter Risikofaktor in der Schweiz. *Schweizerische Zeitschrift für Onkologie* 2005; 3/2005:34-8.
- [6] Akerblom G. Radon Legislation and National Guidelines. SSI Report, 99-18 ISSN 0282-4434: Swedish Radiation Protection Institute, 1999.
- [7] Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen. Arbeitspapier Modellierung, Version 1.0 vom 12.10.200, http://www.iqwig.de/download/Arbeitspapier_Modellierung_v_1_0.pdf, aufgerufen am 29.06.10.
- [8] Philips Z, Bojke L, Sculpher M, et al. Good practice guidelines for decision-analytic modelling in health technology assessment: a review and consolidation of quality assessment. *Pharmacoeconomics* 2006; 24:355-71.
- [9] International Commission on Radiological Protection. Publication 65: Protection against radon-222 at home and at work. *Annals of the ICRP Volume 23/2*. Ottawa, CN: ICRP, 1994.
- [10] Kennedy CA, Gray AM. Cost effectiveness analysis of radon remediation programmes. *Science of the Total Environment* 2001; 272:9-15.
- [11] Coskeran T, Denman A, Phillips P, et al. A cost-effectiveness analysis of radon protection methods in domestic properties: a comparative case study in Brixworth, Northamptonshire, UK. *Journal of Environmental Radioactivity* 2006; 91:73-89.
- [12] Coskeran T, Denman A, Phillips P, et al. A new methodology for cost-effectiveness studies of domestic radon remediation programmes: quality-adjusted life-years gained within Primary Care Trusts in Central England. *Science of the Total Environment* 2006; 366:32-46.
- [13] Denman A, Groves-Kirkby C, Coskeran T, et al. Evaluating the health benefits and cost-effectiveness of the radon remediation programme in domestic properties in Northamptonshire, UK. *Health Policy* 2005; 73:139-50.
- [14] Stigum H, Strand T, Magnus P. Should radon be reduced in homes? A cost-effect analysis. *Health Physics* 2003; 84:227-35.

- [15] Bundesamt für Strahlenschutz. Radonhandbuch Deutschland. Bremerhaven: Verlag für Neue Wissenschaft GmbH, 2005.
- [16] Drummond MF, Sculpher MJ, Torrance GW, et al. Methods for the economic evaluation of health care programmes. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [17] Ettenhuber E, Jung T, Kreuzer M, et al. Das Radonschutzgesetz – Ein neuer deutscher Weltrekord? StrahlenschutzPraxis 2005; 4:65-7.
- [18] Kemski J, Siehlb A, Stegemann R, et al. Mapping the geogenic radon potential in Germany. Science of the Total Environment 2001; 272:217-30.
- [19] Kemski J, Klingel R, Siehl A, et al. From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany. Environmental Geology 2008; 56:1269-79.
- [20] Guhr A. Die Strahlenexposition der Bevölkerung beim Aufenthalt in Gebäuden Messtechnische Erfassung der Radonkonzentration. 1 Tagung Radonsicheres Bauen am 09/28/2005. Berlin, 2005.
- [21] Coskeran T, Denman AR, Phillips PS, et al. A critical comparison of domestic radon remediation programmes in five areas of England. Journal of Environmental Radioactivity 2002; 62:129.
- [22] NRC. The health effects of exposure to indoor radon, BEIR VI Report of the Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Washington DC: National Academy Press, 1999.
- [23] Wichmann HE. Kriterien für die Nutzung epidemiologischer Daten zur Risikoabschätzung und Grenzwertableitung. In: Fischer M, editor. Beiträge zur umwelthygienischen Standardsetzung. Berlin: Eigenverlag Verein WaBoLu, 1999:80-107.
- [24] Oberaigner W, Kreienbrock L, Schaffrath-Rosario A, et al. Radon und Lungenkrebs im Bezirk Imst / Österreich. Landsberg/Lech: ecomed, 2002.
- [25] Alavanja MC, Lubin JH, Mahaffey JA, et al. Residential radon exposure and risk of lung cancer in Missouri. American Journal of Public Health 1999; 89:1042-8.
- [26] Ruosteenoja E, Mäkeläinen I, Rytömaa T, et al. Radon and lung cancer in Finland. Health Physics 1996; 71:185-90.
- [27] Wichmann HE, Gerken M, Wellmann J, et al. Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Bundesrepublik Deutschland (Ost) – Thüringen und Sachsen. Landsberg/Lech: ecomed, 1999.
- [28] Kreienbrock L, Kreuzer M, Gerken M, et al. Case-Control Study on Lung Cancer and Residential Radon in Western Germany. American Journal of Epidemiology 2001; 153:42-52.
- [29] Wichmann HE, Kreienbrock L, Kreuzer M, et al. Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Bundesrepublik Deutschland (West). In: Wichmann HE, Schlipkötter HW, Fülgraff G, editors. Fortschritte in der Umweltmedizin, 1998.
- [30] Darby S, Hill D, Auvinen A, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. British Medical Journal 2004; 330:223-8.

- [31] Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, et al. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology* 2005; 16:137-45.
- [32] Soda H, Oka M, Tomita H, et al. Length and lead time biases in radiologic screening for lung cancer. *Respiration* 1999; 66:511-7.
- [33] Colgan PA, Gutierrez J. Justification and optimisation in the choice of reference levels for radon in existing Spanish dwellings. *Journal of Radiology and Protection* 1995; 15:289-301.
- [34] Kennedy CA, Gray AM. The cost-effectiveness of radon-induced lung cancer prevention in schools. *International Journal of Environment and Health Research* 2000; 10:181-90.
- [35] Darby S, Whitley E, Silcocks P, et al. Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study. *British Journal of Cancer* 1998; 78:394-408.
- [36] Weissflog D, Matthys H, Hasse J, et al. [Epidemiology and costs of lung cancer in Germany]. *Pneumologie* 2001; 55:333-8.
- [37] Statistisches Bundesamt. *Statistisches Jahrbuch 2006*. Wiesbaden, 2006.
- [38] Ruff LK, Volmer T, Nowak D, et al. The economic impact of smoking in Germany. *European Respiratory Journal* 2000; 16:385-90.
- [39] Statistisches Bundesamt. *Statistisches Jahrbuch 2008*. Wiesbaden: Federal Statistical Office 2008.
- [40] Bradley EJ. Responses to radon remediation advice. *Proc 9th Int Congress International Radiation Protection Association*, 1996:798–800.
- [41] Johnson FR, Luken RA. Radon risk information and voluntary protection: evidence from a natural experiment. *Risk Analysis* 1987; 7:97-107.
- [42] Desvousges HW, Cox JA. Radon focus groups: a summary. Research Triangle Park NC: Research Triangle Centre, 1986.
- [43] Smith VK, Desvousges HW, Fisher A, et al. Communicating Radon Risks effectively: a mid-course evaluation. Environmental Protection Agency 230-07-87-029, 1987.
- [44] Ford ES, Ehemann CR. Radon retesting and mitigation behavior among the U.S. population. *Health Physics* 1997; 72:611-4.
- [45] Kennedy CA. Domestic radon remediation rates and reasons for testing. *Environmental Management and Health* 2001; 12:459-64.
- [46] Lee TR, Macdonald S. Public responses to indoor pollution from radon. *Radiation Protection Dosimetry* 1994; 56:331-7.
- [47] Weinstein ND, Sandman PM, Klotz ML. Public responses to the risk from radon, 1986. Final Report. New Jersey: Rutgers, The State University of New Jersey: Cook College, 1987.
- [48] Wang Y, Ju C, Stark AD, et al. Radon awareness, testing, and remediation survey among New York State residents. *Health Physics* 2000; 78:641-7.

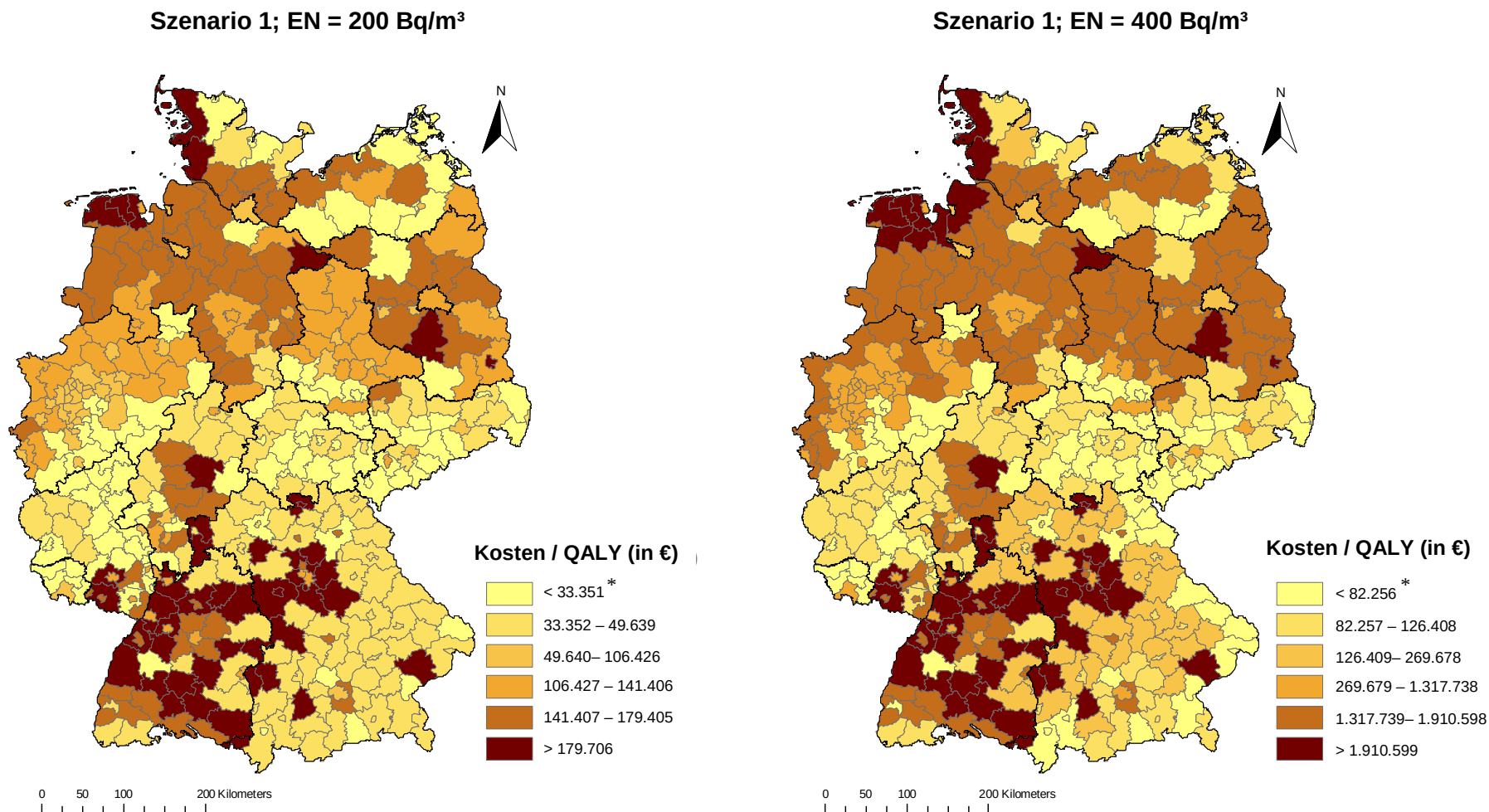
- [49] Riesenfeld EP, Marcy TW, Reinier K, et al. Radon awareness and mitigation in Vermont: a public health survey. *Health Physics* 2007; 92:425-31.
- [50] Ford ES, Ehemann CR, Siegel PZ, et al. Radon Awareness and Testing Behavior: Findings from the Behavioral Risk Factor Surveillance System, 1989-1992. *Health Physics* 1996; 70:363-6.
- [51] Doyle JK, McClelland GH, Schulze WD, et al. Protective responses to household risk: a case study of radon mitigation. *Risk Analysis* 1991; 11:121-34.
- [52] Environmental Protection Agency. Consumer's guide to radon reduction. How to fix your home. EPA 402-K-06-094. 2006.
- [53] Hamel P, Lehmann R, Kube G, et al. Modellhafte Sanierung radonbelasteter Wohnungen in Schneeberg. BfS-ST-10/96: Bundesamt für Strahlenschutz, 1996.
- [54] Thomas J, Tomasek L, Fojtikova I, et al. Cost-effectiveness of countermeasures against radon in the czech republik: preliminary report. *Radiation Protection Dosimetry* 2008; doi:10.1093/rpd/ncn112:1-4.
- [55] Letourneau EG, Krewski D, Zielinski JM, et al. Cost-effectiveness of radon mitigation in Canada. *Radiation Protection Dosimetry* 1992; 45:593-8.
- [56] Roserens G-A, Johnner H-U, Piller G, et al. Radonhandbuch Schweiz. Bern: Bundesamt für Gesundheit Abteilung Strahlenschutz Sektion Radiologische Risiken: Fach- und Informationsstelle Radon, 2000.
- [57] World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva, Switzerland: WHO, 2009.
- [58] APUG. Vermeidung und Verminderung der Radonbelastung von Innenräumen. Berlin: Action Programme Environment and Health, 2005.
- [59] Wichmann HE. Radon in Wohnhäusern: Unterschätzte Krebsgefahr. Fachinformationsdienst Lebenswissenschaften, Umwelt und Gesundheit. Neuherberg: GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, 2007.
- [60] Gray A, Read S, McGale P, et al. Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. *British Medical Journal* 2009; 338:a3110.
- [61] Coskeran T, Denman A, Phillips P, et al. A critical evaluation of the cost-effectiveness of radon protection methods in new homes in a radon affected area of England. *Environment International* 2009; 35:943-51.
- [62] Nord E. Methods for quality adjustment of life years. *Social Sciences in Medicine* 1992; 34:559-69.
- [63] Schöffski O, Schulenburg, J.-M. Graf v. d. (Hrsg.),. Gesundheitsökonomische Evaluationen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2000.
- [64] Trippoli S, Vaiani M, Lucioni C, et al. Quality of life and utility in patients with non-small cell lung cancer. *Pharmacoeconomics* 2001; 19:855-63.
- [65] Brooks RG, Jendteg S, Lindgren B, et al. EuroQol: health related quality of life measurement: results of the Swedish questionnaire exercise. *Health Policy* 1991; 18:37-48.

- [66] Nord E. EuroQol: health-related quality of life measurement: valuations of health states by the general public in Norway. *Health Policy* 1991; 18:25-36.
- [67] König HH, Bernert S, Angermeyer MC, et al. Comparison of population health status in six european countries: results of a representative survey using the EQ-5D questionnaire. *Medical Care* 2009; 47:255-61.
- [68] Clegg A, Scott DA, Sidhu M, et al. Clinical and cost-effectiveness of paclitaxel, docetaxel, gemcitabine and vinorelbine in non-small-cell lung cancer: a systematic review. *Thorax* 2002; 57:20-8.
- [69] König HH, Bernert S, Angermeyer MC. [Health status of the German population: results of a representative survey using the EuroQol questionnaire]. *Gesundheitswesen* 2005; 67:173-82.
- [70] Lubin JH, Boice JD. Lung Cancer Risk From Residential Radon: Meta-analysis of Eight Epidemiologic Studies. *Journal of the National Cancer Institute*, 1997; 89:49-57.
- [71] Kennedy CA, Gray AM, Denman AR, et al. A cost effectiveness analysis of a residential radon remediation programme in the United Kingdom. *British Journal of Cancer* 1999; 81:1243-7.
- [72] Weinstein MC, Siegel JE, Gold MR, et al. Recommendations of the Panel on Cost-effectiveness in Health and Medicine. *Journal of the American Medical Association* 1996; 276:1253-8.
- [73] Russell LB, Gold MR, Siegel JE, et al. The role of cost-effectiveness analysis in health and medicine. Panel on Cost-Effectiveness in Health and Medicine. *Journal of the American Medical Association* 1996; 276:1172-7.
- [74] Drummond MF. *Economic analyses alongside controlled trials*. London: Department of Health, 1995.
- [75] Department of health. *Policy appraisal and health*. London: Department of Health, 1995.
- [76] Siebert H. *Ökonomische Theorie der Umwelt*. Tübingen: Mohr Siebeck 1978.
- [77] Briggs A, Claxton K, Sculpher M. *Decision modelling for health economic evaluation*. New York: Oxford University Press, 2006.
- [78] Briggs A. Handling uncertainty in cost-effectiveness models. *Pharmacoeconomics* 2000; 15:479-500.
- [79] Briggs A, Fenn P. Confidence intervals or surfaces? Uncertainty on the costeffectiveness plane. *Health Economics* 1998; 7:723-40.
- [80] Jenks GF, Caspall FC. Error on Choroplethic Maps. Definition, Measurement, Reduction. *Annals of the Association of American Geographers* 1971; 61:217-44.
- [81] Dally H, Edler L, Jäger B, et al. The CYP3A4*1B allele increases risk for small cell lung cancer: effect of gender and smoking dose. *Pharmacogenetics* 2003; 23:607-18.
- [82] Pötschke-Langer M, Mons U, Schaller K, et al. *Tabakatlas Deutschland* 2009. Heidelberg: Steinkopff Verlag, 2009.

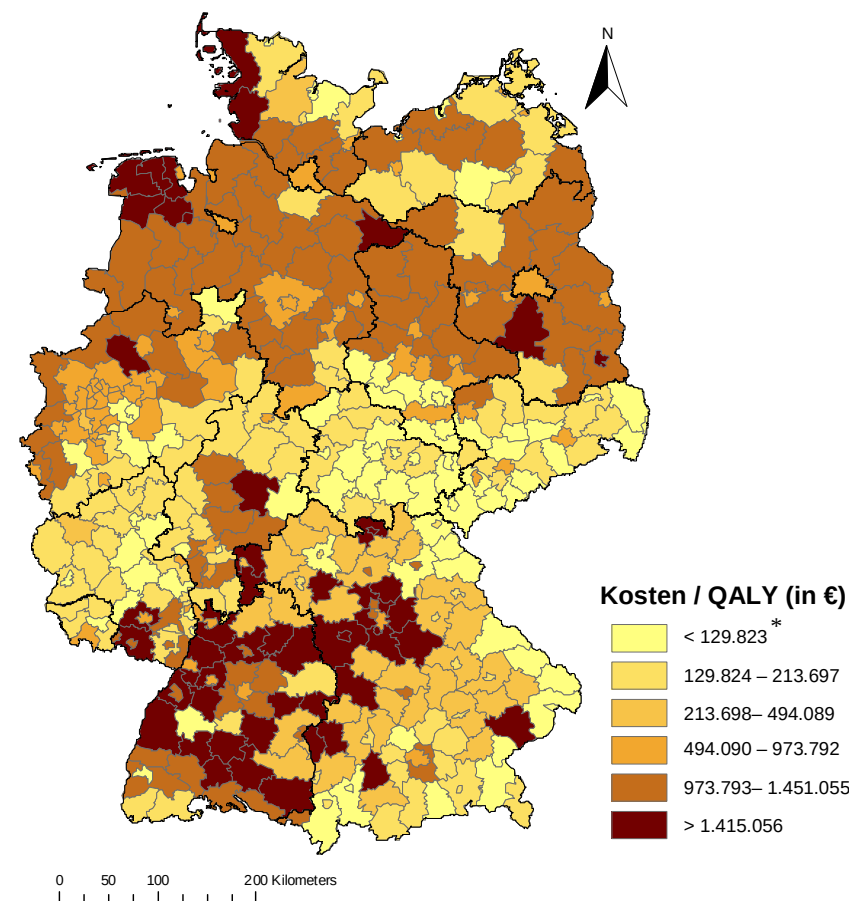
- [83] Pearson S, Rawlins M. Quality, innovation, and value for money: NICE and the British National Health Service. *Journal of the American Medical Association* 2005; 294:2618-22.
- [84] Owens DK. Interpretation of Cost-Effectiveness Analyses. *Journal of General Internal Medicine* 1998; 13:716-7.
- [85] World Health Organisation. Commission on Macroeconomics and Health. *Macroeconomics and Health: Investing in Health for Economic Development*. Genf: WHO, 2001.
- [86] Azimi NA, Welch H. The effectiveness of cost-effectiveness analysis in containing costs. *Journal of General Internal Medicine* 1998; 13:664-9.
- [87] Viscusi WK. The Value of Life in Legal Contexts: Survey and Critique. *American Law and Economics Review* 2000; 2:195-222.
- [88] Organization for Economic Co-operation and Development. *OECD Health Data 2009*. Paris: OECD/Institute for Research and Information in Health Economics 2009.
- [89] Statistisches Bundesamt. *Statistisches Jahrbuch 2009*. Wiesbaden, 2009.
- [90] Weitowitz HJ. The Third Wave of Asbestos Disease: Exposure to Asbestos in Place-Public Health Control. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1991; 643:407-11.
- [91] Drechsel-Schlund C, Butz M, Haupt B, et al. Asbestverursachte Berufskrankheiten in Deutschland – Entstehung und Prognose. Sankt Augustin, 2003.
- [92] Doyle JK, McClelland GH, Schulze WD, et al. Economics and psychology policy research for Environmental Management. An Evaluation of Strategies for Promoting Effective Radon Mitigation. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1990.
- [93] Darnton AJ, McElvenny DM, Hodgson JT. Estimating the Number of Asbestos-related Lung Cancer Deaths in Great Britain from 1980 to 2000. *The Annals of Occupational Hygiene* 2006; 50:29 - 38.
- [94] Hodgson JT, Darnton A. The Quantitative Risks of Mesothelioma and Lung Cancer in Relation to Asbestos Exposure. *The Annals of Occupational Hygiene* 2000; 44:565-601.
- [95] Guhr A, Leißring B. Gesundheitsrisiko infolge natürlicher Radioaktivität in Wohn- und Aufenthaltsräumen. *Umwelt-Medizin-Gesellschaft* 2005; 18:126-9.
- [96] Ettenhuber E, Kreuzer M, Kirchner G, et al. Principles for the control of exposures to radon in dwellings-conception for a national radon programme in Germany. *Proceedings of the 7th International Symposium of the Society for Radiological Protection*. Cardiff, 2005:420-5.
- [97] Groves-Kirkby CJ, Denman AR, Phillips PS, et al. Domestic radon remediation of U.K. dwellings by subslab depressurisation: evidence for a baseline contribution from constructional materials. *Environment International* 2008; 34:428-36.

ANHANG

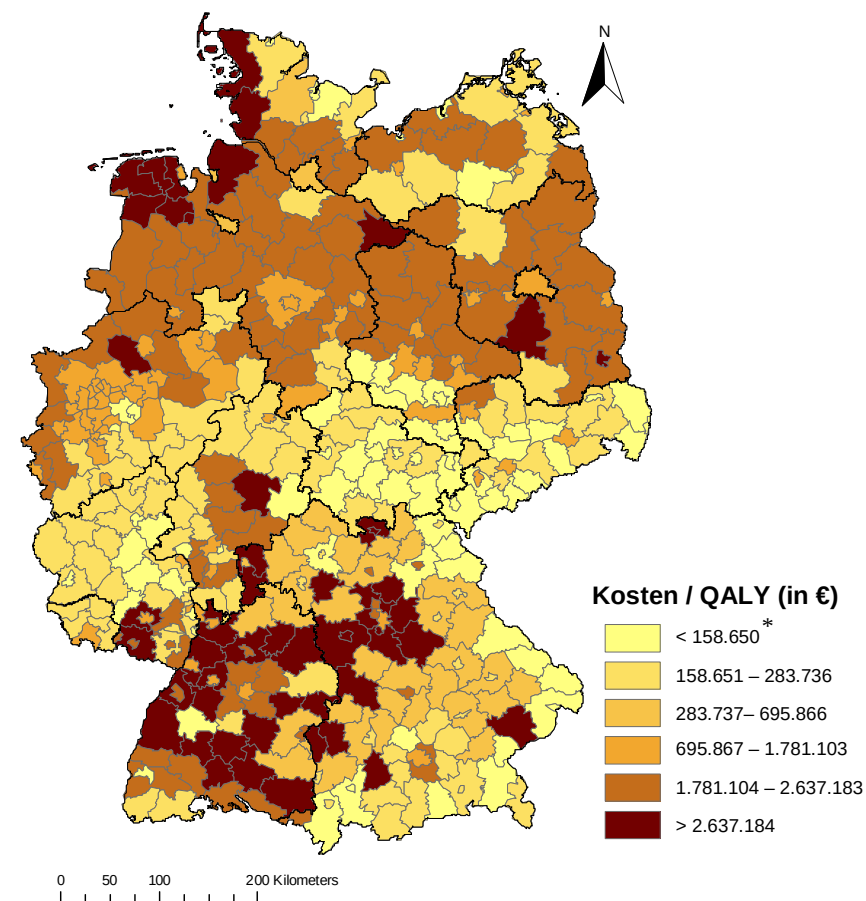
Abbildung 27: Regionale Verteilungen der Kosteneffektivität der Radonsanierung auf Ebene der deutschen Landkreise (Beste Schätzwerte für S1–3 und alle betrachteten Eingriffsniveaus)



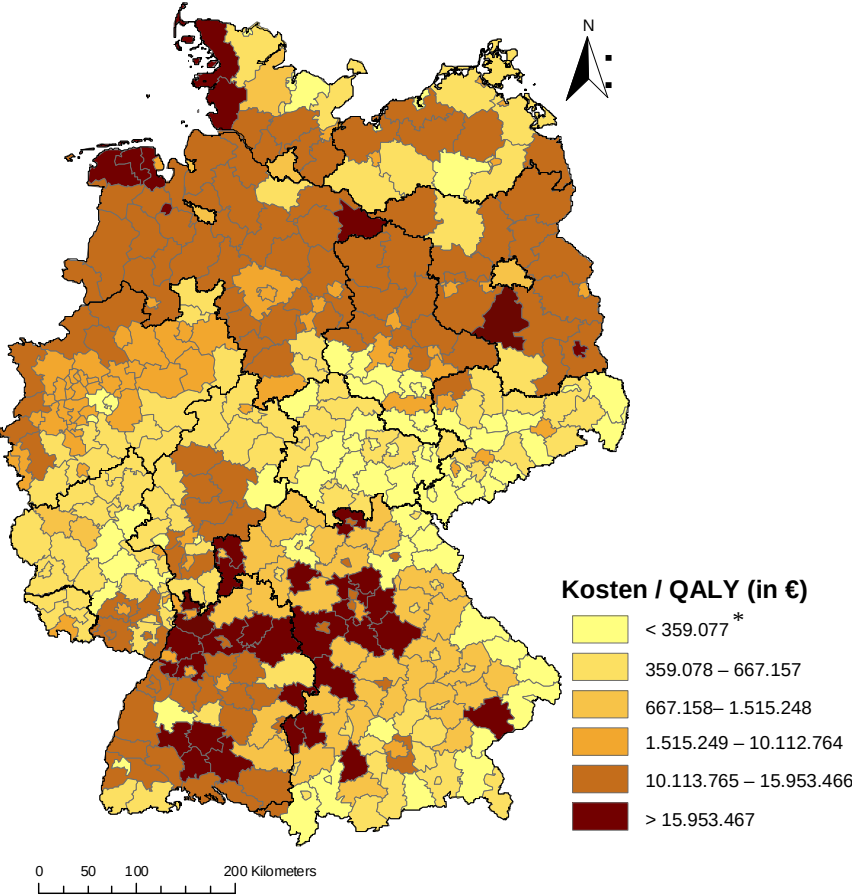
Szenario 2; EN = 100 Bq/m³



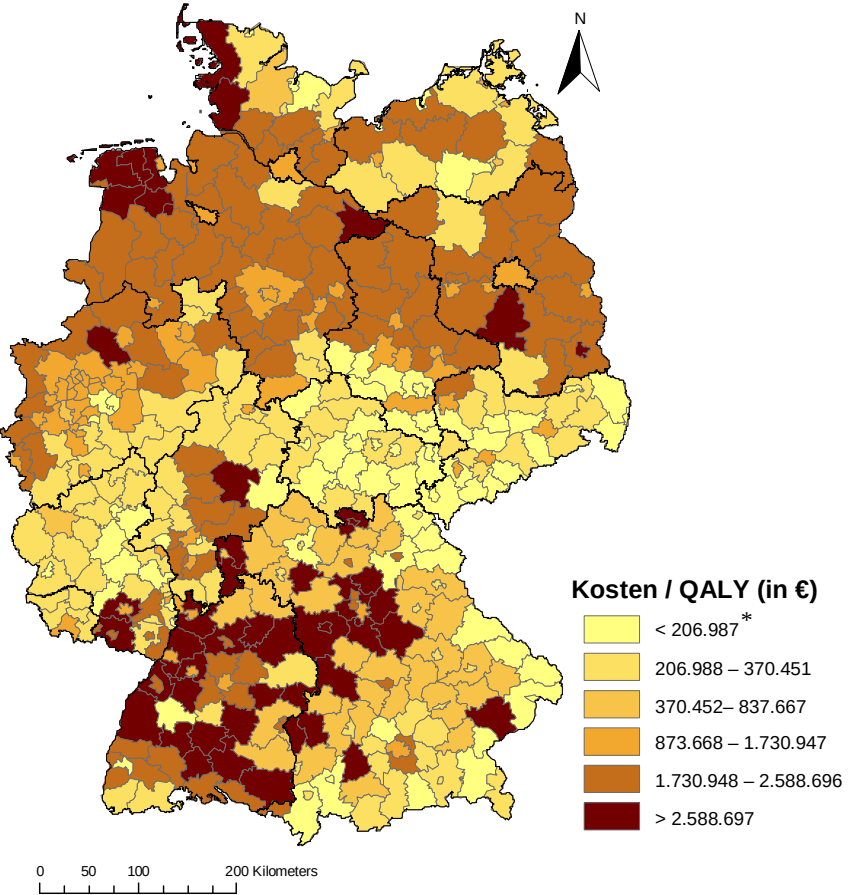
Szenario 2; EN = 200 Bq/m³



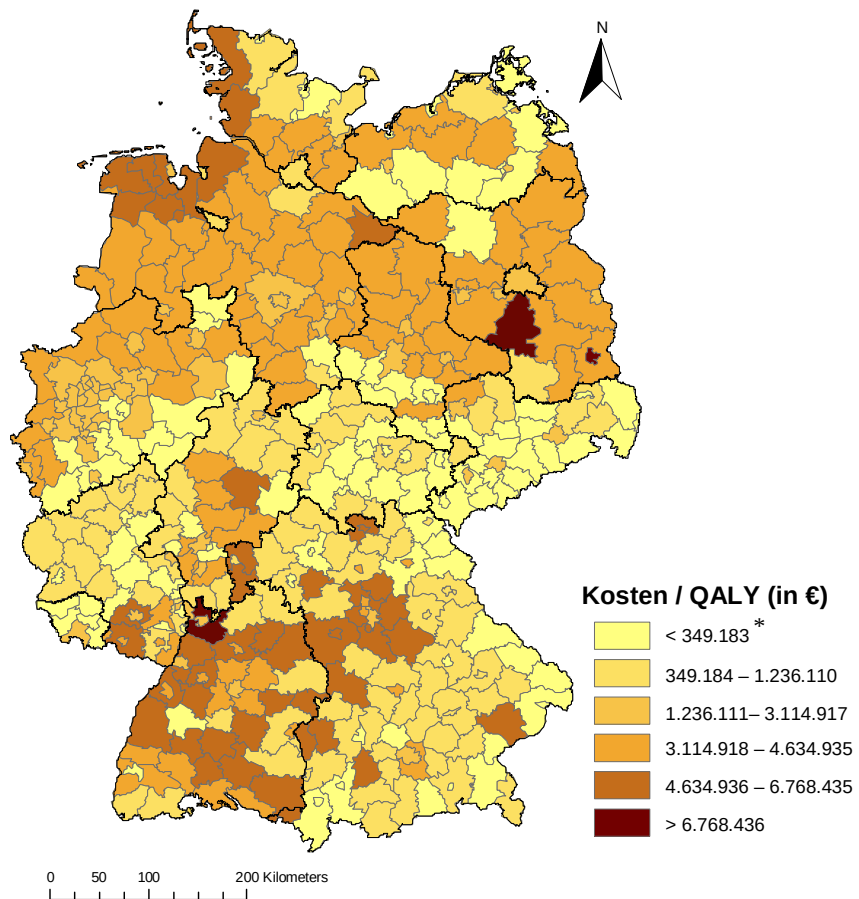
Szenario 2; EN = 400 Bq/m³



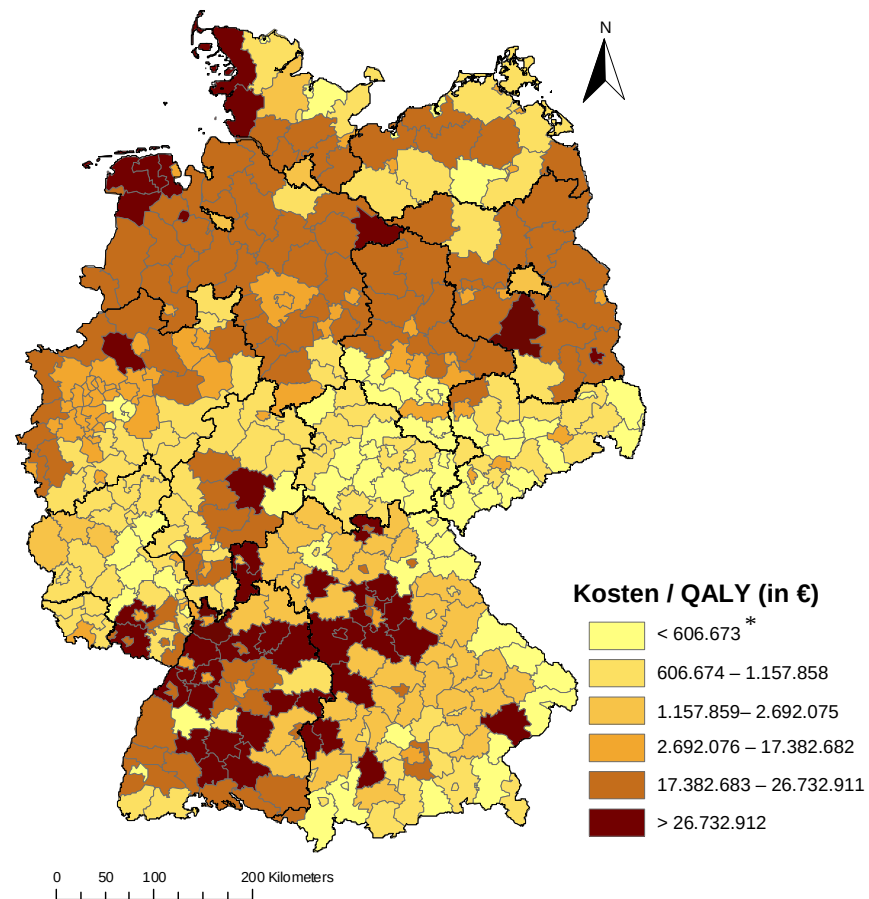
Szenario 3; EN = 100 Bq/m³



Szenario 3; EN = 200 Bq/m³



Szenario 3; EN = 400 Bq/m³



* Intervallgrenzen wurden aufgrund der großen Ergebnisvariabilität für jedes Szenario und jedes Eingriffsniveau separat definiert, basierend auf dem Jenks-Caspell Algorithmus (Natural Breaks)

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz