

**Freie und Hansestadt Hamburg,
Behörde für Umwelt und Energie
- Bodenschutz / Altlasten -**

**Gefährdungspfad
Boden / Grundwasser – Bodenluft – Innenraumluff
im Baurechtsverfahren**

Literaturrecherche

Datum: 13.07.2017

**Hydrogeologisches Büro Christian A. Gillbricht
Kieler Straße 421 - 22525 Hamburg
Tel.: 040 / 54 76 82 76
Fax: 040 / 54 76 82 84**

Inhalt	Seite
1. Veranlassung	6
2. Durchführung	7
3. Ergebnisse	8
3.1 Allgemeine Angaben zur Literaturlage	8
3.2 Relevante Schadstoffe und Bewertungsmaßstäbe	9
3.3 Physikalische Prozesse	13
3.3.1 Bildung kontaminierter Bodenluft	13
3.3.2 Schadstofftransport in der Bodenluft	18
3.3.3 Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude über die Außenluft	22
3.3.4 Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch Leitungen	23
3.3.5 Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch Fugen, Risse oder Leitungsdurchbrüche	25
3.3.6 Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch massive Bauteile	27
3.3.7 Sonderfall: Eindringen von Grundwasser in Gebäude durch massive Bauteile	29
3.3.8 Luftströmungen in Gebäuden	33
3.4 Modelle	34
3.4.1 Strömungsmodelle	34
3.4.2 Diffusionsmodelle	35
3.5 Transferfaktoren Grundwasser – Bodenluft – Innenraumluff	36
3.6 Weitere Schätzgrößen	39
3.7 Probenahme und Messtechnik	41
4. Bewertung	42
4.1 Bewertungsmodell	42
4.2 Prüfwerte für Bodenluft und Grundwasser	44
4.3 Bauliche Sondermaßnahmen	45
5. Empfehlungen für eine Arbeitshilfe	46
6. Zusammenfassung	47
7. Literatur	48

Anlagen

Anhänge

Anlagen

Anlage 1: Zusammenstellung von Vergleichswerten

Anhänge (nur digital)

Anhang 1: Zusammenstellungen der erfassten Literatur

Anhang 1.1: Gesichtete Literatur

Anhang 1.2: Nicht eingesehene Literatur

Abkürzungen

ACS:	American Chemical Society
BGV:	Behörde für Gesundheit und Verbraucherschutz
BTEX:	einkernige aromatische Kohlenwasserstoffe
BUE:	Behörde für Umwelt und Energie
EPA:	U.S. Environmental Protection Agency
FHH:	Freie und Hansestadt Hamburg
GVK:	Gemeinsamer Verbundkatalog
IRK:	Kommission Innenraumlufthygiene
JE-Modell:	analytisches Rechenmodell nach JOHNSON & ETINGER (1991)
LABO:	Länderarbeitsgemeinschaft Boden
LHKW:	leicht flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
LMKW:	leicht flüchtige Mineralölkohlenwasserstoffe
MKW:	Mineralölkohlenwasserstoffe
MTBE:	Methyl-tert-Butylether
RW I:	Richtwert I
RW II:	Richtwert II
SHW:	Sondierung mit horizontierter Wasserprobenahme (Direct-Push-Sondierung)
TR:	Trockensubstanz

Formelzeichen

C_{Bix} :	Konzentration in der Bodenluft am Ort x [mg/m^3]
C_G :	Konzentration in der Gasphase [mg/m^3] = [$\mu\text{g}/\text{l}$]
C_{Gmax} :	maximal zulässige Konzentration des Schadstoffs in der Gasphase [mg/m^3]
$C_{H_2O_{Lsat}}$:	Sättigungskonzentration des Wasserdampfs [g/m^3]
C_{IL} :	Konzentration des Schadstoffs in der Innenraumluft [mg/m^3]
C_{ILmax} :	maximal zulässige Konzentration des Schadstoffs in der Innenraumluft [mg/m^3]
C_P :	Konzentration in der organischen Phase [kg/kg]
C_S :	Konzentration an der Festphase [mg/kg]
C_W :	Konzentration in der Wasserphase [mg/m^3] = [$\mu\text{g}/\text{l}$]
C_{Boden} :	Konzentration im Boden (Feststoff und Porenwasser) [$\text{mg}/\text{kg TR}$]
C_{Wmax} :	maximal zulässige Konzentration des Schadstoffs im Wasser [mg/m^3]
D_{0G} :	Diffusionskoeffizient in Luft [m^2/s]
D_{DG} :	Diffusionskoeffizient in der Bodenluft bzw. im Beton [m^2/s]
D_{DW} :	Diffusionskoeffizient im wassergesättigten Beton [m^2/s]
F :	Durchtrittsfläche [m^2]
g :	Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s^2]
h :	Raumhöhe [m]
H :	dimensionslose Henry-Konstante [-]
K_G :	Durchlässigkeitsbeiwert für Gas [m/s]
K :	intrinsische Permeabilität [m^2]
K_d :	Verteilungskoeffizient Boden / Wasser [l/kg]
L :	Diffusionsstrecke [m]
\dot{M} :	Massenstrom [mg/s]
\bar{m} :	durchschnittliche molare Masse der organischen Phase [g/mol]
m_0 :	molare Masse der betrachteten Substanz [g/mol]
p_0 :	Dampfdruck der betrachteten Substanz bei Umgebungstemperatur [Pa]
p_G :	Partialdruck in der Gasphase [Pa]
R :	allgemeine Gaskonstante = 8,31446 [$\text{J}/(\text{K} * \text{mol})$] = [$\text{Pa} * \text{m}^3/(\text{K} * \text{mol})$]
T :	Temperatur [K]
TF_{Gw} :	Transferfaktor von der Bodenluft unmittelbar oberhalb des Grundwasserspiegels bzw. im Bereich des kontaminierten Bodens zur Innenraumluft
TF_{BI} :	Transferfaktor von der Bodenluft zur Innenraumluft
TF_{Sp} :	Transferfaktor von der Bodenluft unmittelbar unterhalb der Sohlplatte zur Innenraumluft
v_G :	Fließgeschwindigkeit, Filtergeschwindigkeit des Gases [m/s]
X :	Molenbruch, molarer Anteil der betrachteten Substanz an der Phase [-]
ΔC_G :	Konzentrationsunterschied [mg/m^3]
Δp :	Druckdifferenz [Pa]
Δx :	Fließstrecke [m]
λ :	Luftwechselzahl [$1/\text{s}$]
μ_G :	dynamische Viskosität [$\text{Pa} * \text{s}$]
ρ_G :	Dichte des Gases [kg/m^3]
ρ_W :	Dichte des Wassers [g/m^3]

1. Veranlassung

Im Stadtgebiet der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH) sind zahlreiche Verunreinigungen des Bodens, des Grundwassers und der Bodenluft durch leicht flüchtige Schadstoffe vorhanden. Hierzu zählen insbesondere leicht flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW), einkernige aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) und leicht flüchtige Mineralölkohlenwasserstoffe (LMKW).

Diese Stoffe können in Gebäude übertreten und dort eventuell gesundheitlich bedenkliche Konzentrationen erreichen. Im Rahmen der Bearbeitung von Bauanträgen ist daher durch die FHH Behörde für Umwelt und Energie (BUE) zu prüfen, ob an einem kontaminierten Standort ein solcher Übertritt und daraus eine Gesundheitsgefährdung zu erwarten ist. Hieraus sind in Abstimmung mit den übrigen beteiligten Fachbehörden Vorgaben für Bauvorhaben abzuleiten, insbesondere zu Sicherungs- und Überwachungsmaßnahmen.

Bislang wurden Gefährdungen über die Innenraumluft im Einzelfall geprüft. Es soll eine Arbeitshilfe entwickelt werden, die eine Abschätzung der Gefährdung ermöglicht und so den Mitarbeitern der BUE/U2 als Entscheidungshilfe bei der Bearbeitung von Bauanträgen dient.

Die FHH Behörde für Umwelt und Energie hat mich mit Ingenieurvertrag Nr. 01/17/U2206 vom 03.04.2017 als Vorarbeit für eine Arbeitshilfe mit der Durchführung einer Literaturrecherche zur Ableitung von Kriterien für die Bearbeitung von Bauanträgen im Bereich von Boden- und Grundwasserkontaminationen mit leicht flüchtigen Schadstoffen bezogen auf den Standort Hamburg beauftragt. Hiermit werden die Ergebnisse der Recherche dargestellt.

2. Durchführung

Es wurde eine Literaturrecherche in folgenden Quellen durchgeführt:

- hauseigene Literaturdatenbank;
- allgemeine Internetsuche (Google.com);
- Datenbanken der wichtigsten wissenschaftlichen Verlage (Springer, Taylor & Francis, Wiley, Elsevier, ACS);
- Gemeinsamer Verbundkatalog (GVK) der deutschen Bibliotheken.

Diese Recherche erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie bietet aber mit insgesamt 331 erfassten Veröffentlichungen (Anh. 1) einen ausreichenden Überblick über den Wissensstand. Von den erfassten Veröffentlichungen wurden 271 beschafft und gesichtet. Die Beschaffung beschränkte sich auf Werke, die in meiner Bibliothek oder in der Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky verfügbar waren. Einzelne neuere Veröffentlichungen von anderen Standorten wurden vom AG über Fernleihe beschafft.

Die Auswertung der Literatur geht von jüngeren und zusammenfassenden Darstellungen aus. Ältere Literatur (vor 2000) wurde nur hinzugezogen, soweit diese grundlegende Bedeutung hat oder spezielle Aspekte abdeckt, die in neuerer Zeit nicht mehr (ausführlich) diskutiert worden sind.

3. Ergebnisse

3.1 Allgemeine Angaben zur Literaturlage

Das Eindringen von kontaminierter Bodenluft in Gebäude und die damit zusammenhängende Gefährdung der Gebäudenutzer, insbesondere bei Wohngebäuden, ist Gegenstand einer Vielzahl von Veröffentlichungen (Anh. 1). Diese stammen zum überwiegenden Teil aus den USA und Großbritannien, untergeordnet aus anderen europäischen und außereuropäischen Ländern. Aus Deutschland ist nur eine umfangreichere Studie bekannt, die dafür aber ein breites Spektrum an Gefährdungsszenarien behandelt (SEEGER, 1999).

In neuester Zeit sind zwei grundlegende Arbeitshilfen der U.S. Environmental Protection Agency (EPA) erschienen (U.S. EPA, 2015, OSWER, 2015), die Maßstäbe für die Bearbeitung von Bodenluftkontaminationen über die USA hinaus gesetzt haben. Diese haben öffentliches Interesse sowohl bei Bürgerinitiativen (SIEGEL, 2015a und 2015b) als auch in der juristischen Fachliteratur (SEITZ et al., 2016) gefunden.

Die vorliegenden Veröffentlichungen behandeln durchweg die Betrachtung vorhandener Gebäude im Sinne einer Gefährdungsabschätzung. Sie gehen daher vom Gebäudebestand aus, dessen bauliche und betriebliche Eigenschaften durch historische, kulturelle und klimatische Gegebenheiten geprägt sind. In Großbritannien werden beispielsweise Wohngebäude überwiegend ohne Keller errichtet (WILSON, 2008).

Im Rahmen eines Baurechtsverfahrens bei bekanntem Vorliegen einer Boden- bzw. Grundwasserverunreinigung mit leicht flüchtigen Schadstoffen kann auf die Art der Bauausführung eingewirkt werden. Es werden daher im Folgenden nicht alle in der Literatur behandelten Fragestellungen ausführlich referiert, sondern schwerpunktmäßig diejenigen, die im Rahmen einer angepassten Bauweise von Belang sind. Andere Aspekte werden nur cursorisch abgehandelt, um auch einen Einstieg in die Behandlung vorhandener Bausubstanz zu ermöglichen.

3.2 Relevante Schadstoffe und Bewertungsmaßstäbe

In Boden und Grundwasser können zahlreiche leicht flüchtige Schadstoffe als Folge von Bodenverunreinigungen auftreten. Hiervon treten aber nur einige so häufig auf, dass sie regelmäßig für die Standortbewertung relevant sind.

In diesem Bericht werden ausschließlich folgende Schadstoffgruppen behandelt:

- leicht flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW)
- einkernige aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX)
- nicht aromatische leicht flüchtige Mineralölkohlenwasserstoffe (LMKW)

Für diese Stoffgruppen sind die Bewertungsmaßstäbe für die Innenraumlufthygienen von Wohngebäuden gemäß Tab. 1 zu nennen. Die Veröffentlichungen des Ausschusses für Innenraumrichtwerte am Umweltbundesamt (UBA) (früher: Kommission Innenraumlufthygiene, IRK) weisen jeweils einen Richtwert I (RW I) als Vorsorgewert aus. Bei Einhaltung dieses Wertes ist auch bei lebenslanger Exposition kein relevantes Gesundheitsrisiko gegeben. Der Richtwert II (RW II) stellt einen Maßnahmenwert dar. Bei seiner Überschreitung besteht „unverzüglich Handlungsbedarf [...] Der Handlungsbedarf ist als unverzüglicher Prüfbedarf zu verstehen, z. B. im Hinblick auf Sanierungsentscheidungen zur Verringerung der Exposition. [...] Aus Vorsorgegründen besteht auch im Konzentrationsbereich zwischen RW I und RW II Handlungsbedarf.“ (FHH BStVG, 2006)

Für krebserregende Substanzen wird entsprechend der Vorgehensweise der UBA IRK und internationalem Usus ein Risikoniveau von 1 : 1.000.000 bei lebenslanger Exposition angesetzt. Hiervon weichen die deutschen Regelungen zur Altlastenbewertung (Bekanntmachung im Bundesanzeiger vom 18.06.1999) mit einem Risikoniveau von 1 : 100.000 ab.

Eine erweiterte Stoffliste findet sich in Anl. 1. Dort sind auch zum Vergleich weitere Regelwerke von Bundesstaaten der USA aufgeführt. Die zum Teil erheblich divergierenden Vergleichswerte zeigen die Unsicherheit in der toxikologischen Bewertung mancher Stoffe. Auch die Richtwerte der U.S. EPA wurden in den letzten Jahren teilweise erheblich verändert, in einigen Fällen auch aufgehoben. Nicht zuletzt deshalb ist bei einer Bewertung im Hinblick auf eine Bebauung, d. h. eine langfristige Nutzung, eine konservative bis sehr konservative Vorgehensweise angezeigt.

Zum Vergleich können auch Hintergrundwerte aus deutschen Haushalten (UBA, 2008) herangezogen werden (Tab. 2). In der einschlägigen Literatur werden Einzelfälle beschrieben, in denen in Wohn- und Gewerbegebäuden deutlich erhöhte Hintergrundgehalte aufgrund der Nutzung oder von Gebrauchsgegenständen aufgetreten sind, sowie Methoden beschrieben, um diese Effekte bei der Untersuchung zu erkennen und zu berücksichtigen (ALAVES et al., 2013; DOUCETTE et al., 2010; KURTZ et al., 2010; BECKLEY et al., 2013; MCHUGH et al., 2006).

Nicht behandelt werden hier andere, insbesondere gewerbliche oder industrielle, Nutzungen. Für diese sind höhere zulässige Konzentrationen anzusetzen, da die Gebäude nur dem zeitweiligen Aufenthalt dienen.

Medium:	Regelwerk / Quelle						
	Innenraumluf				Umgebungsluft		
	UBA IRK		2. BImSchVO	WHO	USEPA	WHO	39. BImSchVO
Status:	RW I (Vorsorge- wert)	RW II (Maßnahmen- wert)	Maßnahmen- wert	Richtwert	Prüfwert, Wohngebiete	Richtwert	Immissions- grenzwert
Risiko (kanzerogen):							
Stand:	19.03.2017		2001	$1 \cdot 10^{-6}$ 2010	$1 \cdot 10^{-6}$ 05/2016	$1 \cdot 10^{-6}$ 2000	2010
leicht flüchtige nicht aromatische Mineralölkohlenwasserstoffe (LMKW)							
n-Pentan					1,0		
n-Hexan					0,73		
n-Nonan					0,021		
Cyclohexan					6,3		
C9 - C14-Alkane / Isoalkane (aromatenarm)	0,2	2,0					
Mineralölkohlenwasserstoffe (aromatenarm)					0,031		
einkernige Aromaten (BTEX)							
Benzol				0,00017	0,00036	0,00017	0,005
Toluol	0,3	3,0			5,2	0,26	
Ethylbenzol	0,2	2,0			0,0011		
o-Xylol					0,1		
m-Xylol					0,1		
p-Xylol					0,1		
Summe Xylole	0,1	0,8			0,1		
Styrol	0,03	0,3			1,0	0,26 ³⁾	
1,2,3-Trimethylbenzol					0,0052		
1,2,4-Trimethylbenzol					0,0073		
Propylbenzol					1,0		
Cumol					0,42		
Alkylbenzole, C9-C15	0,1	1,0					

1) vorläufiger Wert FHH BGV, 11/2014

2) ohne Bewertung der Kanzerogenität

3) Wert liegt über Geruchsschwelle.

Quellen:

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/ausschuss-fuer-innenraumrichtwerte-vormals-ad-hoc#textpart-1>

https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_2_1990/BJNR026940990.html

http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/index.html

WHO (2010)

WHO (2000)

<https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables-may-2016>;

Tab. 1: Relevante Bewertungsmaßstäbe für häufig bei Altlasten und Bodenverunreinigungen auftretende leicht flüchtige Schadstoffe, alle Angaben in [mg/m³]

Medium:	Regelwerk / Quelle						
	Innenraumluf				Umgebungsluft		
Status:	UBA IRK		2. BImSchVO	WHO	USEPA	WHO	39. BImSchVO
Risiko (kanzerogen):	RW I (Vorsorge- wert)	RW II (Maßnahmen- wert)	Maßnahmen- wert	Richtwert	Prüfwert, Wohngebiete	Richtwert	Immissions- grenzwert
Stand:	19.03.2017		2001	1 * 10 ⁻⁶ 2010	1 * 10 ⁻⁶ 05/2016	1 * 10 ⁻⁶ 2000	2010
leicht flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW)							
Dichlormethan	0,2	2,0			0,1	0,45	
Trichlormethan (Chloroform)					0,00012		
Tetrachlormethan					0,00047		
Dichlordifluormethan (Freon 12)					0,1		
Trichlorfluormethan (Freon 11)					0,73		
1,1-Dichlorethan					0,0018		
1,2-Dichlorethan					0,00011	0,7 ²⁾	
1,1,1-Trichlorethan					5,2		
1,1,2-Trichlorethan					0,00018		
1,2-Dibromethan					0,000047		
Tetrafluorethan, 1,1,1,2-					83		
1,1,2-Trichlor-1,2,2- trifluorethan					31		
Chlorethen (Vinylchlorid)					0,00017	0,001	
1,1-Dichlorethen					0,21		
cis-1,2-Dichlorethen	0,04 ¹⁾						
trans-1,2-Dichlorethen					0,063		
Trichlorethen	0,02			0,0023	0,00048	0,0023	
Tetrachlorethen			0,1	0,25	0,011	0,25 ²⁾	

Tab. 1 (Forts.): Relevante Bewertungsmaßstäbe für häufig bei Altlasten und Bodenverunreinigungen auftretende leicht flüchtige Schadstoffe, alle Angaben in [mg/m³]

Stand:	UBA 90%-Perzentil 2003 - 2006
leicht flüchtige nicht aromatische Mineralölkohlenwasserstoffe (LMKW)	
n-Heptan	0,0127
n-Octan	0,0045
n-Nonan	0,0052
n-Decan	0,0082
n-Undecan	0,0098
n-Dodecan	0,0048
n-Tridecan	0,0027
n-Tetradecan	0,0041
n-Pentadecan	0,0027
n-Hexadecan	0,0019
n-Heptadecan	0,0014
n-Octadecan	< 0,001
Cyclohexan	0,0156
Methylcyclohexan	0,0104
C9 - C14-Alkane / Isoalkane	0,0348
Summe Alkane	0,0972
einkernige Aromaten (BTEX)	
Benzol	0,0057
Toluol	0,0472
Ethylbenzol	0,0046
o-Xylol	0,0041
Summe Xylole	0,015
Styrol	0,0028
1,2,3-Trimethylbenzol	0,0019
1,2,4-Trimethylbenzol	0,0058
1,3,5-Trimethylbenzol	0,0017
n-Propylbenzol	0,0017
Cumol (Isopropylbenzol)	< 0,001
2-Ethyltoluol	0,0016
3-Ethyltoluol	0,0033
4-Ethyltoluol	0,0014
Alkylbenzole, C9-C15	0,0174
leicht flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW)	
1,1,1-Trichlorethan	< 0,001
Trichlorethen	< 0,001
Tetrachlorethen	< 0,001

90%-Perzentil: 90% aller untersuchten Proben hatten maximal diese Konzentration.

rot: Überschreitung eines Richtwerts nach Tab. 1

Tab. 2: Hintergrundgehalte für häufig bei Altlasten und Bodenverunreinigungen auftretende leicht flüchtige Schadstoffe in der Innenraumluff deutscher Haushalte, alle Angaben in [mg/m³] (UBA, 2008)

3.3 Physikalische Prozesse

3.3.1 Bildung kontaminierter Bodenluft

Die Schadstoffkonzentration in der Bodenluft steht näherungsweise im Gleichgewicht mit

- der im Wasser (Grundwasser, Porenwasser) gelösten Schadstoffkonzentration
- der an der festen Bodensubstanz sorbierten Schadstoffkonzentration
- ggf. einer organischen Phase

Die Konzentration in der Gasphase lässt sich ohne Vorhandensein einer organischen Phase aus der Konzentration **im Grundwasser** abschätzen (z. B. SEEGER, 1999):

$$c_G = H * c_w \quad (1)$$

mit

c_G : Konzentration in der Gasphase [mg/m³]

c_w : Konzentration in der Wasserphase [mg/m³]

H: dimensionslose Henry-Konstante [-] (Tab. 3)

Beispiel

Eine Grundwasserverunreinigung mit Tetrachlorethen besitzt im Bereich des freien Wasserspiegels eine Konzentration von 5 mg/l. Die Konzentration in der Bodenluft ergibt sich damit zu

$$c_G = H * c_w = 0,298 * 5.000 \text{ mg} / \text{m}^3 = 1.490 \text{ mg} / \text{m}^3$$

Die Abschätzung der Gleichgewichtskonzentration aus der Konzentration im Grundwasser nach Gleichung (1) ist konservativ, da sie von einer unbegrenzten Verfügbarkeit der Schadstoffe am Wasserspiegel ausgeht. Tatsächlich ist diese aber durch die geringe Diffusion in der Wasserphase begrenzt (z. B. MURPHY & CHAN, 2011). Felddaten weisen auf deutlich niedrigere (mindestens 1 Zehnerpotenz) effektive Henry-Konstanten hin (FITZPATRICK & FITZGERALD, 2002).

Bei Verunreinigungen **in der ungesättigten Zone** ohne Vorhandensein einer organischen Phase lässt sich die Konzentration in der Gasphase aus der Konzentration im Feststoff abschätzen (z. B. SEEGER, 1999):

$$c_G = \frac{c_s * H}{K_d} \quad (2)$$

mit

c_s : Konzentration an der Festphase [mg/kg]

K_d : Verteilungskoeffizient Boden / Wasser [l/kg]

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Konzentration an der Festphase c_s analytisch nicht unmittelbar gemessen werden kann, da bei der Extraktion einer Bodenprobe sowohl die sorbierten als auch die im Porenwasser gelösten Stoffanteile erfasst werden (DAU & BOCHERT, 2015). Da der Verteilungskoeffizient im Regelfall nicht oder nur in der Größenordnung bekannt ist, ist es für Böden mit geringer Sorptionskapazität üblich, die gemessenen Schadstoffkonzentrationen auf das Porenwasser zu beziehen.

Bei den daraus abgeleiteten Konzentrationen in der Bodenluft handelt es sich um Worst-Case-Schätzungen.

Beispiel

Eine Bodenverunreinigung mit Tetrachlorethen besitzt am Feststoff eine sorbierte Belastung von 5 mg/kg. Der Verteilungskoeffizient ist nach ALTEX-1D bei einem Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff von 0,2 % abzuschätzen mit $K_d = 0,214$. Die Konzentration in der Bodenluft ergibt sich damit zu

$$c_G = \frac{c_s * H}{K_d} = \frac{5 \text{ mg/kg} * 0,298}{0,214 \text{ l/kg}} = 6,96 \text{ mg/l} = 6.960 \text{ mg/m}^3$$

Das Porenwasser hat eine Konzentration von

$$c_W = \frac{c_G}{H} = \frac{c_s}{K_d} = \frac{6.960 \text{ mg/m}^3}{0,298} = \frac{5 \text{ mg/kg}}{0,214 \text{ l/kg}} = 23,4 \text{ mg/l}$$

Bei einem Wassergehalt des Bodens von 15 Gew.% ergäbe die chemische Analyse

$$c_{\text{Boden}} = 5 \text{ mg/kg} + \frac{0,15}{(1-0,15)} * 23,4 \text{ mg/kg} = 9,1 \text{ mg/kg TR}$$

Bei Vorliegen einer **organischen Phase**, z. B. einer leichten Schwimmphase auf dem freien Grundwasserspiegel, ergibt sich die Konzentration in der Gasphase für einzelne Komponenten nach dem Raoult'schen Gesetz:

$$p_G = X * p_0 \quad (3)$$

mit

p_G : Partialdruck in der Gasphase [Pa]

p_0 : Dampfdruck der betrachteten Substanz bei Umgebungstemperatur [Pa]

X : Molenbruch, molarer Anteil der betrachteten Substanz an der Phase [-]

$$X = c_p * \frac{\bar{m}}{m_0} \quad (4)$$

c_p : Konzentration in der organischen Phase [kg/kg]

m_0 : molare Masse der betrachteten Substanz [g/mol]

\bar{m} : durchschnittliche molare Masse der organischen Phase [g/mol]

Für viele Anwendungsfälle mit Destillaten eines hinreichend engen Siedebereichs ist es eine zulässige Approximation, für den Molenbruch den Gewichtsanteil zu setzen:

$$X = c_p * \frac{\bar{m}}{m_0} = c_p * 1 \quad (4a)$$

Die Konzentration in der Gasphase ergibt sich aus dem Partialdruck zu (EVANS et al., 2002):

$$c_G = \frac{m_0 * p_G}{R * T} = \frac{m_0 * X * p_0}{R * T} \quad (5)$$

mit

R : allgemeine Gaskonstante = 8,31446 [J/(K * mol)] = [Pa * m³/(K * mol)]

T: Temperatur [K]

Beispiel

Ein Vergaserkraftstoff enthält 1 Gew.% Benzol. Es wird für eine Abschätzung nach Gleichung (5) die Approximation nach Gleichung (4a) verwendet:

$$c_G = \frac{m_0 * X * p_0}{R * T} = \frac{78,11 \text{ g/mol} * 0,01 * 6.560 \text{ Pa}}{8,31446 (\text{Pa} * \text{m}^3) / (\text{K} * \text{mol}) * 283,15 \text{ K}} = 2.180 \text{ mg/m}^3$$

Im Weiteren wird als Regelfall davon ausgegangen, dass die Schadstoffe im Wasser gelöst zum betrachteten Baubereich transportiert werden. Als konservative Randbedingung in der „Quelle“ (Ort der Bildung der kontaminierten Bodenluft) kann also Gleichung (1) verwendet werden.

	Molgew.	Dampfdruck	Henry-Konstante	Diffusionskoeffizient	
	[g/mol]	bei 10 °C [Pa]	bei 10 °C [-]	in Luft bei 10 °C [m ² /s]	in Wasser bei 10 °C [m ² /s]
leicht flüchtige nicht aromatische Mineralölkohlenwasserstoffe (LMKW)					
n-Pentan	72,15	3,91E+04	2,89E+01	8,89E-06	1,05E-09
n-Hexan	86,18	1,09E+04	1,94E+01	8,13E-06	9,59E-10
n-Heptan	100,21	3,11E+03	4,24E+01	7,54E-06	8,86E-10
n-Octan	114,23	9,01E+02	3,28E+01	7,07E-06	8,26E-10
n-Nonan	128,26	2,70E+02	1,96E+01	6,69E-06	7,77E-10
n-Decan	142,29	8,33E+01	4,65E+01	6,36E-06	7,35E-10
n-Dodekan	170,34	4,83E+00	7,18E+01	5,84E-06	6,69E-10
n-Tetradekan	198,40	3,37E-01	7,60E+01	5,44E-06	6,17E-10
Cyclopentan	70,14	2,27E+04	4,20E+00	9,02E-06	1,07E-09
Cyclohexan	84,16	6,81E+03	3,47E+00	8,22E-06	9,71E-10
Cycloheptan	98,19	1,24E+03	2,04E+00	7,62E-06	8,95E-10
Cyclooctan	112,22	2,83E+02	1,59E+00	7,14E-06	8,34E-10
einkernige Aromaten (BTEX)					
Benzol	78,11	6,56E+03	1,11E-01	8,54E-06	1,01E-09
Toluol	92,14	1,77E+03	1,31E-01	7,86E-06	9,26E-10
Ethylbenzol	106,17	5,16E+02	1,21E-01	7,33E-06	8,59E-10
Xylol (Mittelwert, o,m,p)	106,17	5,18E+02	1,02E-01	7,33E-06	8,59E-10
Styrol	104,15	3,37E+02	4,79E-02	7,40E-06	8,68E-10
1,2,4 Trimethylbenzol	120,20	1,00E+02	1,19E-01	6,90E-06	8,04E-10
Propylbenzol	120,20	1,70E+02	2,22E-01	6,90E-06	8,04E-10
Cumol	120,20	2,29E+02	2,66E-01	6,90E-06	8,04E-10
Ethyltoluol	120,20	1,46E+02	1,87E-01	6,90E-06	8,04E-10
PAK					
Naphthalin	128,18	2,49E+00	9,49E-03	6,69E-06	7,77E-10
Methylnaphthalin	142,20	2,99E+00	1,11E-02	6,37E-06	7,36E-10
Dimethylnaphthalin	156,23	2,85E+00	6,56E-03	6,09E-06	7,00E-10
Acenaphthylen	152,20	4,15E+00	5,11E-03	6,16E-06	7,10E-10
Acenaphthen	154,21	1,36E+00	7,44E-03	6,12E-06	7,05E-10
Chloraromaten					
Chlorbenzol	112,56	7,54E+02	6,03E-02	7,13E-06	8,33E-10
1,2-Dichlorbenzol	147,00	7,49E+01	3,17E-02	6,27E-06	7,23E-10
1,4-Dichlorbenzol	147,00	k.A.	3,27E-02	k.A.	9,50E-10 **)
1,2,4-Trichlorbenzol	181,45	1,89E+01	2,85E-02	5,67E-06	6,47E-10
Phenole					
Phenol	94,11	6,69E+01	1,36E-05	7,78E-06	9,16E-10

*) bei 20 °C

**) bei 25 °C

k.A.: keine Angabe

Tab. 3: Ausgewählte physikalische Parameter für häufig bei Altlasten und Bodenverunreinigungen auftretende leicht flüchtige Schadstoffe (Daten aus ALTEX-1D ergänzt nach GRATHWOHL, 2000, SCHWARZENBACH et al., 2003, MONTGOMERY, 2007, und wikipedia.org)

	Molgew. [g/mol]	Dampfdruck bei 10 °C [Pa]	Henry- Konstante bei 10 °C [-]	Diffusionskoeffizient	
				in Luft bei 10 °C [m ² /s]	in Wasser bei 10 °C [m ² /s]
leicht flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW)					
Dichlormethan	84,93	3,18E+04	5,97E-02	8,19E-06	9,67E-10
Trichlormethan (Chloroform)	119,38	1,41E+04	6,39E-02	6,93E-06	8,07E-10
Tetrachlormethan	153,82	8,11E+03	5,16E-01	6,13E-06	7,06E-10
Dichlordifluormethan (Freon 12)	120,91	570.000 *)	1,14E+01	8,50E-06 *)	9,30E-10 *)
Trichlorfluormethan (Freon 11)	137,37	88.600 *)	2,09E+00	k.A.	9,30E-10 *)
1,2-Dichlorethan	98,96	5,10E+03	2,41E-02	7,59E-06	8,92E-10
1,1,1-Trichlorethan	133,41	8,11E+03	3,84E-01	6,56E-06	7,61E-10
1,2-Dibromethan	187,86	1.130 *)	1,10E-02	k.A.	9,60E-10 *)
1,1,1,2-Tetrafluorethan	102,04	570.000 *)	4,37E-02	k.A.	k.A.
1,1,2,2 Tetrachlorethan	167,85	7,93E+02	7,11E-03	5,88E-06	6,74E-10
1,1,1,2 Tetrachlorethan	167,85	6,50E+02	4,37E-02	5,88E-06	6,74E-10
Chlorethen (Vinylchlorid)	62,50	2,54E+05	6,67E-01	9,57E-06	1,14E-09
cis-Dichlorethen	96,94	1,38E+04	8,19E-02	7,67E-06	9,01E-10
Trichlorethen	131,39	4,63E+03	1,72E-01	6,61E-06	7,67E-10
Tetrachlorethen	165,83	1,18E+03	2,98E-01	5,92E-06	6,78E-10
Sonstige					
1,4-Dioxan	88,11	3.840 *)	2,10E-04 *)	k.A.	k.A.
MTBE	88,15	1,83E+04	6,11E-03	8,04E-06	9,48E-10

Tab. 3 (Forts.): Ausgewählte physikalische Parameter für häufig bei Altlasten und Bodenverunreinigungen auftretende leicht flüchtige Schadstoffe (Daten aus ALTEX-1D ergänzt nach GRATHWOHL, 2000, SCHWARZENBACH et al., 2003, und wikipedia.org)

3.3.2 Schadstofftransport in der Bodenluft

In der ungesättigten Bodenzone können advective und diffusive Transportvorgänge stattfinden. Advective Prozesse (Strömungen) sind mehrere Meter unter der Geländeoberfläche im Regelfall nicht relevant. Es dominieren Diffusionsprozesse. Diese lassen sich für einfache Geometrien mit Hilfe der Fickschen Gesetze für stationäre Verhältnisse als lineare Funktion beschreiben:

$$\dot{M} = D_{DG} * \frac{\Delta c_G}{L} * F \quad (6)$$

mit

\dot{M} : Massenstrom [mg/s]

D_{DG} : Diffusionskoeffizient in der Bodenluft [m²/s]

Δc_G : Konzentrationsunterschied [mg/m³]

L: Diffusionsstrecke [m]

F: Durchtrittsfläche [m²]

Der effektive Diffusionskoeffizient hängt vom freien Diffusionskoeffizienten D_{0G} in Luft (Tab. 3), der Porenstruktur und dem Wassergehalt des Bodens ab. Liegen hierüber keine näheren Erkenntnisse vor, wird ein Korrekturfaktor zwischen 0,1 und 0,3 verwendet (z. B. SEEGER, 1999).

In Bereichen mit erheblichen Druckunterschieden, d. h. insbesondere nahe der Geländeoberfläche oder im Umfeld von Gebäuden, kann es zu Strömungen in der Bodenluft kommen. Bei dieser Betrachtung wird ein Druckaufbau durch aktive Gasbildung (z. B. in Altablagerungen) nicht berücksichtigt. Die Strömungen folgen in erster Näherung dem Darcyschen Gesetz für nicht kompressible Fluide, da die Druck- und Temperaturunterschiede gering sind (SEEGER, 1999):

$$v_G = k_G * \frac{\Delta p}{\rho_G * g * \Delta x} \quad (7)$$

mit

v_G : Fließgeschwindigkeit, Filtergeschwindigkeit des Gases [m/s]

k_G : Durchlässigkeitsbeiwert für Gas [m/s]

ρ_G : Dichte des Gases [kg/m³]

g: Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s²]

Δp : Druckdifferenz [Pa]

Δx : Fließstrecke [m]

Der Durchlässigkeitsbeiwert berechnet sich aus der intrinsischen Permeabilität des Bodens und den temperaturabhängigen Eigenschaften des Gases (z. B. LANGGUTH & VOIGT, 2004):

$$k_G = K * \frac{\rho_G * g}{\mu_G} \quad (8)$$

mit

K: intrinsische Permeabilität [m²]

μ_G : dynamische Viskosität [Pa * s], bei 10 °C $\mu_G = 17,7 * 10^{-6}$ Pa * s

Damit lässt sich Gleichung (7) umformen zu:

$$v_G = K * \frac{\rho_G * g}{\mu_G} * \frac{\Delta p}{\rho_G * g * \Delta x} = K * \frac{\Delta p}{\mu_G * \Delta x} \quad (7a)$$

Der Massenstrom ergibt sich damit zu

$$\dot{M} = v_G * F * c_G \quad (9)$$

und mit Gleichung (7a) zu

$$\dot{M} = K * \frac{\Delta p}{\mu_G * \Delta x} * F * c_G \quad (9a)$$

[Anmerkung: Die Umrechnung von intrinsischer Permeabilität in Durchlässigkeitsbeiwert ist auch für Flüssigkeiten möglich, soweit die Porengröße so groß ist, dass die Oberflächenspannung der Flüssigkeit keinen wesentlichen Einfluss ausübt. Für Wasser gilt dies näherungsweise für Porendurchmesser über 0,01 mm. Bei kleineren Poren überwiegen Kapillarkräfte.]

Der Transport in der Bodenluft kann durch wassergesättigte Schichten, insbesondere bindige Zwischenschichten mit der Ausbildung von Schichtenwasser, unterbunden werden (MCHUGH et al., 2017; Bild 1).

Bei ausreichender Sauerstoffversorgung unter nicht großflächig versiegelten Flächen (Breite der überbauten Flächen maximal 20 m, U.S. EPA, 2015; Sauerstoffkonzentration > 4 Vol.%, HERS & TRUESDALE, 2013) kann es in der ungesättigten Zone zum Abbau von aerob abbaubaren Schadstoffen kommen. Dies betrifft insbesondere die Mineralölkohlenwasserstoffe (LMKW) und die einkernigen Aromaten (BTEX) (Bild 2). Daher führen Mineralölschäden nur in relativ seltenen Einzelfällen zu Gefährdungen über die Innenraumluft von Gebäuden (vgl. Abschn. 3.6). Einige LHKW (1,2-Dichlorethan, Chlorethen = Vinylchlorid; CITYCHLOR, 2013) können ebenfalls in der belüfteten Bodenzone (teilweise) abgebaut werden.

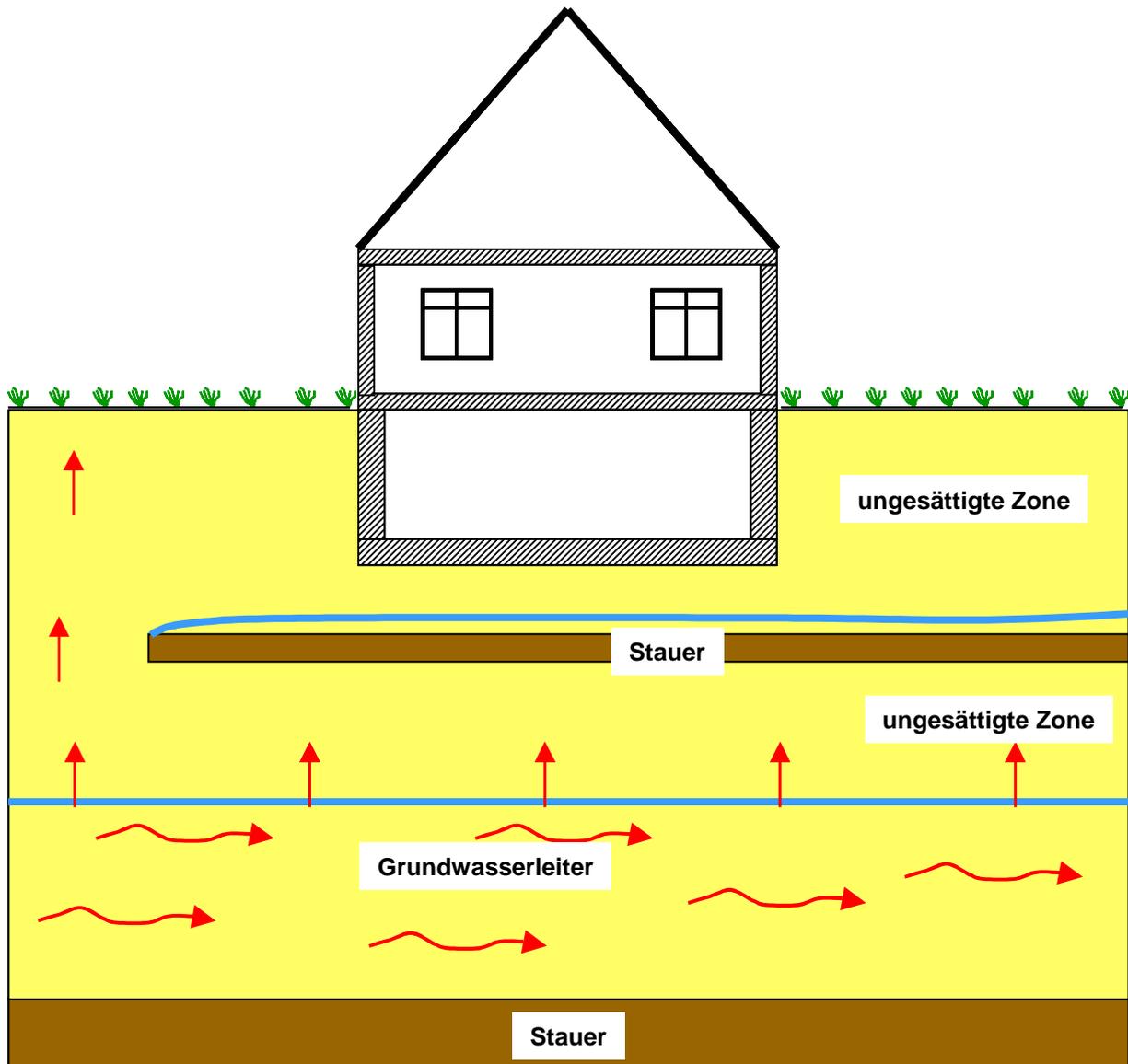
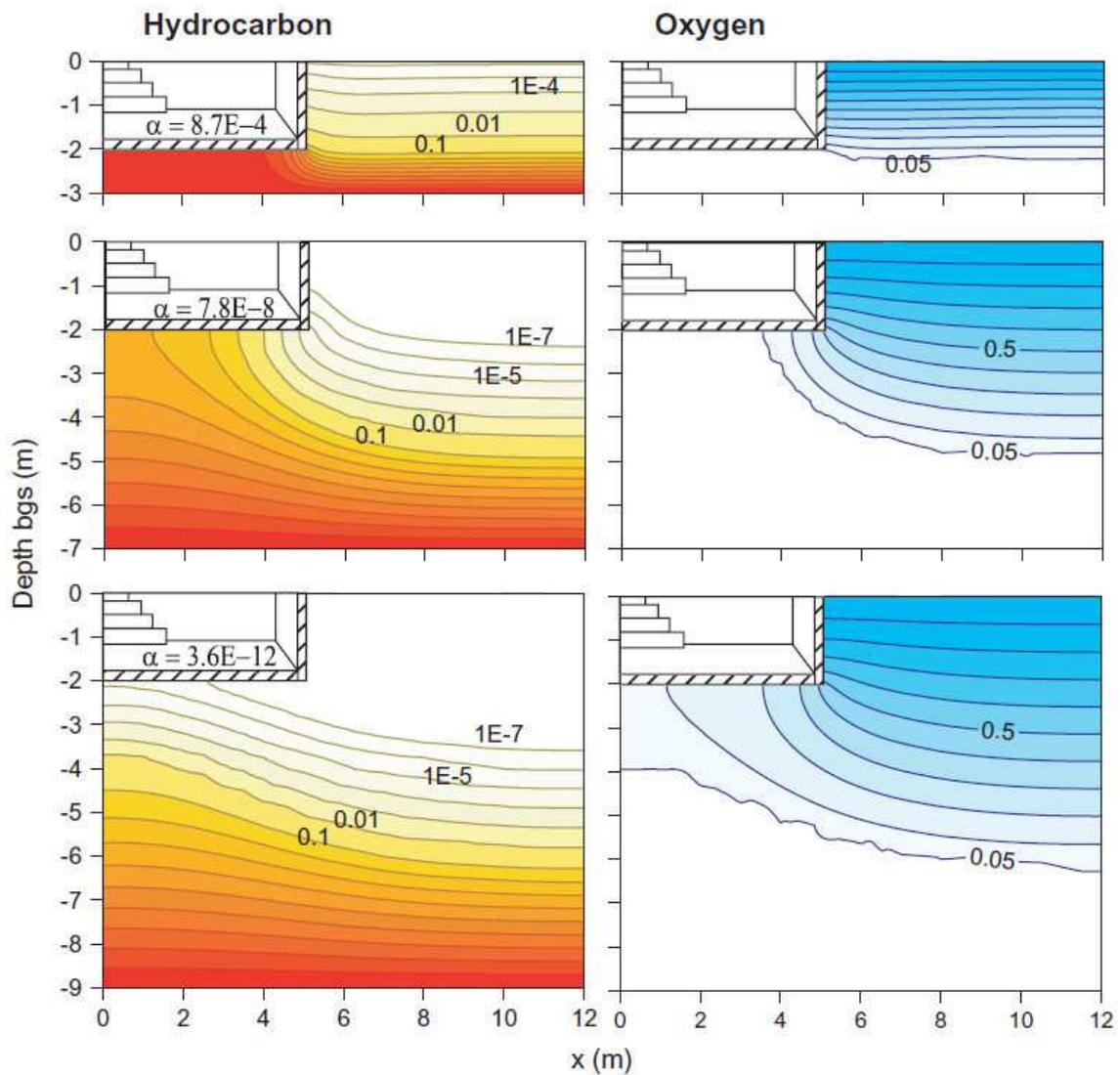


Bild 1: Natürliche Schutzwirkung von wassergesättigten bindigen Zwischenlagen in der ungesättigten Zone gegen die Ausbreitung von Schadstoffen in der Bodenluft



α = inverser Transferfaktor (vgl. Abschn. 3.5)

Isokonz. normiert auf Quellkonzentration (LMKW) bzw. Atmosphärenkonzentration (Sauerstoff)

Bild 2: Mineralölkohlenwasserstoffe und Sauerstoff in der ungesättigten Zone (aus ABREU, et al., 2009)

3.3.3 Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude über die Außenluft

Schadstoffe werden diffusiv aus dem kontaminierten Bereich zur Geländeoberfläche transportiert und treten in die freie Atmosphäre über. Von dort können sie in Gebäude gelangen (Bild 3). Durch die Strömungsverhältnisse in der freien Atmosphäre kommt es dabei jedoch zu einer sehr starken Verdünnung (z. B. SEEGER, 1999). Dieser Gefährdungspfad ist daher nur in extrem verunreinigten Bereichen relevant. Derartige Bereiche werden im Regelfall erst nach einer Sanierung und damit Reduzierung des Schadstoffpotenzials bebaut.

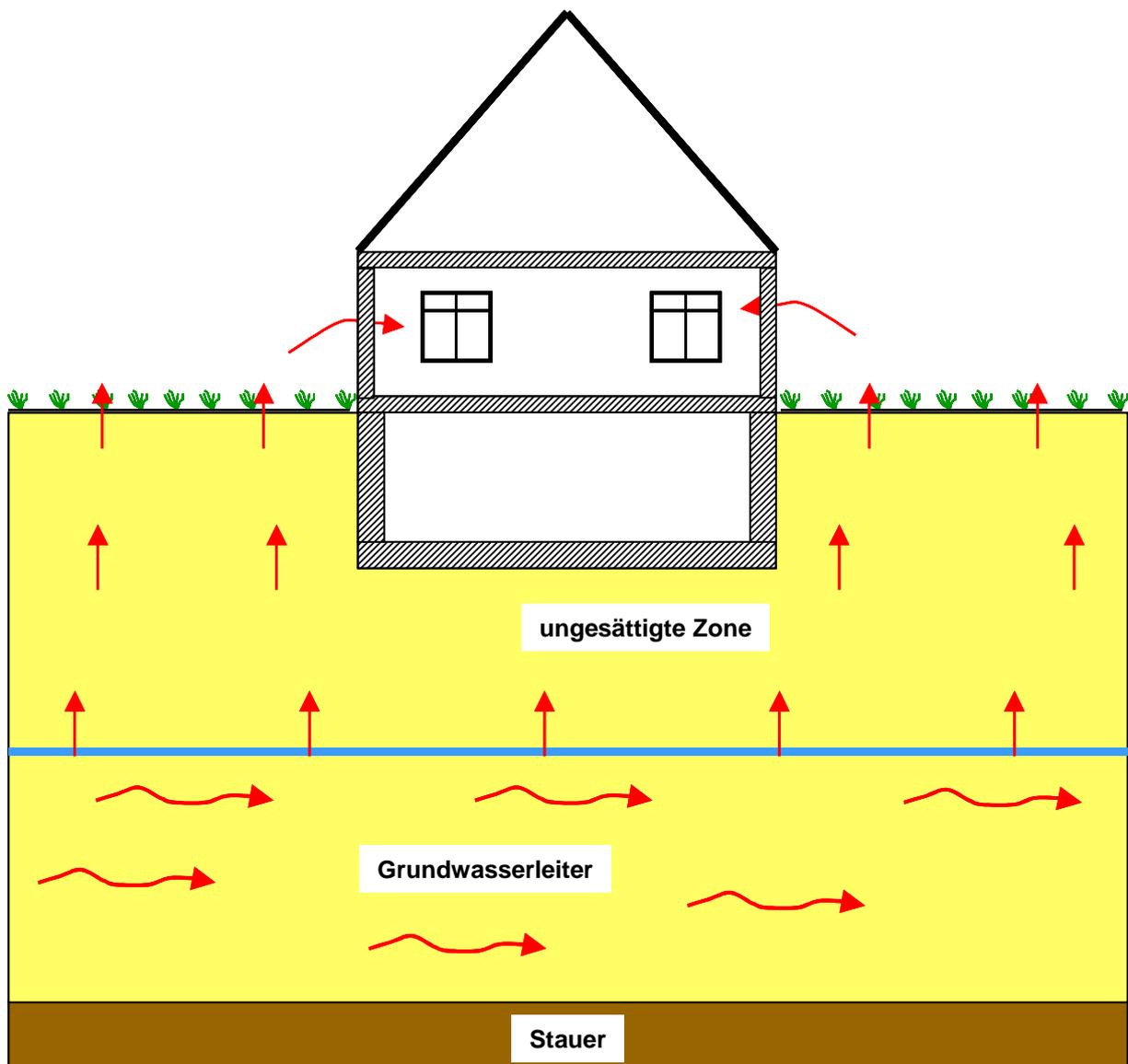


Bild 3: Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude über die Außenluft

3.3.4 Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch Leitungen

Schadstoffe können diffusiv in Druckleitungen (Trinkwasser) aus Kunststoffen (PVC, PE) eindringen und dann bei der Entnahme des Wassers im Gebäuden, insbesondere in Duscbädern, in die Innenraumlufte freigesetzt werden. Die Verunreinigung des Wassers muss dabei nicht im unmittelbaren Bereich des betrachteten Grundstücks, sondern kann auch in einiger Entfernung geschehen. Für eine relevante Belastung des Trinkwassers auf diesem Weg sind jedoch sehr hohe Bodenluftbelastungen bzw. ein Kontakt der Leitung mit hoch belastetem Grundwasser oder organischer Reinphase erforderlich (SEEGER, 1999).

Eine zweite Möglichkeit besteht im Eindringen kontaminierter Bodenluft oder kontaminierten Grundwassers durch Undichtigkeiten oder Beschädigungen in Leitungen des Abwassersystems. Auch die Möglichkeit (illegaler) Einleitungen von kontaminiertem Wasser in das Abwassersystem sollte nicht völlig außer acht gelassen werden, z. B. bei Baugrubenwasserhaltungen. Wie bei Trinkwasserleitungen muss die Verunreinigung nicht im unmittelbaren Bereich des betrachteten Grundstücks geschehen. Das verunreinigte Gas kann sich diffusiv oder bei geeigneten Druckverhältnissen (vgl. Abschn. 3.3.5) bis in das Gebäude ausbreiten (Bild 4) (PENNELL et al., 2013; NIELSEN & HVIDBERG, 2017). Diese Ausbreitung wird jedoch baulich regelmäßig durch Gasfallen (Siphons) in den Leitungen verhindert. Leitungen ohne derartige Schutzmechanismen, insbesondere bei Bodeneinläufen im Kellergeschoss, können jedoch eine erhebliche Gefährdung bilden. Auch Undichtigkeiten der Abwasserleitungen, insbesondere an den Anschlussstücken der Gasfallen, können zum Austritt von Schadstoffen innerhalb des Gebäudes führen. In Dänemark sind nach NIELSEN & HVIDBERG (2017) über 20 % aller Fälle von Kontamination der Innenraumlufte im Bereich von Chemischreinigungen auf diesen Eintragungspfad zurückzuführen.

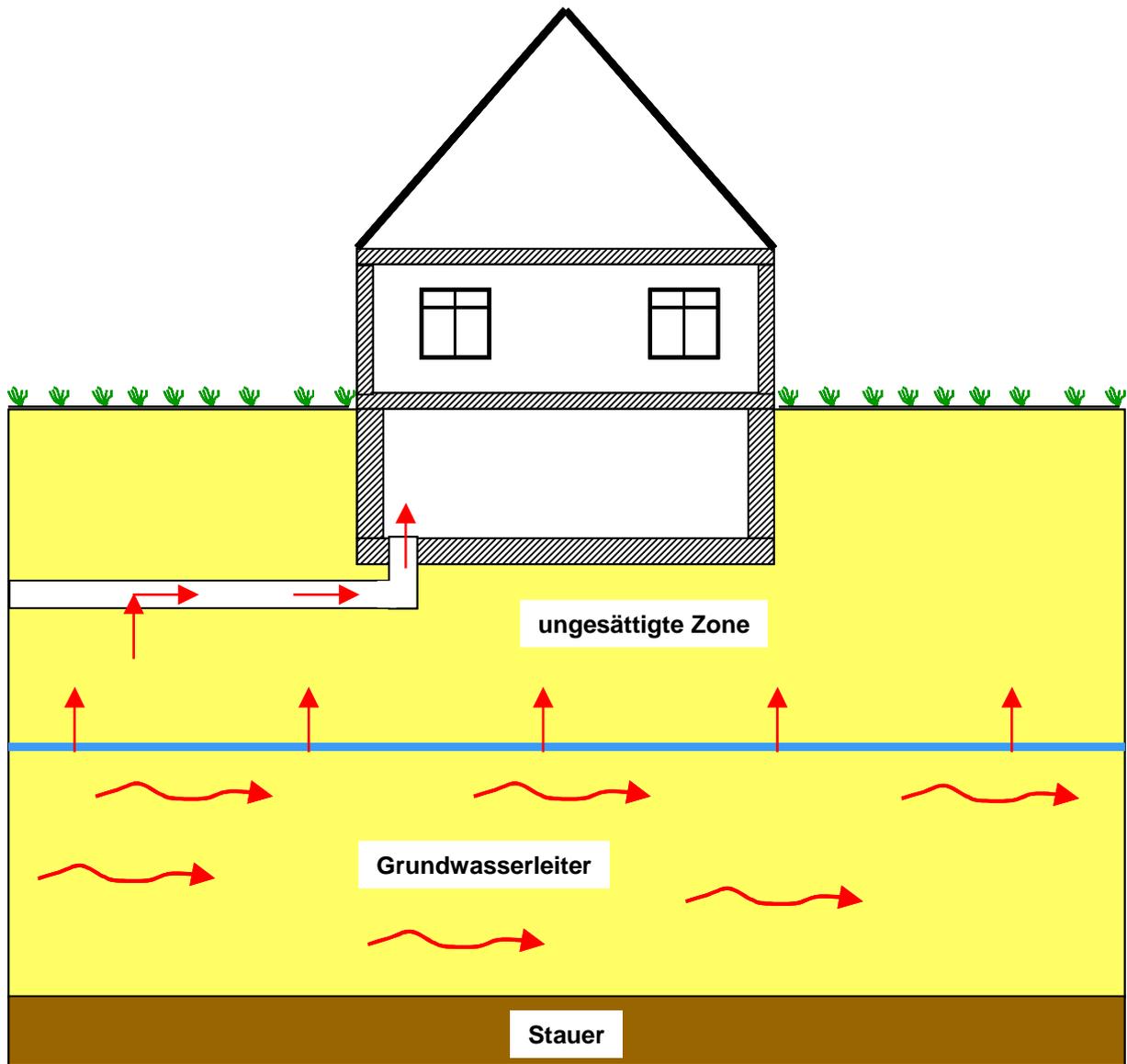


Bild 4: Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch Abwasserleitungen

3.3.5 Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch Fugen, Risse oder Leitungsdurchbrüche

Undichtigkeiten an der Sohle bzw. im Kellergeschoss eines Gebäudes in Form von Fugen, Rissen oder Leitungsdurchführungen stellen oft wesentliche Wegsamkeiten für verunreinigte Bodenluft dar (Bild 5). Diese Wegsamkeiten sind bei der Gefährdungsabschätzung für vorhandene Bebauung oft maßgeblich (SEEGER, 1999; OSWER, 2015). Bei einer Neubebauung nach dem Stand der Technik lassen sich derartige Wegsamkeiten weitgehend ausschließen (Abschn. 4.1, 4.3).

Damit es zu einem Eindringen von kontaminierter Bodenluft kommt, muss im Gebäude gegenüber dem Boden ein Unterdruck bestehen. Hier reichen meist Druckdifferenzen von wenigen Pascal aus.

[Anmerkung: 1 Pascal entspricht 0,1 mm Wassersäule. Barometrische Druckschwankungen erreichen in unserem Klimabereich eine Größenordnung von 5.000 Pa.]

Die Ursachen der Druckdifferenzen können natürlicher Art sein:

- barometrische Druckschwankungen in der Atmosphäre
- Druckschwankungen der Bodenluft durch Temperaturänderungen
- Bewegungen des Grundwasserspiegels

Wichtiger aber sind technische Ursachen:

- Windlasten auf das Gebäude
- Kamineffekt in der Heizungsperiode
- aktive Be- und Entlüftung des Gebäudes

Für eine Bewertung derartiger Einflüsse ist es wichtig, dass sie keine konstante Wirkung haben, sondern zeitlich veränderlich sind. Dies ist nicht nur bei der orientierenden Gefährdungsabschätzung zu bedenken, sondern auch bei ggf. zu veranlassenden Messungen am Gebäude (Abschn. 3.7).

Als Beispiel sollen hier die Ergebnisse einer kontinuierlichen Überwachung der Schadstoffkonzentration in einem Gewerbegebäude unter dem Einfluss barometrischer Druckschwankungen gezeigt werden (Bild 6; HOSANGADI et al., 2017). Wesentlich ist hierbei, dass bei diesem Gebäude nachträglich Fugen und Risse der Sohlplatte, insgesamt 4.500 laufende Meter, saniert worden sind. Trotzdem ist das Eindringen von Schadstoffen durch Strömungsprozesse mit diesen Messungen nachgewiesen worden. Allerdings ist hier anzumerken, dass die maximalen Konzentrationen für Trichlorethen in einer Größenordnung von 0,4 mg/m³ vor dem Hintergrund einer Grundwasserbelastung von bis zu 100 mg/l und einer Bodenluftbelastung von bis zu 6.000 mg/m³ zu sehen sind. Es soll aber damit demonstriert werden, dass auch bei sorgfältiger Bauausführung der Einfluss von Rissen und ähnlichen Undichtigkeiten nicht völlig auszuschließen ist.

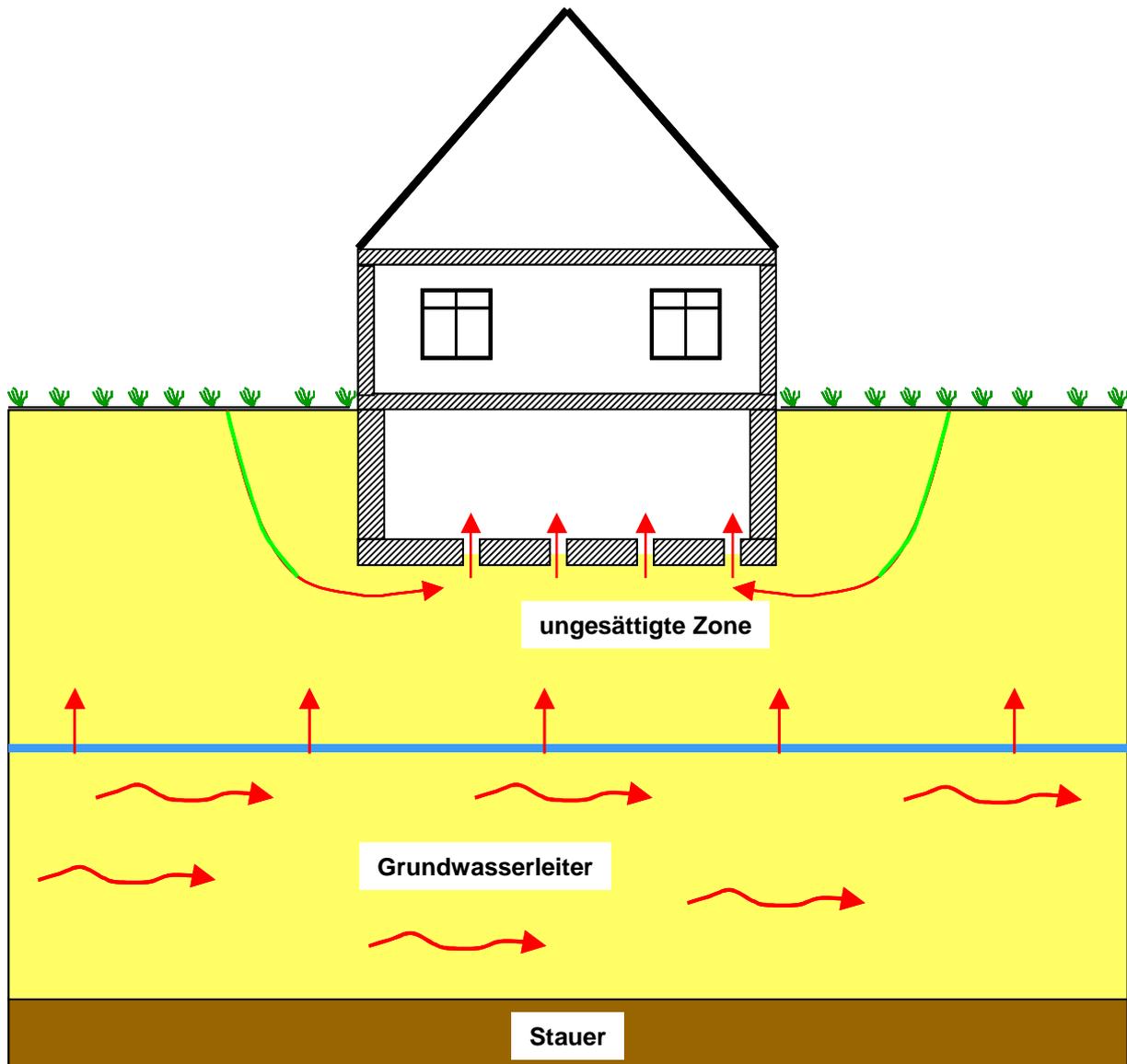


Bild 5: Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch Fugen, Risse oder Leitungsdurchbrüche

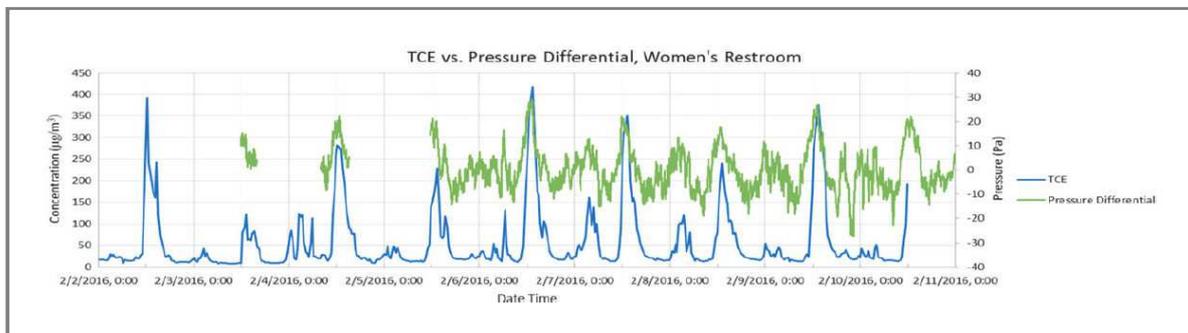


Exhibit 3. Indoor TCE concentration versus pressure differential – temporal relationship

Bild 6: Einfluss barometrischer Druckschwankungen auf die Raumluftqualität in einem Industriegebäude (HOSANGADI et al., 2017)

3.3.6 Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch massive Bauteile

Massive Bauteile, im Regelfall aus Beton, sind nicht undurchlässig für Gase, können diesen jedoch einen erheblichen Widerstand bieten. Es sind zwischen der Durchströmung des Bauteils und dem diffusiven Transport von Schadstoffen zu unterscheiden. Für diese beiden Prozesse gelten die Berechnungsgrundlagen aus Abschn. 3.3.2 entsprechend (Gleichungen 6 bis 9) (Bild 7).

Für die Abschätzung der physikalischen Größen wird auf Bild 8 (VDZ, 2002) verwiesen. Die Porosität, die Porengrößen sowie die Konnektivität der Poren und die daraus resultierende Gas- bzw. Flüssigkeitsdurchlässigkeit und Diffusivität des Betons werden wesentlich vom Wasserzementwert bestimmt. Betone mit einem Wasserzementwert $w/z \leq 0,45$ werden als porenarm oder oft auch als „gasdicht“ bezeichnet (RICHTER, 2010).

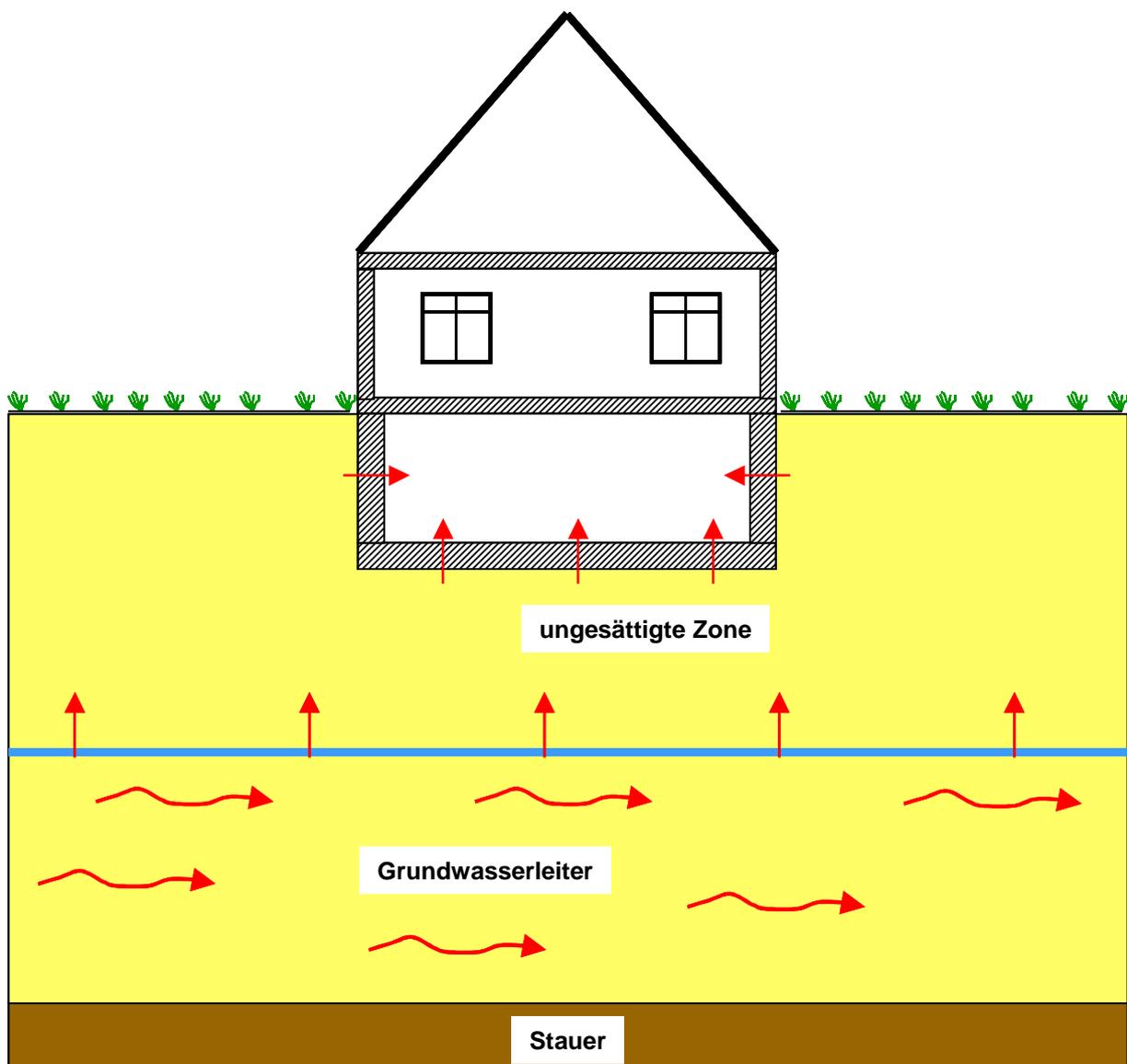


Bild 7: Eindringen kontaminierter Bodenluft in Gebäude durch massive Bauteile

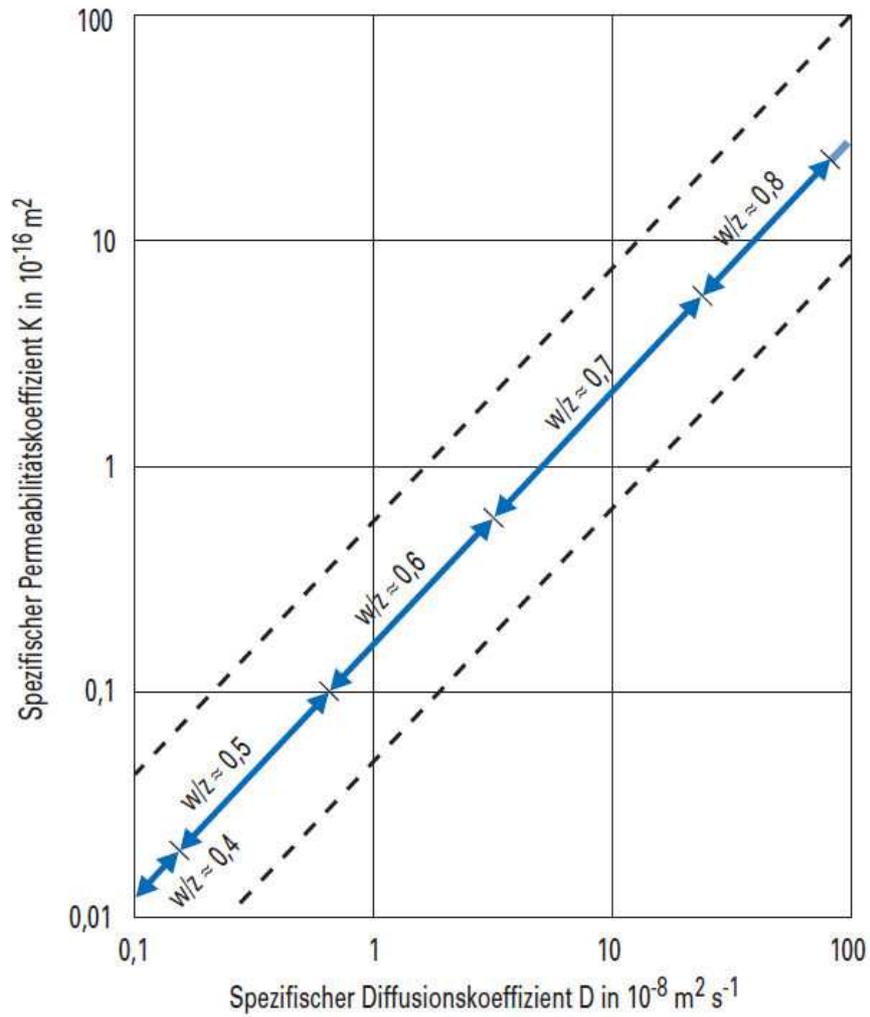


Bild 8: Gaspermeabilitäten und Diffusionskoeffizienten für Sauerstoff bei Beton in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (VDZ, 2002)

3.3.7 Sonderfall: Eindringen von Grundwasser in Gebäude durch massive Bauteile

ZEDDEL et al. (2002) geben ohne nähere Erläuterung den warnenden Hinweis: „Kann kontaminiertes Grundwasser mit der Bausubstanz in Kontakt treten, sind Kapillareffekte zu berücksichtigen, die auf Grund des anders gearteten Transportprozesses zu weit höheren Innenraumkonzentrationen führen können als durch den Eintritt von Bodenluft in das Gebäude.“

Diese Angabe beruht anscheinend auf der Vorstellung, dass beim Auftreten von Wasser an der Oberseite der Sohlplatte dieses die Konzentration des Grundwassers hat und ungehindert durch Gleichgewichtseinstellung (Gleichung 1) eine entsprechende Konzentration in der Innenraumluft einstellt.

Diese Vorstellung ist irreführend, wie sich mit einer einfachen Modellbetrachtung zeigen lässt:

Das Bauwerk steht mit dem Grundwasser in Kontakt (Bild 9). Im stationären Fall ist die maximal durchtretende Wassermenge diejenige Menge, die mit dem Luftaustausch als Wasserdampf abgeführt werden kann. Größere Mengen würden eine ständige Wasserhaltung erfordern. Die vertikale Fließgeschwindigkeit im Beton ist dabei wesentlich höher als die Diffusionsgeschwindigkeit der Schadstoffe im Wasser. Eine Gleichgewichtseinstellung zwischen Wasser- und Gasphase findet nicht statt. Als konservativer Ansatz wird eine Zuluft mit der Wasserdampfsättigung 0 % angenommen sowie eine vollständige Verdunstung bis zur Sättigung 100 %. Damit ergibt sich die maximal freigesetzte Schadstoffkonzentration in der Innenraumluft aus der **Sättigungskonzentration für Wasserdampf** bei Raumtemperatur:

$$c_{IL} = \frac{c_{H_2O_{Lsat}}}{\rho_W} * c_W \quad (10)$$

mit

c_{IL} : Konzentration des Schadstoffs in der Innenraumluft [mg/m³]

$c_{H_2O_{Lsat}}$: Sättigungskonzentration des Wasserdampfs [g/m³], bei 20 °C ca. 17,3 g/m³

ρ_W : Dichte des Grundwassers [g/m³], ca. 1.000.000 g/m³

Durch Umstellung ergibt sich für die maximal zulässige Konzentration im Grundwasser:

$$c_{Wmax} = \frac{\rho_W}{c_{H_2O_{Lsat}}} * c_{ILmax} \quad (11)$$

mit

c_{ILmax} : maximal zulässige Konzentration des Schadstoffs in der Innenraumluft [mg/m³]

c_{Wmax} : maximal zulässige Konzentration des Schadstoffs im Wasser [mg/m³]

Zur Probe, dass tatsächlich dieser Prozess maßgeblich ist, wird eine Massenbilanz erstellt:

$$\dot{M} = \lambda * h * F * c_{IL} \quad (12)$$

mit

λ : Luftwechselzahl [1/s]

h: Raumhöhe [m]

Bezogen auf eine Raumhöhe von 2,5 m, eine Einheitsfläche von $F = 1 \text{ m}^2$ und bei einer Luftwechselzahl von $\lambda = 7/d$ ergibt sich damit:

$$\dot{M} = \frac{7}{86400s} * 2,5 \text{ m} * 1 \text{ m}^2 * \frac{17,3 \text{ g/m}^3}{1000000 \text{ g/m}^3} * c_w \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = 3,5 * 10^{-9} * c_w \left[\frac{\text{mg}}{\text{s}} \right]$$

Zum Vergleich ergibt sich aus der **Diffusion in der wässrigen Phase** (entsprechend Gleichung (6)):

$$\dot{M} = D_{DW} * \frac{\Delta c_w}{L} * F$$

mit

D_{DW} : Diffusionskoeffizient im wassergesättigten Beton [m^2/s]

$\Delta c_w = c_w$: Konzentrationsunterschied [mg/m^3]

Mit einem geschätzten Diffusionskoeffizienten von $D_{DW} = 1 * 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, einer Diffusionsstrecke $L = 0,2 \text{ m}$ und bezogen auf die Einheitsfläche von $F = 1 \text{ m}^2$ ergibt sich damit:

$$\dot{M} = 1 * 10^{-11} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} * \frac{c_w \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right]}{0,2 \text{ m}} * 1 \text{ m}^2 = 5 * 10^{-11} * c_w \left[\frac{\text{mg}}{\text{s}} \right]$$

Eine Gleichgewichtseinstellung im Sinne der Gleichung (1) ist also nicht möglich, da die Verdunstung und damit die vertikale Durchströmung der Betonsohle wesentlich schneller verläuft als die Diffusion.

Beispiel:

Das Grundwasser hat eine Tetrachlorethen-Konzentration $c_w = 5 \text{ mg/l}$. Bei Verdunstung in wasserdampffreie Raumluff werden bei 20°C $17,3 \text{ g}$ entsprechend $0,0173 \text{ l}$ Wasser je Kubikmeter Raumluff verdunstet. Diese enthalten $0,0173 \text{ l} * 5 \text{ mg/l} = 0,0865 \text{ mg}$. Damit hat die Raumluff eine Konzentration von $c_{IL} = 0,0865 \text{ mg/m}^3$, knapp unterhalb des Grenzwerts der 2. BlmschVO von $0,1 \text{ mg/m}^3$.

Bei wasserdampfgesättigter Zuluft, die keine Verdunstung zulässt, wäre dagegen unter Annahme einer vollständigen Umwälzung der Raumluff die Einstellung einer Gleichgewichtskonzentration zwischen Wasser und Raumluff an der Oberseite der Sohlplatte denkbar:

$$c_w = \frac{c_{IL}}{H} = \frac{0,0865 \text{ mg/m}^3}{0,544} = 0,159 \text{ mg/m}^3 = 0,159 \mu\text{g/l}$$

Die Schadstofffracht beträgt für die Einheitsfläche von 1 m^2 , eine Raumhöhe von $2,5 \text{ m}$ und eine Luftwechselrate vom $7 / \text{d}$

$$\dot{M} / F = \lambda * h * c_{IL} = \frac{7}{86400 \text{ s}} * 2,5 \text{ m} * 0,0865 \text{ mg/m}^3 = 1,75 * 10^{-5} \text{ mg}/(\text{m}^2 * \text{s})$$

und damit wäre für eine Sohlplatte mit $0,2 \text{ m}$ Dicke eine Grundwasserkonzentration erforderlich von

$$\Delta c_w = \frac{\dot{M} / F * L}{D_{DW}} = \frac{1,75 * 10^{-5} \text{ mg}/(\text{m}^2 * \text{s}) * 0,2 \text{ m}}{1 * 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{s}} = 350.000 \text{ mg/m}^3 = 350 \text{ mg/l}$$

Ausgehend von der vorgegebenen Tetrachlorethen-Konzentration $c_w = 5 \text{ mg/l}$ beträgt die diffusive Fracht je Einheitsfläche von 1 m^2

$$\dot{M} / F = D_{DW} * \Delta c_w / L = 1 * 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{s} * 5.000 \text{ mg/m}^3 / 0,2 \text{ m} = 2,5 * 10^{-7} \text{ mg}/(\text{m}^2 * \text{s})$$

Der Diffusionstransport ist also irrelevant.

Diese Betrachtung gilt naturgemäß nicht für einen dauernden Zutritt von Grundwasser, das über einen Pumpensumpf abgepumpt werden muss und dabei tatsächlich erhebliche Raumluffbelastungen verursachen kann (U.S. EPA, 2015).

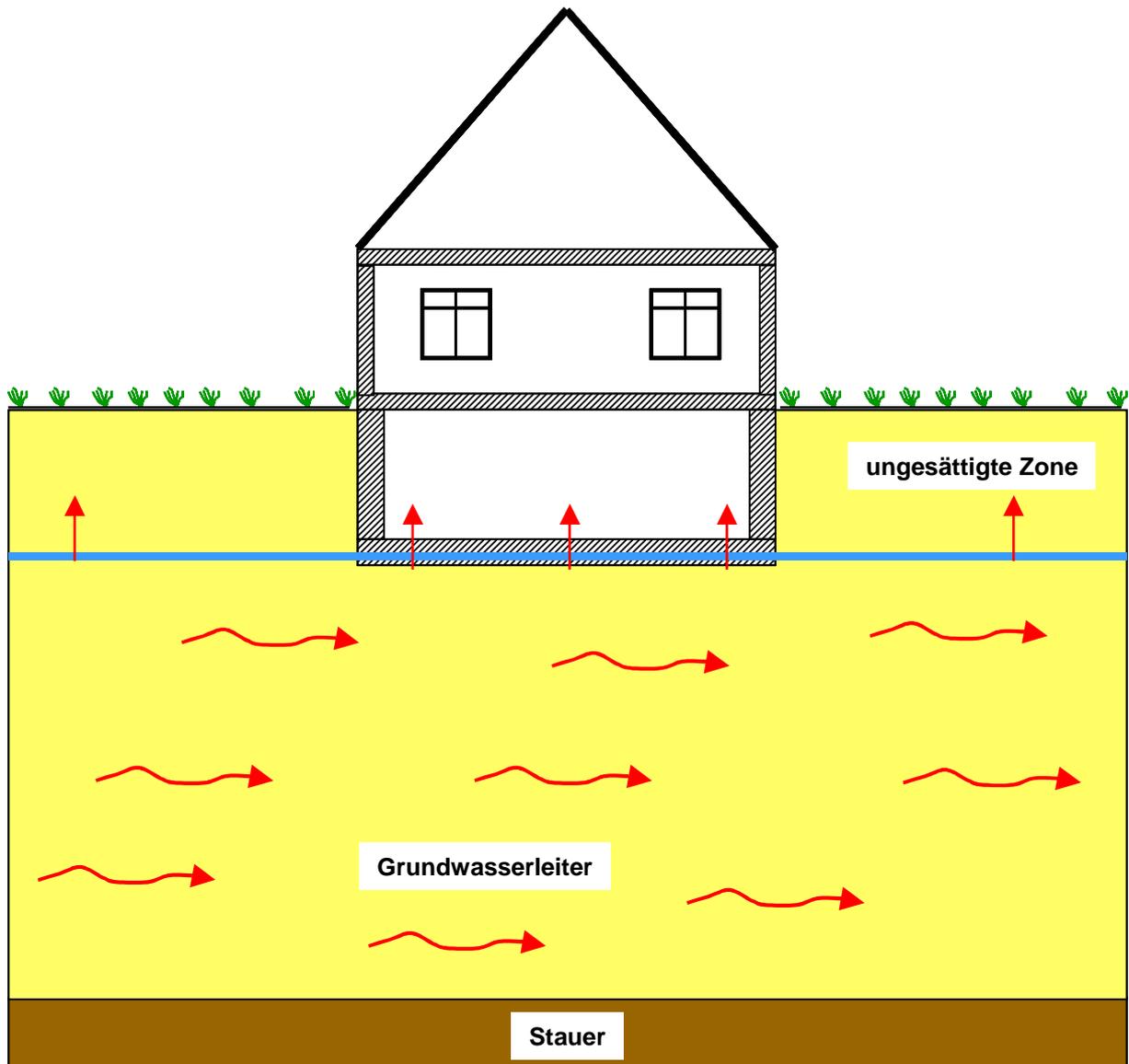


Bild 9: Sonderfall: Eindringen von Grundwasser in Gebäude durch massive Bauteile

3.3.8 Luftströmungen in Gebäuden

Die Strömungsbedingungen innerhalb von Gebäuden sind sehr komplex. Sie werden durch die baulichen Verhältnisse und den Betrieb bestimmt.

Es ist allgemein üblich, für einen einzelnen Raum turbulente Strömungsbedingungen mit instantaner vollständiger Durchmischung anzunehmen. Eindringende Schadstoffe werden daher als gleichmäßig im Raumvolumen verteilt angenommen.

Der Austausch zwischen den Stockwerken, insbesondere aus dem Kellergeschoss in die darüber liegenden Räume, unterliegt vielfältigen Rahmenbedingungen. Je nach Bauweise gibt es Möglichkeiten zwischen dem ungehinderten Übergang in Gebäuden mit offenem Treppenhaus bis in den Keller und weitgehender Abtrennung des Kellergeschosses vom restlichen Gebäude. Nach KEMSKI et al. (2002) liegt der Verdünnungsfaktor beim Übergang vom Kellergeschoss zum Erdgeschoss in vorhandenen Gebäuden im Mittel bei 2.

Eine wesentliche Größe zur Abschätzung der potenziellen Gefährdung von Bewohnern oder Nutzern von Gebäuden ist die Lüftung, ausgedrückt in der **Luftwechselzahl**, die die Anzahl des vollständigen Austauschs des Gebäude- oder Raumvolumens pro Zeiteinheit beschreibt. Alle Gebäude weisen auch bei geschlossenen Türen und Fenstern einen Luftaustausch auf, sei es durch Zwangsbelüftungen, z. B. im Dachbereich, Undichtigkeiten an Türen und Fenstern etc. Die Luftwechselrate auf Grund der baulichen Gegebenheiten liegt bei 0,15 / h bis 1 / h entsprechend 3,5 / d bis 24 / d. Bei modernen energieoptimierten Häusern liegt diese Austauschrate deutlich niedriger als bei älteren Gebäuden (RÖSSLER, 2013). Der Mindestaustausch für Räume zum ständigen Aufenthalt von Personen (Wohnräume), insbesondere zur Vermeidung der Schimmelpilzbildung, wird je nach Quelle mit 0,3 / h bis 0,5 / h entsprechend 7 / d bis 12 / d angegeben (z. B. LOHMEYER & EBELING, 2008, RÖSSLER, 2013; DBV, 2009). Für als Wohnraum oder ähnlich genutzte Kellerräume gibt DBV (2009) eine typische Luftwechselzahl von 12 / d bis 24 / d an.

REICHMAN et al. (2017) haben in einer Literaturlauswertung für die USA typische Werte zwischen 0,2 / h und 1 / h entsprechend 5 / d bis 24 / d, mit erheblichen regionalen und jahreszeitlichen Unterschieden zusammengestellt.

In Gewerbegebäuden liegen die Luftwechselraten regelmäßig höher als bei Wohngebäuden. Dasselbe gilt für Tiefgaragen im Kellergeschoss von Wohngebäuden (VDI, 2014).

3.4 Modelle

3.4.1 Strömungsmodelle

Die meisten publizierten Modelle sind Strömungsmodelle, die von Undichtigkeiten im Bereich des Kellergeschosses bzw. der Bodenplatte ausgehen. Sie dienen der Gefährdungsabschätzung für bestehende Gebäude. Bei diesen sind entsprechende Undichtigkeiten regelmäßig nachgewiesen worden oder auf Grund der Bauart des Gebäudes anzunehmen.

Es sind sowohl numerische Modelle in 1 bis 3 Dimensionen als auch analytische Modelle mit vereinfachenden Annahmen und rechnerischen Approximationen entwickelt worden.

Der Stofftransport im Boden erfolgt überwiegend diffusiv. Erst im Bereich unmittelbar unterhalb der Sohlplatte werden relevante Strömungen durch einen im Gebäude herrschenden Unterdruck angeregt.

Die am häufigsten eingesetzten analytischen Modelle stammen von JOHNSON & ETTINGER (1991) (JE-Modell, mit zahlreichen Variationen und Ergänzungen) und Ferguson (FERGUSON et al., 1995; ENVIRONMENT AGENCY, 2002). Diese beiden Modelle werden in der behördlichen Praxis der U.S. EPA bzw. der U.K. Environment Agency eingesetzt.

Als Grundkonfiguration bei der Anwendung des JE-Modells wird oft eine umlaufende Fuge um die Sohlplatte des Gebäudes angenommen (Bild 10). Diese Konfiguration entspricht in Amerika weit verbreiteten Baugewohnheiten.

Der Wert der Modellierung wird insgesamt eher kritisch eingeschätzt (z. B. MCHUGH et al., 2017), da in sie zu viele Annahmen einfließen. Insbesondere ist die zeitlich veränderliche Drucksituation selten bekannt und nicht zuverlässig in mittlere Werte zu transformieren.

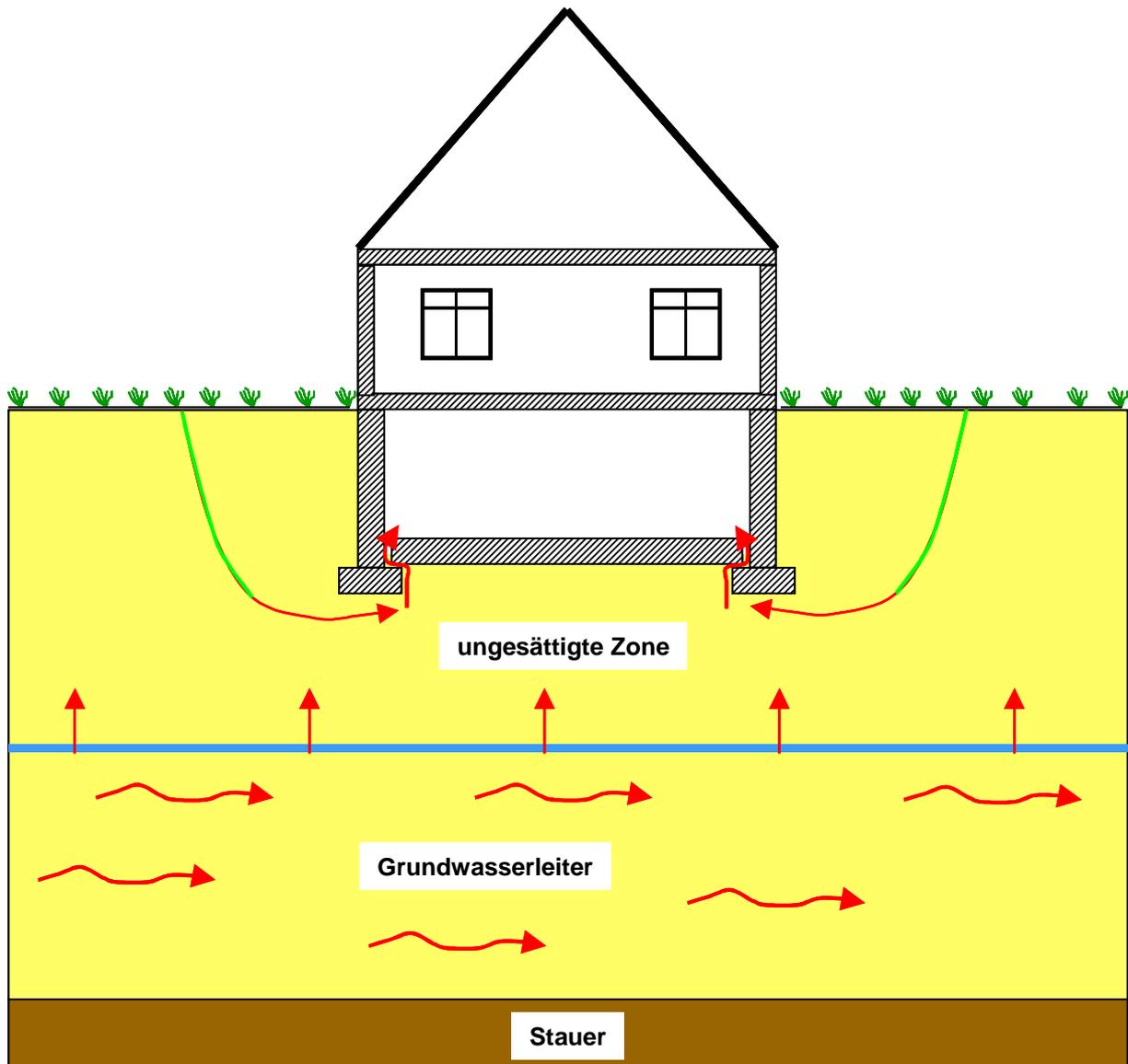


Bild 10: Regelmäßig angesetzte Konfiguration bei der Anwendung des JE-Modells

3.4.2 Diffusionsmodelle

Diffusionsmodelle, die keine relevante Durchströmung der Sohlplatte oder der Kellerwände annehmen, sind nicht explizit veröffentlicht worden, da sie gemäß Gleichung (6) trivial sind. Die meisten Modelle enthalten aber zusätzlich zur Strömung auch diffusive Rechenglieder.

3.5 Transferfaktoren Grundwasser – Bodenluft – Innenraumluft

Für die Gefährdungsabschätzung von geplanten Gebäuden oder größeren Flächen ist eine modellhafte Betrachtung einzelner Szenarien wenig zielführend. Es hat sich daher eingebürgert, aus exemplarischen Modellrechnungen und Feldbeobachtungen pauschale Transferfaktoren für die mögliche Belastung der Innenraumluft durch nicht abbaubare leicht flüchtige Schadstoffe in der Bodenluft abzuleiten. Diese Transferfaktoren umfassen alle relevanten Prozesse. Sie können daher erheblich von den tatsächlichen Gegebenheiten abweichen und werden daher konservativ bis sehr konservativ angesetzt.

Hierbei sind drei Transferfaktoren zu unterscheiden:

- TF_{GW}: Transferfaktor von der Bodenluft unmittelbar oberhalb des Grundwasserspiegels bzw. im Bereich des kontaminierten Bodens zur Innenraumluft
 TF_{Bl}: Transferfaktor von der Bodenluft zur Innenraumluft
 TF_{Sp}: Transferfaktor von der Bodenluft unmittelbar unterhalb der Sohlplatte zur Innenraumluft

Die Transferfaktoren berechnen sich jeweils zu

$$TF_x = \frac{c_{Blx}}{c_{IL}} \quad (13)$$

mit

c_{Blx}: Konzentration in der Bodenluft am Ort x [mg/m³]

In der internationalen Literatur wird der inverse Wert des Transferfaktors als „attenuation factor“ verwendet (Bild 2, 11).

Durch Umstellung ergibt sich

$$c_{IL} = \frac{c_{Blx}}{TF_x} \quad (13a)$$

Dabei ist c_{Blx} für das Grundwasser die Gleichgewichtskonzentration in der Bodenluft gemäß Gleichung (1) am Grundwasserspiegel bzw. im Kapillarsaum, für organische Schwimmphasen die Gleichgewichtskonzentration gemäß Gleichung (5) und für alle Fälle gegebenenfalls die gemessene Bodenluftkonzentrationen im Bereich der Schadstoffquelle. Nach ITRC (2014) besteht bei LMKW zwischen der rechnerischen Gleichgewichtskonzentration mit dem Grundwasser und gemessenen Bodenluftkonzentrationen auf Grund von Effekten der Kapillarzone (Ungleichgewichte und biologischer Abbau) eine Reduktion um den Faktor 100 bis 1000.

ALA/LABO (2008) geben pauschal die Vorgabe: „Für den Transfer Bodenluft -> Kellerinnenraumluft wird ein Transferfaktor von 1:1000 zu Grunde gelegt, der für viele Fälle als ausreichend konservativ beschrieben wird.“

In Tab. 4 sind verschiedene Vorschläge für Transferfaktoren aufgeführt. Bei den Angaben von OSWER (2015) und ALA/LABO (2008) handelt es sich um amtliche Stellungnahmen auf der Grundlage einer Vielzahl von Untersuchungen. Die darunter

aufgeführten Einzelpublikationen beruhen dagegen auf unterschiedlicher Datenbasis und Methodik. Hierbei ist zu beachten, dass die amerikanischen Untersuchungen überwiegend strömungsbedingte Verunreinigungen der Innenraumluft beschreiben. Hieraus erklärt sich der große Abstand zwischen TF_{Gw} und TF_{Sp} . Eine kritische Auswertung der Daten der U.S. EPA durch JOHNSTON & MACDONALD GIBSON (2013) zeigt für einen Teil der Daten bei geringem Grundwasserflurabstand eine Unterschreitung des TF_{Gw} von 1.000 (Bild 11). Dieser Effekt ist auf den bei den Untersuchungsobjekten dominierenden Strömungstransport zurück zu führen.

Bei den Angaben der ALA/LABO ist dagegen keine einheitliche Zuordnung der Messpunkte gegeben. Sie umfassen sowohl überwiegend advektive als auch diffusive Prozesse. Der erhöhte Transferfaktor von 2000 nach OSWER (2015) gilt nur beim Vorliegen feinkörniger ausgedehnter Zwischenschichten in der ungesättigten Zone.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2011) beziehen sich ausdrücklich auf Neubebauungen. Für neu errichtete Wohngebäude wird ein durchschnittlicher Wert von 1.000 angegeben.

	TF_{Gw}	TF_{Bl}	TF_{Sp}
OSWER, 2015	1.000 (2.000)		33
ALA/LABO, 2008		200 bis 10.000	
ZEDDEL et al., 2002		100 bis 1.000	
KEMSKI et al., 2002		7,5 bis 10.000 **)	
Cal. EPA, 2012		500 bis 5.000	
JOHNSON et al., 2009	10.000 bis 1.000.000		
BREWER et al., 2014			300 bis 2.000
YAO et al., 2015	250		50
FOLKES et al., 2010	10.000 bis 1.000.000		
SFT, 1995 *)		2.000	
MDEP, 1994 *)		20.000	

TF_{Gw} : Transferfaktor von der Bodenluft unmittelbar oberhalb des Grundwasserspiegels bzw. im Bereich des kontaminierten Bodens zur Innenraumluft

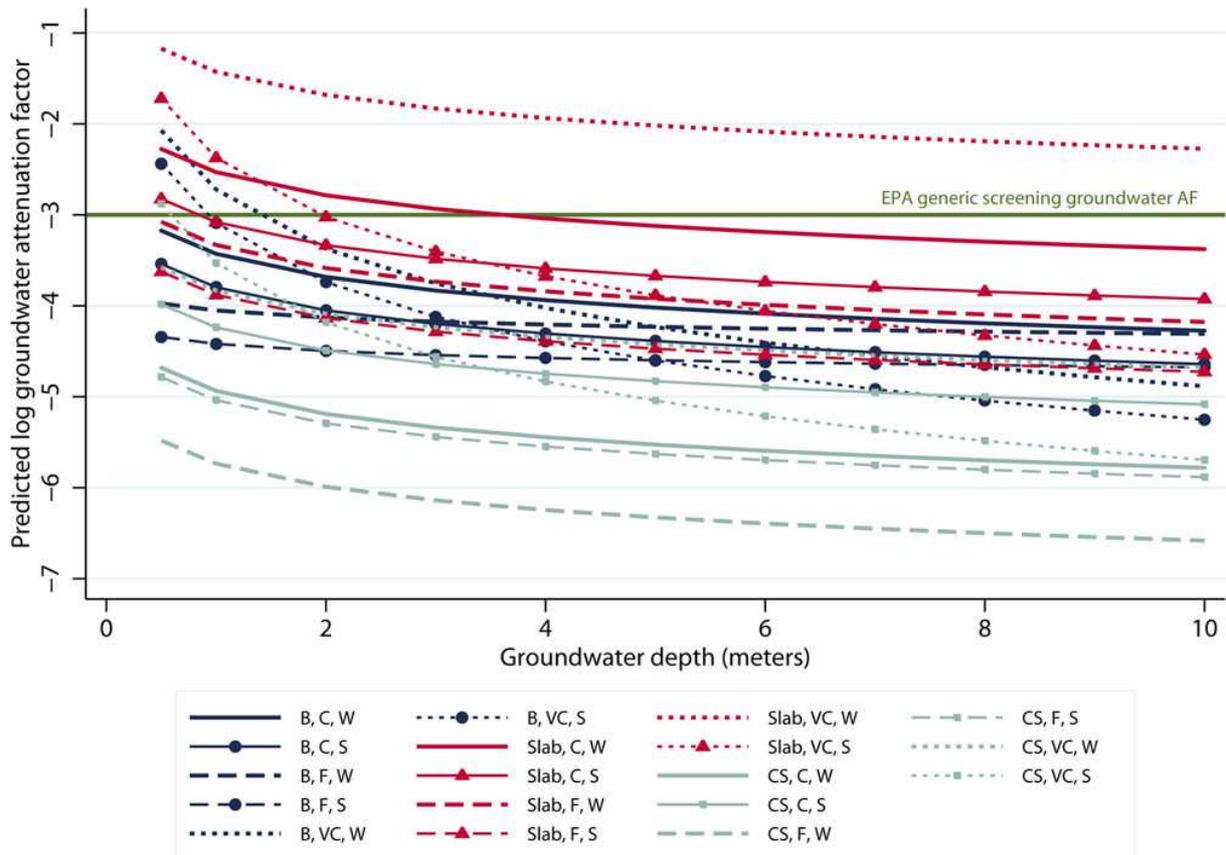
TF_{Bl} : Transferfaktor von der Bodenluft zur Innenraumluft

TF_{Sp} : Transferfaktor von der Bodenluft unmittelbar unterhalb der Sohlplatte zur Innenraumluft

*) zitiert nach PROVOOST et al. (2009)

**) für Radon, Im Mittel ca. 500, 90%-Perzentil ca. 110

Tab. 4: Transferfaktoren für den Übergang von der Bodenluft in die Innenraumluft



B: unterkellertes Gebäude
 Slab: nicht unterkellertes Gebäude
 CS: Gebäude mit Kriechkeller
 C: grobkörniger Boden
 F: feinkörniger Boden
 VC: sehr grobkörniger Boden
 W: Winter
 S: Sommer

Bild 11: Differenzierte Transferfaktoren $1/TF_{GW}$ für Tetrachlorethen nach Daten der U.S. EPA (JOHNSTON & MACDONALD GIBSON, 2013)

In Gewerbegebäuden liegen die Luftwechselraten und damit die Transferfaktoren regelmäßig höher als bei Wohngebäuden. Dasselbe gilt für Tiefgaragen im Kellerschoss von Wohngebäuden (VDI, 2014).

3.6 Weitere Schätzgrößen

Die in Abschn. 3.5 dargestellten Transferfaktoren gelten für nicht abbaubare Schadstoffe. Für abbaubare Schadstoffe, insbesondere Mineralölkohlenwasserstoffe (LMKW) einschließlich Aromaten (BTEX), sind sie unzulässig konservativ. In der sauerstoffhaltigen Bodenluft werden diese Stoffe abgebaut. Da der Transport überwiegend diffusiv, d. h. sehr langsam, erfolgt, reicht die Aufenthaltszeit regelmäßig zu einem weitgehenden Abbau vor Erreichen eines Gebäudes (Bild 2).

U.S. EPA (2015) gibt daher Erfahrungswerte für die minimalen Abstände zwischen kontaminiertem Material und dem Gebäude an, bei denen keine relevante Beeinträchtigung der Innenraumluft zu erwarten ist. Diese betragen für kontaminiertes Grundwasser (Benzol unter 5 mg/l, MKW unter 30 mg/l) ca. 1,8 m und für Schwimmphase bzw. Restsättigung im Kapillarsaum ca. 4,5 m (Bild 12).

Diese Angaben gelten nicht für:

- Großschäden (z. B. Raffinerien)
- große Gebäude mit einer Breite von mehr als 20 m
- Vergaserkraftstoffe mit hohem Ethanolgehalt (> E-20)
- Vergaserkraftstoffe mit relevanten schlechter abbaubaren Additiven, insbesondere 1,2-Dichlorethan und / oder 1,2-Dibromethan

Die maximale Gebäudegröße ergibt sich aus der Notwendigkeit einer ausreichenden Sauerstoffversorgung für den aeroben Abbau der LMKW (Bild 2). DEQ (2013) geben konservativ eine maximale Größe von 15 m an. WRIGHT (2013) enthält Nomogramme zur Abschätzung der maximal zulässigen Größe der Überbauung in Abhängigkeit von den Schadstoffkonzentrationen und dem Grundwasserflurabstand.

Die Prüfwerte für 1,2-Dichlorethan und 1,2-Dibromethan für das Grundwasser liegen nach der toxikologischen Einschätzung der U.S. EPA (Tab. 1) und einem Transferfaktor von 1.000 bei 2,2 bzw. 0,18 µg/l (U.S. EPA, 2015). Diese niedrigen Prüfwerte bedingen eine Relevanz trotz der geringen Konzentrationen dieser Stoffe im Vergaserkraftstoff (MA et al., 2016). In verbleiten Vergaserkraftstoffen war 1,2-Dibromethan mit rund 70 mg/l enthalten (BUA, 1992).. Ebenfalls relevant sind MTBE und andere synthetische Kraftstoffzusätze (U.S. EPA, 2015). Beim Vorliegen dieser Stoffe sind die oben angegebenen Abstände nicht in jedem Fall ausreichend (MA et al., 2017).

In die Gefährdungsabschätzung einzubeziehen sind nicht nur Grundstücke bzw. Gebäude im unmittelbaren Bereich einer Verunreinigung, sondern auch solche in ihrer Nähe. Als Erfahrungswerte werden aus New Jersey horizontale und vertikale Abstände zum Gebäude von 30 m für „nicht“ abbaubare Stoffe und 9 m für abbaubare LMKW genannt (NJDEP, 2016). Überschreiten die Abstände diese Werte, ist im Regelfall keine weitere Bearbeitung vorgesehen.

Ein genereller Ausschluss von Verunreinigungen nach dem Kriterium für nicht abbaubare Stoffe muss kritisch gesehen werden. Zwar erfolgt bei der Diffusion im Boden über eine längere Strecke eine Reduktion der Konzentration, aber gegenüber dem Standardmodell (Abschn. 4.1) ergibt sich für einen homogenen sandigen Boden rechnerisch im stationären Fall nur eine Minderung der Gefährdung um einen Faktor von ca. 2. Geht die Gefährdung von kontaminiertem Grundwasser aus, ist jedoch die diffusionsbegrenzte Nachlieferung von Schadstoffen zu bedenken,

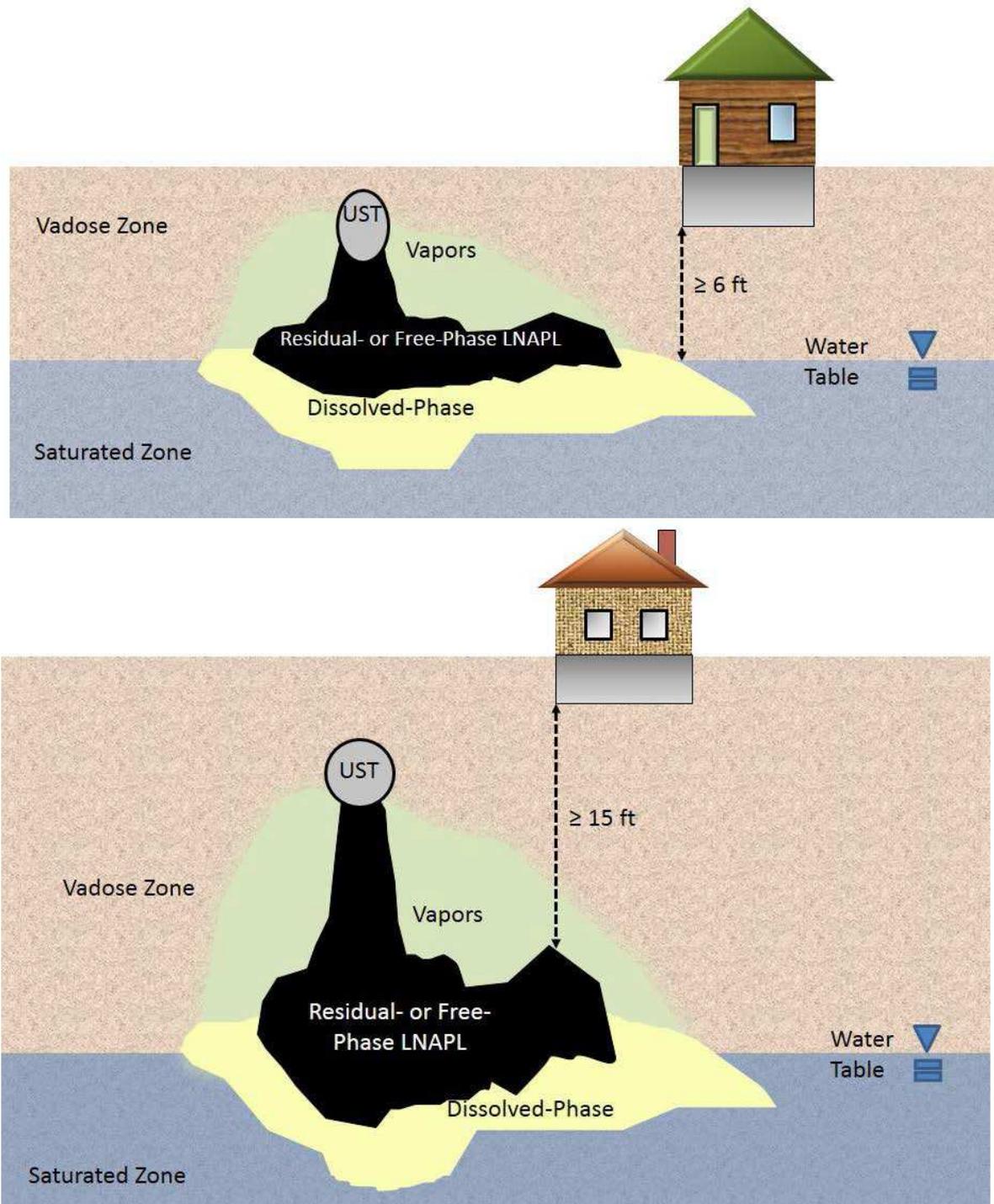


Bild 12: Minimale Abstände eines Gebäudes zu kontaminiertem Grundwasser (oben) und organischer Schwimmphase (unten), bei der im Regelfall keine relevante Gefährdung der Innenraumlufth zu erwarten ist (U.S. EPA, 2015)

3.7 Probenahme und Messtechnik

Für die Gefährdungsabschätzung ist eine repräsentative Festlegung der maximal zu erwartenden Schadstoffkonzentrationen in den betroffenen Medien erforderlich.

Für die Gefährdung aus einer Grundwasserverunreinigung sind Konzentrationsdaten aus dem **Grundwasser** am freien Wasserspiegel zu gewinnen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass auf Grund des großen Diffusionswiderstands des Wassers bei einer Freisetzung leicht flüchtiger Stoffe in die Bodenluft die Konzentrationen im Bereich des freien Wasserspiegels niedriger liegen als im tieferen Wasserkörper (vgl. Abschn. 3.3.1). Es besteht auch in Abhängigkeit von den Standortgegebenheiten die Möglichkeit, dass durch Grundwasserneubildung zwischen Schadstoffeintrag und betrachtetem Grundstück das kontaminierte Wasser durch unbelastetes Wasser, das eine Diffusionssperre darstellt, überlagert wird (MCHUGH et al., 2017). Eine schadstofffreie Wasserschicht von 1 m gilt als wirksame Diffusionssperre, soweit diese dauerhaft, d. h. unabhängig von jahreszeitlichen Wasserspiegelschwankungen, vorhanden ist (NJDEP, 2016). Das in Hamburg gängige Verfahren der tiefenorientierten Grundwasserprobenahme mit Direct-Push-Sondierungen (Sondierungen mit horizontaler Wasserprobenahme = SHW) mit Verwendung einer Trägheitspumpe (Fußventilpumpe) erfordert einen Wasserüberstand des Filters von mindestens einigen Dezimetern. In der Praxis werden die Proben meistens bei mehr als 1 m unter Grundwasserspiegel entnommen. Diese Proben sind zur Bewertung einer Gefährdung durch die Bodenluft nur als Anhalt zu verwenden. Die Gewinnung von Porenwasserproben aus dem Bereich des freien Wasserspiegels bzw. des Kapillarsaums kann als Kernproben erfolgen.

Die Entnahme von Proben der **Bodenluft** sollte im Bereich der Schadstofffreisetzung (kontaminierter Boden, Grundwasseroberfläche) erfolgen. Oberflächennahe Proben können nicht repräsentative Ergebnisse liefern, da die spätere Überbauung die Strömungs- und Diffusionsverhältnisse im Boden verändert.

Zur Kontrolle der effektiven Transferfaktoren, insbesondere nach baulichen Sondermaßnahmen (Abschn. 4.3), können ergänzende Messungen an fertiggestellten Gebäuden erforderlich sein. Da eine kontinuierliche Aufzeichnung von Schadstoffkonzentrationen sehr aufwändig ist (Bild 6), kann nach Prüfung der örtlichen Verhältnisse auch eine Messung der Radonkonzentrationen in der **Innenraumluf**t unter Berücksichtigung weiterer Faktoren wesentliche Erkenntnisse bringen (MCHUGH et al., 2008). Zur Prüfung auf Undichtigkeiten ist auch die Einstellung kontrollierter Druckverhältnisse geeignet (MCHUGH et al., 2012).

4. Bewertung

4.1 Bewertungsmodell

Das Bewertungsmodell geht von einer ortsüblichen Wohnbebauung mit vollflächiger Unterkellerung aus. Bei einer Neubebauung im Bereich einer Boden- bzw. Grundwasserunreinigung wird von einer angemessenen bautechnischen Vorsorge gegen das Eindringen von gasförmigen Schadstoffen ausgegangen. Hinweise hierzu gibt FHH BUE (2016):

- gasdichte Leitungsdurchführungen im Bereich des Kellergeschosses
- passive Gasdrainage unter der Sohlplatte und um das Gebäude mit freiem Austritt zur Atmosphäre
- Durchbrüche in Fundamentstreifen im Bereich der Gasdrainage

Darüber hinaus ist eine Ausführung des Kellergeschosses als „weiße Wanne“ (z. B. LOHMEYER & EBELING, 2008) als Regelfall anzusehen:

- wasserundurchlässiger, porenarmer Beton mit Wasserzementwert $w/z \leq 0,45$ (Abschn. 3.3.6)
- keine offenen Fugen
- Minimierung der Rissbildung durch angemessene Bewehrung
- keine Fallleitungen zum Abwassersystem ohne Gasfallen (Siphons) (Abschn. 3.3.4)
- gasdichte Abwasserleitungen (Abschn. 3.3.4)

Damit ist der Eintritt von Schadstoffen in das Gebäude als das Eindringen kontaminierter Bodenluft in das Gebäude durch massive Bauteile gemäß Abschn. 3.3.6 zu beschreiben. Dieser Eintritt kann als eindimensionales Strömungs- und Diffusionsmodell nach den Gleichungen (6) bis (9) (Abschn. 3.3.6) berechnet werden.

Für die Parametrisierung des Modells werden folgende Ansätze getroffen:

Diffusionskoeffizient $D_{DG} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (Bild 8; MUSIELAK, 2012)

Wirksame Konzentrationsdifferenz $\Delta C_G = C_G$

Dicke der Sohlplatte bzw. der Kellerwand $L = 0,2 \text{ m}$ bzw. $\Delta x = 0,2 \text{ m}$

intrinsische Permeabilität $K = 1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (Bild 8; vgl. HERMANN, 2000)

Druckdifferenz $\Delta p = 10 \text{ Pa}$

Durchtrittsfläche $F = 1 \text{ m}^2$

Raumhöhe $h = 2,5 \text{ m}$

Luftwechselzahl $\lambda = 7 / d$

Die Berechnungen erfolgen jeweils nur für die Sohlplatte. Für die Wandflächen können entsprechende Zuschläge angebracht werden (Tab. 5).

Länge [m]	Breite [m]	Grundfläche [m ²]	Wandfläche [m ²]	Korrekturfaktor [-]
7	7	49	70	2,43
10	6	60	80	2,33
25	9	225	170	1,76
50	12	600	310	1,52

Tab. 5: Korrekturfaktoren für die Berechnungen bei unterschiedlichen Gebäudemaßen

Damit ergibt sich mit einer zulässigen Maximalkonzentration in der Innenraumluft $c_{IL\max}$ aus den Gleichungen (6), (9a) und (12) sowie der Massenkontinuität für die maximale Bodenluftkonzentration $c_{G\max}$:

$$\lambda * h * F * c_{IL\max} = D_{DG} * \frac{c_{G\max}}{\Delta x} * F + K * \frac{\Delta p}{\mu_G * \Delta x} * F * c_{G\max} = \left(D_{DG} + K * \frac{\Delta p}{\mu_G} \right) * \frac{F}{\Delta x} * c_{G\max} \quad (14)$$

und

$$c_{G\max} = \frac{\lambda * h * \Delta x}{\left(D_{DG} + K * \frac{\Delta p}{\mu_G} \right)} * c_{IL\max} = TF_{Sp} * c_{IL\max} \quad (14a)$$

und daher

$$TF_{Sp} = \frac{\lambda * h * \Delta x}{\left(D_{DG} + K * \frac{\Delta p}{\mu_G} \right)} \quad (14b)$$

Mit den oben aufgeführten Parametern ergibt sich der Transferfaktor

$$TF_{Sp} = \frac{\lambda * h * \Delta x}{\left(D_{DG} + K * \frac{\Delta p}{\mu_G} \right)} = \frac{\frac{7}{86400s} * 2,5m * 0,2m}{\left(1 * 10^{-8} m^2/s + 1 * 10^{-17} m^2 * \frac{10Pa}{17,7 * 10^{-6} Pa * s} \right)}$$

$$TF_{Sp} = \frac{4,05 * 10^{-5} m^2/s}{\left(1 * 10^{-8} m^2/s + 5,65 * 10^{-12} m^2/s \right)} = 4050$$

Bei der angesetzten Parametrisierung ist der Beitrag der Durchströmung zu vernachlässigen. Dies bestätigt die Modellrechnungen von MUSIELAK et al. (2010). Erst bei Permeabilitäten oberhalb $1 * 10^{-14} m^2$ ergäben sich relevante Beiträge des Strömungstransports. Es handelt sich damit um einen rein diffusiven Prozess. Der Transferfaktor liegt auch unter Berücksichtigung der Abminderungsfaktoren für kleine Gebäude (Tab. 5) über 1000.

Für nicht bindige Böden ist der Diffusionskoeffizient in der Bodenluft wesentlich (ca. 2 Zehnerpotenzen) höher als in der Sohlplatte. Daher wird für die Berechnungen in den folgenden Abschnitten angesetzt:

$$TF_{Gw} = TF_{Sp} = 1.000$$

4.2 Prüfwerte für Bodenluft und Grundwasser

Mit einem Transferfaktor $TF_{GW} = 1.000$ ergeben sich für die Bodenluft im Kontakt zum Grundwasser und die Gleichgewichtskonzentration im Grundwasser, sowie für Grundwasser im Direktkontakt zur Sohlplatte gemäß Gleichung (11) die Prüfwerte gemäß Tab. 6. Hierbei sind aber die Ausführungen in Abschn. 3.6 zu berücksichtigen. Zum Vergleich sind die Orientierungswerte für die Bodenluft nach ALA/LABO (2008) aufgeführt.

	Regelwerk	Status	Vergleichswert Innenraumluft [mg/m³]	Prüfwert Bodenluft [mg/m³]	Orientierungswert Bodenluft LABO [mg/m³]	Henry- Konstante bei 10 °C [-]	Prüfwert Grundwasser [mg/m³] = [µg/l]	Prüfwert Grundwasser Direktkontakt *) [mg/m³] = [µg/l]
Alkane								
n-Pentan	USEPA	Prüfwert	1,0	1.000	-	2,89E+01	35	57.803
n-Hexan	USEPA	Prüfwert	0,73	730	-	1,94E+01	38	42.197
n-Nonan	USEPA	Prüfwert	0,021	21	-	1,96E+01	1,1	1.214
Cyclohexan	USEPA	Prüfwert	6,3	6.300	-	3,47E+00	1.814	364.162
C9 - C14-Alkane / Isoalkane (aromatenarm)	UBA IRK	RW I	0,2	200	-	-	-	11.561
einkernige Aromaten								
Benzol	Blmsch	Grenzwert	0,005	5	10	1,11E-01	45	289
Toluol	UBA IRK	RW I	0,3	300	1.000	1,31E-01	2.290	17.341
Ethylbenzol	UBA IRK	RW I	0,2	200	200	1,21E-01	1.650	11.561
Summe Xylole	UBA IRK	RW I	0,1	100	1.000	1,02E-01	977	5.780
Styrol	UBA IRK	RW I	0,03	30	100	4,79E-02	626	1.734
1,2,3-Trimethylbenzol	USEPA	Prüfwert	0,0052	5,2	-	-	-	301
1,2,4-Trimethylbenzol	USEPA	Prüfwert	0,0073	7,3	-	1,19E-01	61	422
Propylbenzol	USEPA	Prüfwert	1,0	1.000	-	2,22E-01	4.497	57.803
Cumul	USEPA	Prüfwert	0,42	420	-	2,66E-01	1.578	24.277
Alkylbenzole, C9-C15	UBA IRK	RW I	0,1	100	-	-	-	5.780
PAK								
Naphthalin	WHO	Richtwert	0,01	10	10	9,49E-03	1.054	578
Naphthalin und Naphthalin- ähnliche Verbindungen	UBA IRK	RW I	0,01	10	-	-	-	578
Chloraromaten								
Chlorbenzol	USEPA	Prüfwert	0,052	52	1.000	6,03E-02	863	3.006
1,2-Dichlorbenzol	USEPA	Prüfwert	0,21	210	1.000	3,17E-02	6.622	12.139
1,4-Dichlorbenzol	USEPA	Prüfwert	0,00026	0,26	1.000	3,27E-02	8,0	15
1,2,4-Trichlorbenzol	USEPA	Prüfwert	0,0021	2,1	70	2,85E-02	74	121
Phenole								
Phenol	UBA IRK	RW I	0,02	20	200	5,58E-06	3.584.229	1.156
Kresole	UBA IRK	RW I	0,005	5,0	-	-	-	289
LHKW								
Dichlormethan	UBA IRK	RW I	0,2	200	80	5,97E-02	3.349	11.561
Trichlormethan (Chloroform)	USEPA	Prüfwert	0,00012	0,12	2,0	6,39E-02	1,9	6,9
Tetrachlormethan	USEPA	Prüfwert	0,00047	0,47	3,0	5,16E-01	0,9	27
Dichlordifluormethan (Freon 12)	USEPA	Prüfwert	0,1	100	-	1,14E+01	8,8	5.780
Trichlorfluormethan (Freon 11)	USEPA	Prüfwert	0,73	730	-	2,09E+00	349	42.197
1,1-Dichlorethan	USEPA	Prüfwert	0,0018	1,8	-	-	-	104
1,2-Dichlorethan	USEPA	Prüfwert	0,00011	0,11	-	2,41E-02	4,6	6,4
1,1,1-Trichlorethan	USEPA	Prüfwert	5,2	5.200	1.000	3,84E-01	13.533	300.578
1,1,2-Trichlorethan	USEPA	Prüfwert	0,00018	0,18	-	-	-	10
1,2-Dibromethan	USEPA	Prüfwert	0,0000047	0,0047	-	1,10E-02	0,43	0,27
1,1,1,2-Tetrafluorethan	USEPA	Prüfwert	83	83.000	-	4,37E-02	1.900.114	4.797.688
1,1,2-Trichlor-1,2,2-trifluorethan	USEPA	Prüfwert	31	31.000	-	-	-	1.791.908
Chlorethen (Vinylchlorid)	WHO	Richtwert	0,001	1,0	4,0	6,67E-01	1,5	58
1,1-Dichlorethen	USEPA	Prüfwert	0,21	210	-	-	-	12.139
cis-1,2-Dichlorethen	FHH BGV	RW I	0,04	40	900	8,19E-02	488	2.312
Trichlorethen	UBA IRK	RW I	0,02	20	20	1,72E-01	117	1.156
Tetrachlorethen	Blmsch	Maßnahmenwert	0,1	100	70	2,98E-01	336	5.780
Sonstige								
1,4-Dioxan	USEPA	Prüfwert	0,00056	0,56	-	2,10E-04	2.661	32
MTBE	USEPA	Prüfwert	0,0094	9,4	-	6,11E-03	1.539	543

*) Grundwasser tritt durch die Sohlplatte
fett: Vergleichswerte nach deutschem Recht

Tab. 6: Prüfwerte für Bodenluft und Grundwasser

4.3 Bauliche Sondermaßnahmen

Die Standardanforderungen an die Bauweise auf einem Grundstück mit der Gefahr des Eintritts von kontaminierter Bodenluft in die Kellerräume ist in Abschn. 4.1 dargestellt. Überschreiten die Messwerte in der Bodenluft oder im Grundwasser die Prüfwerte nach Abschn. 4.2, so ist eine Bebauung auch mit Wohnhäusern möglich, soweit zusätzliche Maßnahmen zur Sicherung des Gebäudes gegen die Verunreinigung getroffen werden. Verschiedene Maßnahmen sind in BMUNR / BfS (2001) dargestellt.

Für den Schutz vor organischen Verunreinigungen sind insbesondere folgende Maßnahmen geeignet:

- passive Sicherung durch Dichtungsbahnen unterhalb der Sohlplatte bzw. an der Außenwand
- passive Sicherung durch Dichtungsbahnen innerhalb des Gebäudes
- aktive Sicherung durch Einstellung eines Überdrucks im Gebäude
- aktive Sicherung durch aktive Gasdrainage unterhalb der Sohlplatte

Bituminöse Dichtungsbahnen reduzieren Strömungen von Gasen und Flüssigkeiten. Ihre Wirkung gegenüber der Diffusion organischer Spurenstoffe ist nicht hinreichend geklärt (DE BIASE et al., 2014).

Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen, insbesondere PE-HD, sind geeignet, Strömungen von Gasen und Flüssigkeiten zu unterbinden. Sie bieten nur begrenzten Schutz gegen die Diffusion von organischen Schadstoffen. Einen zusätzlichen Schutz gegen Diffusion bieten nur Verbundmaterialien. In den letzten 10 Jahren sind insbesondere Foliensysteme mit einer Diffusionssperlage aus Ethyl-Vinyl-Alkohol (EVOH) (z. B. WILSON et al., 2014) erprobt worden. Diese Materialien sind aber noch nicht markt-gängig.

Eine Sicherung innerhalb des Gebäudes ist mit mehrlagigen Folien, die als Dampfsperren primär gegen Wasserdampf am Markt angeboten werden, möglich. Als Diffusionssperre wird hier eine Aluminiumfolie verwendet. Die Materialien werden in unterschiedlichen Qualitäten geliefert und eignen sich zum Teil auch zum Einbau unter Estrich. Eine Sicherung ist damit ggf. auch nachträglich, z. B. bei Festlegung neuer Richtwerte, möglich.

Die aktive Sicherung durch Überdruck ist nur sinnvoll, wenn die Besorgnis von strömungsbedingtem Schadstoffeintragen gegeben ist. Bei aktiv be-/entlüfteten Kellergeschossen, insbesondere Tiefgaragen, erfordert eine derartige Lösung eine spezielle Planung der Abluffführung.

Die ohnehin vorgesehene passive Gasdrainage (Abschn. 4.1) kann mit Drainageleitungen zur aktiven Absaugung von Bodenluft ausgestattet werden. Derartige Systeme können bedarfsweise in Betrieb genommen werden.

Unter Gesichtspunkten der Vorsorge, der Betriebssicherheit und der Energieeffizienz sollte eine verstärkte Lüftung des Gebäudes zur Konzentrationsreduktion (Verdünnung) nur als vorübergehende Maßnahme in Betracht gezogen werden.

5. Empfehlungen für eine Arbeitshilfe

Eine Arbeitshilfe zur Bewertung von Boden- und Grundwasserkontaminationen im Bereich einer Baumaßnahme muss Angaben zu folgenden Fragestellungen enthalten:

- erforderliche Daten zu den geologischen und hydrologischen Verhältnissen;
- erforderliche Angaben zu relevanten Schadstoffen;
- erforderliche Daten zur räumlichen Verteilung der Schadstoffe, insbesondere zur Tiefenverteilung im Grundwasserkörper;
- Bewertungsmaßstäbe (Richtwerte der Innenraumluftkonzentration);
- Algorithmen zur Gefährdungsabschätzung;
- Entscheidungsoptionen.

In diesem Zusammenhang ist es zu empfehlen, Vorgehensweisen festzulegen für die Behandlung von Stoffen, für die bisher keine deutschen Richtwerte für die Innenraumluft vorliegen, sowie von Gebäuden, die nicht dem ständigen Aufenthalt von Personen dienen (gewerbliche und industrielle Bauten).

6. Zusammenfassung

Veranlassung: Im Stadtgebiet der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH) sind zahlreiche Verunreinigungen des Bodens, des Grundwassers und der Bodenluft durch leicht flüchtige Schadstoffe vorhanden. Bislang wurden Gefährdungen über die Innenraumluft im Einzelfall geprüft. Es soll eine Arbeitshilfe entwickelt werden, die eine Abschätzung der Gefährdung im Rahmen der Bauantragsbearbeitung ermöglicht.

Durchführung: Es wurde eine Literaturrecherche in Datenbanken, Bibliothekskatalogen und im Internet durchgeführt. Die Auswertung der Literatur geht von jüngeren und zusammenfassenden Darstellungen aus. Ältere Literatur (vor 2000) wurde nur fallweise hinzugezogen.

Ergebnisse: Es werden die generellen Wege kontaminierter Bodenluft in Gebäude festgestellt und die unterliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten dargestellt.

Bewertung: Es wird eine angepasste Bauweise vorgeschlagen, die das Eindringen von Schadstoffen auf diffusiven Transport reduziert. Für die Bewertung wird auf dieser Grundlage der Transferfaktor von Bodenluft zu Innenraumluft der LABO mit $TF = 1000$ bestätigt. Es werden daraus Prüfwerte für Bodenluft und Grundwasser abgeleitet.

Empfehlungen für eine Arbeitshilfe: Es werden wesentliche Fragestellungen benannt, die im Rahmen einer Arbeitshilfe bearbeitet werden müssen.

aufgestellt: Christian A. Gillbricht, 13.07.2017

7. Literatur

- ABREU, L.D.V.; ETTINGER, R. & MCALARY, T. (2009): Simulated soil vapor intrusion attenuation factors including biodegradation for petroleum hydrocarbons.- Ground water monitoring and remediation, 29(1): 105 - 117; Westerville, OH [DOI: 10.1111/j.1745-6592.2008.01219.x]
- ALA/LABO (Ständiger Ausschuss Altlasten der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (Hrsg.) (2008): Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten - Informationsblatt für den Vollzug.- ALA/LABO: 15 S.; Berlin [http://www.labo-deutschland.de/documents/34_Infoblatt_Altlasten_01092008_e69_34f.pdf (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- ALAVES, V.M.; SLEETH, D.K.; THIESE, M.S. & LARSON, R.R. (2013): Characterization of indoor air contaminants in a randomly selected set of commercial nail salons in Salt Lake County, Utah, USA.- International journal of environmental health research, 23: 419 - 433; London [DOI: 10.1080/09603123.2012.755152]
- BECKLEY, L.; MCHUGH, T.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E. & RIVERA-DUARTE, I. (2013): Use of on-site GC/MS analysis to distinguish between vapor intrusion and indoor sources of VOCs.- ESTCP Final report: VIII + 78 S.; Arlington, VA [<https://clu-in.org/download/issues/vi/VI-ER-201119-FR.pdf> (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- BMUNR / BFS (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Bundesamt für Strahlenschutz) (Hrsg.) (2001): Radon-Handbuch Deutschland.- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Loseblattsammlung; Bonn / Salzgitter [<http://www.radonschutz.eu/images/pdf/download-07.pdf> (letzter Abruf: 08.05.2017)]
- BREWER, R.; NAGASHIMA, J.; RIGBY, M.; SCHMIDT, M. & O'NEILL, H. (2014): Estimation of generic subsurface attenuation factors for vapor intrusion investigations.- Ground water monitoring and remediation, 34(4): 79 - 92; Westerville, OH [DOI: 10.1111/gwmr.12086]
- BUA (Beratergremium für umweltrelevante Altstoffe) (Hrsg.) (1992): 1,2-Dibromethan.- BUA-Stoffbericht, 66: XXIV + 304; Weinheim [ISBN: 3-527-28502-4]
- CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (Ed.) (2011): Guidance for the evaluation and mitigation of subsurface vapor intrusion to indoor air (vapor intrusion guidance).- California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control: IX + 47 S.; Sacramento, CA [http://www.dtsc.ca.gov/AssessingRisk/upload/Final_VIG_Oct_2011.pdf (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- CITYCHLOR (ed.) (2013): Attenuation of the vinyl chloride in the vadose zone.- Rijkswaterstaat Environment: 37 S.; Utrecht [http://rwsenvironment.eu/publish/pages/97222/attenuation_of_the_vinyl_chloride_in_the_vadose_zone.pdf (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- DAU, U. & BOCHERT, U. (2015): Realitätsnahe Abschätzung der Mobilität leichtflüchtiger Stoffe in Böden - Neues Untersuchungsverfahren kann die etablierten Verfahren sinnvoll ergänzen.- Altlasten Spektrum, 24: 182 - 186; Berlin

- DBV (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.) (Hrsg.) (2009): Merkblatt Hochwertige Nutzung von Untergeschossen - Bauphysik und Raumklima.- DBV: 60 S.; Berlin
- DE BIASE, C.; LOECHEL, S.; PUTZMANN, T.; BITTENS, M.; WEISS, H. & DAUS, B. (2014): Volatile organic compounds effective diffusion coefficients and fluxes estimation through two types of construction material.- *Indoor air*, 24: 272 - 282; Oxford [DOI: 10.1111/ina.12077]
- DEQ (Michigan Department of Environmental Quality) (ed.) (2013): Guidance document for the vapor intrusion pathway.- Michigan Department of Environmental Quality; Lansing, MI [www: https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-rrd-VIGuidanceDoc-May2013_422550_7.pdf (letzter Abruf: 08.05.2017)]
- DOUCETTE, W.J.; HALL, A.J. & GORDER, K.A. (2010): Emissions of 1,2-dichloroethane from holiday decorations as a source of indoor air contamination.- *Ground water monitoring and remediation*, 30(1): 67 - 73; Westerville, OH [DOI: 10.1111/j.1745-6592.2009.01267.x]
- ENVIRONMENT AGENCY (ed.) (2002): The Contaminated Land Exposure Assessment model (CLEA): Technical basis and algorithms.- R & D Publication, CLR10: 124 S.; Bristol [ISBN: 1-857-05749-X]
- EVANS, D.; HERS, I.; WOLTERS, R.B., BODDINGTON, R.T.B. & HALL, D.H. (2002): Vapour transfer of soil contaminants.- Environment Agency: V + 70 S.; Bristol [ISBN: 1-85705-151-3]
- FERGUSON, C.C.; KRYLOV, V.V. & MCGRATH, P.T. (1995): Contamination of indoor air by toxic soil vapours: A screening risk assessment model.- *Building and environment*, 30: 375 - 383; Oxford [DOI: 10.1016/0360-1323(95)00005-Q]
- FHH BSGV (FHH Behörde für Soziales, Familie, Gesundheit und Verbraucherschutz) (Hrsg.) (2006): Richtwerte für die Innenraumluft.- Behörde für Soziales, Familie, Gesundheit und Verbraucherschutz: 4 S.; Hamburg [http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2009/3123/ (letzter Abruf: 08.05.2017)]
- FHH BUE (Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Umwelt und Energie) (Hrsg.) (2016): Methan aus Weichschichten.- FHH BUE: 16 S.; Hamburg [www: <http://www.hamburg.de/contentblob/2854392/3dd0704054aa0ddd3315e3be0c754d9e/data/bodenluftbelastung-broschuere.pdf> (letzter Abruf: 08.05.2017)]
- FITZPATRICK, N.A. & FITZGERALD, J.J. (2002): An evaluation of vapor intrusion into buildings through a study of field data.- *Soil and sediment contamination*, 11: 603 - 623; London [DOI: 10.1080/20025891107186]
- FOLKES, D.J.; KURTZ, J.P. & WANNAMAKER, E.J. (2010): Vapor intrusion attenuation factors based on long term monitoring data.- *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy*, 12: 370 - 382; Red Hook, NY [ISBN: 978-1-60423-951-5]

- GRATHWOHL, P. (2000): Elemente der Sickerwasserprognose zur Gefahrenbeurteilung "Grundwasser" bei kontaminierten Böden/Materialien/Altlasten.- Handbuch Bodenschutz, 3360: 1 - 40; Berlin [ISBN: 3-503-02718-1]
- HERMANN, K. (2000): Gaspermeabilität von Betonen.- Cement-Bulletin, 68(11): 3 – 7; Wildegg [<http://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=cem-001:2000:69::80#80>] (letzter Abruf: 08.05.2017)]
- HERS, I.& TRUESDALE, R.S. (2013): Evaluation of empirical data to support soil vapor intrusion screening criteria for petroleum hydrocarbon compounds.- EPA: XIV + 5 + 72 S.; Washington, D.C.
[https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryID=247697] (letzter Abruf: 08.05.2017)]
- HOSANGADI, V.; SHAVER, B.; HARTMAN, B.; POUND, M.; KRAM, M.L. & FRESCURA, C. (2017): High-frequency continuous monitoring to track vapor intrusion resulting from naturally occurring pressure dynamics.- Remediation, 27(2): 9 - 25; New York [DOI: 10.1002/rem.21505]
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council, Geophysical Classification for Munitions Response Team) (Ed.) (2014): Petroleum vapor intrusion: fundamentals of screening, investigation, and management.- ITRC: XI + 105 S.; Washington, D.C.
[<http://www.itrcweb.org/PetroleumVI-Guidance/Content/Resources/PVIPDF.pdf>] (letzter Abruf: 08.05.2017)]
- JOHNSON, P.C. & ETTINGER, R.A. (1991): Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors in buildings.- Environmental science and technology, 25: 1445 - 1452; Easton, PA [DOI: 10.1021/es00020a013]
- JOHNSON, P.C.; ETTINGER, R.A.; KURTZ, J.P.; BRYAN, R. & KESTER, J.E. (2009): Empirical assessment of ground water-to-indoor air attenuation factors for the CDOT-MTL Denver site.- Ground water monitoring and remediation, 29(1): 153 - 159; Westerville, OH [DOI: 10.1111/j.1745-6592.2008.01224.x]
- KEMSKI, J.; KLINGEL, R.; SIEHL, A.; STEGEMANN, R. & VALDIVIA-MANCHEGO, M. (2002): Transferfunktion für die Radonkonzentration in der Bodenluft und der Wohnraumluf.- Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, 598: 206 S.; Köln
- KURTZ, J.P.; WOLFE, E.M.; WOODLAND, A.K. & FOSTER, S.J. (2010): Evidence for increasing indoor sources of 1,2-dichloroethane since 2004 at two Colorado residential vapor intrusion sites.- Ground water monitoring and remediation, 30(3): 107 - 112; Westerville, OH [DOI: 10.1111/j.1745-6592.2010.01296.x]
- JOHNSON, P.C. & ETTINGER, R.A. (1991): Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors in buildings.- Environmental science and technology, 25: 1445 - 1452; Easton, PA [DOI: 10.1021/es00020a013]
- JOHNSTON, J.E. & MACDONALD GIBSON, J. (2013): Screening houses for vapor intrusion risks: a multiple regression analysis approach.- Environmental science and technology, 47: 5595 - 5602; Easton, PA [DOI: 10.1021/es4003795]

- LANGGUTH, H.-R. & VOIGT, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. 2. Auflage.- Springer: XIV + 1005 S.; Berlin [ISBN: 3-540-21126-8]
- LOHMEYER, G. & EBELING, K. (2008): Weiße Wannen einfach und sicher. 8. Auflage.- Bau und Technik (Edition Beton): 391 S.; Düsseldorf [ISBN: 978-3-7640-0487-3]
- MA, J.; LI, H.; SPIESE, R.; WILSON, J.; YAN, G. & GUO, S. (2016): Vapor intrusion risk of lead scavengers 1,2-dibromoethane (EDB) and 1,2-dichloroethane (DCA).- Environmental pollution, 213: 825 - 832; Barking, Essex [DOI: 10.1016/j.envpol.2016.03.032]
- MA, J.; XIONG, D.; LI, H.; DING, Y.; XIA, X. & YANG, Y. (2017): Vapor intrusion risk of fuel ether oxygenates methyl tert-butyl ether (MTBE), tert-amyl methyl ether (TAME) and ethyl tert-butyl ether (ETBE): A modeling study.- Journal of hazardous materials, 332: 10 - 18; Amsterdam [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.057]
- MCHUGH, T.E.; DE BLANC, P.C. & POKLUDA, R.J. (2006): Indoor air as a source of VOC contamination in shallow soils below buildings.- Soil and sediment contamination, 15: 103 - 122; London [DOI: 10.1080/15320380500364473]
- MCHUGH, T.E.; HAMMOND, D.E.; NICKELS, T. & HARTMAN, B. (2008): Use of radon measurements for evaluation of volatile organic compound (VOC) vapor intrusion.- Environmental forensics, 2: 107 - 114; Orlando, FL [DOI: 10.1080/15275920801888491]
- MCHUGH, T.E.; BECKLEY, L.; BAILEY, D.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E.; RIVERA-DUARTE, I.; BROCK, S. & MACGREGOR, I.C. (2012): Evaluation of vapor intrusion using controlled building pressure.- Environmental science and technology, 46: 4792 - 4799; Easton, PA [DOI: 10.1021/es204483g]
- MCHUGH, T.; LOLL, P. & EKLUND, B. (2017): Recent advances in vapor intrusion site investigations.- Journal of environmental management, im Druck: 10 S.; London [DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.015]
- MONTGOMERY, J.H. (2007): Groundwater chemicals desk reference. 4th edition.- CRC: XLIII + 1701 S.; Boca Raton, FL [ISBN: 978-0-8493-9276-4]
- MURPHY, B.L. & CHAN, W.R. (2011): A multi-compartment mass transfer model applied to building vapor intrusion.- Atmospheric environment, 45: 6650 - 6657; Oxford [DOI : 10.1016/j.atmosenv.2011.09.009]
- MUSIELAK, M. (2012): Etude numérique et expérimentale des transferts de composés organiques volatils du sol à l'air ambiant, en passant au travers du béton.- Diss. INP Toulouse: 300 S.; Toulouse [http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001993/01/musielak_partie_1_sur_2.pdf] (letzter Abruf: 08.05.2017)]
- MUSIELAK, M.; MARCOUX, M. & QUINTARD, M. (2010): Indoor air pollution: Study of tri-chloroethylene transport through soil and basement.- Manuskript: 8 S.; Toulouse

- NIELSEN, K.B. & HVIDBERG, B. (2017): Remediation techniques for mitigating vapor intrusion from sewer systems to indoor air.- *Remediation*, 27(3): 67 – 73; New York [DOI: 10.1002/rem.21520]
- NJDEP (New Jersey Department of Environmental Protection) (ed.) (2016): Vapor intrusion technical guidance. Version 4.- NJDEP: VI + 92 S.; Trenton, NJ [<http://www.nj.gov/dep/srp/guidance/vaporintrusion> (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- OSWER (U.S. EPA Office of Solid Waste and Emergency Response) (Ed.) (2015): OSWER Technical guide for assessing and mitigating the vapor intrusion pathway from subsurface vapor sources to indoor air.- EPA: XXI + 188 S.; Washington, D.C. [<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/oswer-vapor-intrusion-technical-guide-final.pdf> (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- PENNELL, K.G.; KANGSEN SCAMMELL, M.; MCCLEAN, M.D.; AMES, J.; WELDON, B.; FRIGUGLIETTI, L.; SUUBERG, E.M.; SHEN, R.; INDEGLIA, P.A. & HEIGER-BERNAYS, W.J. (2013): Sewer gas: an indoor air source of PCE to consider during vapor intrusion investigations.- *Ground water monitoring and remediation*, 33(3): 119 - 126; Westerville, OH [DOI: 10.1111/gwmmr.12021]
- PROVOOST, J.; REIJNDERS, L.; SWARTJES, F.; BRONDERS, J.; SEUNTJENS, P. & LIJZEN, J. (2009): Accuracy of seven vapour intrusion algorithms for VOC in groundwater.- *Journal of soils and sediments*, 9: 62 - 73; Landsberg [DOI: 10.1007/s11368-008-0036-y]
- REICHMAN, R.; SHIRAZI, E.; COLLIVER, D.G. & PENNELL, K.G. (2017): US residential building air exchange rates: new perspectives to improve decision making at vapor intrusion sites.- *Environmental science: Processes & impacts*, 19: 87 - 100; London [DOI: 10.1039/C6EM00504G]
- RICHTER, T. (2010): Beton für Behälter in Biogasanlagen.- *Zement-Merkblatt Landwirtschaft LB*, 14: 6 S.; Düsseldorf [<http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkbl%C3%A4tter/LB14.pdf>]
- RÖSSLER, F.A. (2013): Entwicklung eines effizienten Messverfahrens zur Bestimmung der Radonkonzentration als Indikator für die Qualität der Innenraumluft.- MSc. Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, FH Mittelhessen: XVIII + 167 S.; Gießen [http://www.fs-ev.org/fileadmin/user_upload/Nachwuchsbereich/Arbeiten_2013/Masterarbeit_Roessler.pdf (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- SCHWARZENBACH, R.P.; GSCHWEND, P.M. & IMBODEN, D.M. (2003): *Environmental organic chemistry*. 2nd edition.- Wiley: XIII + 1313 S.; Hoboken, NJ [ISBN: 978-0-471-35750-6]
- SEEGER, K.-J. (1999): *Fachliche Grundlagen zur Beurteilung von flüchtigen organischen Substanzen in der Bodenluft bei Altlasten*.- Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, 263: II + 138; Wiesbaden [ISBN: 3-89026-292-9]
- SEITZ, J.B.; HARMON, S.S. & WYMAN, C. (2016): USEPA's Vapor intrusion guidance could significantly expand the assessment and mitigation of vapor intrusion.- Envi-

- ronmental claims journal, 28: 75 - 81; Philadelphia, PA [DOI: 10.1080/10406026.2016.1129299]
- SIEGEL, L. (2015a): Final at last: Notes on EPA's Vapor intrusion technical guide.- CPEO: 17 S.; Mountain View, CA [<http://www.cpeo.org/pubs/FinalatLast.pdf> (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- SIEGEL, L. (2015b): Innocent until proven guilty: U.S. EPA's Petroleum vapor intrusion technical guide.- CPEO: 8 S.; Mountain View, CA [<http://www.cpeo.org/pubs/PVISummary.pdf> (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (Ed.) (2015): Technical guide for addressing petroleum vapor intrusion at leaking underground storage tank sites.- EPA: VI + 116 S.; Washington, D.C. [<https://www.epa.gov/ust/technical-guide-addressing-petroleum-vapor-intrusion-leaking-underground-storage-tank-sites> (letzter Abruf: 08.05.02017)]
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (2008): Vergleichswerte für flüchtige organische Verbindungen (VOC und Aldehyde) in der Innenraumluf von Haushalten in Deutschland. Ergebnisse des repräsentativen Kinder-Umwelt-Surveys (KUS) des Umweltbundesamtes.- Bundesgesundheitsblatt, 51: 109 - 112; Berlin [DOI: 10.1007/s00103-008-0425-9]
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (Hrsg.) (2014): Raumluftechnik – Garagen - Entlüftung (VDI-Lüftungsregeln).- VDI-Richtlinien, 2053-1: 36 S.; Berlin
- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V.) (Hrsg.) (2002): Betonbauwerke mit Anforderungen an die Dichtheit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen.- Zement-Taschenbuch, 50: 529 - 551; Düsseldorf [ISBN: 3-7640-427-4]
- WHO (World Health Organization) (Ed.) (2000): Air quality guidelines for Europe. 2nd edition.- WHO Regional Office for Europe: X + 273 S.; Copenhagen [ISBN: 92-890-1358-3]
- WHO (World Health Organization) (Ed.) (2010): WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants.- WHO: XXV + 454 S.; Copenhagen [ISBN: 978-92-890-0213-4]
- WILSON, S. (2008): Modular approach to analysing vapour migration into buildings in the UK.- Land contamination and reclamation, 16(3): 223 - 236; Richmond [DOI: 10.2462/09670513.896]
- WILSON, S.; ABBOT, A. & MALLETT, H. (2014): Guidance on the use of plastic membranes as VOC vapour barriers.- CIRIA Publication, C748: 40 S.; London [ISBN: 978-0-86017-753-1]
- WRIGHT, J. (2013): Petroleum hydrocarbon vapour intrusion assessment - Australian guidance.- CRC CARE Technical Report, 23: VIII + 36; Adelaide [ISBN: 978-1-921431-35-7]
- YAO, Y.; WU, Y.; SUUBERG, E.M.; PROVOOST, J.; SHEN, R.; MA, J. & LIU, J. (2015): Vapor intrusion attenuation factors relative to subslab and source, reconsidered in light of

background data.- Journal of hazardous materials, 286: 553 - 561; Amsterdam
[DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.013]

ZEDDEL, A.; MACHTOLF, M.; BARKOWSKI, D. & SOHR, A. (2002): Leichtflüchtige Schadstoffe im Boden - orientierende Hinweise zur Bewertung von Stoffkonzentrationen in der Bodenluft beim Wirkungspfad Boden - Innenraumluf - Mensch für Wohngebiete.- Altlasten Spektrum, 11: 78 - 88; Berlin

Medium:	Regelwerk / Quelle									
	Innenraumluft							Umgebungsluft		
	UBA IRK		2. BlmschVO Maßnahmenwert	WHO	USEPA	NJDEP		Colorado		WHO
Richtwert I (Vorsorgewert)	Richtwert II (Maßnahmenwert)	Richtwert		Prüfwert, Wohngebiete	Prüfwert, Wohnhäuser	Maßnahmenwert, Wohnhäuser	Sanierungsziel	Maßnahmenwert	Richtwert	Maßnahmenwert
Status:										
Risiko (kanzerogen):										
Stand:	19.03.2017		2001	1 * 10 ⁻⁶ 2010	1 * 10 ⁻⁶ 05/2016	1 * 10 ⁻⁶ 2013	1 * 10 ⁻⁶	1 * 10 ⁻⁶	1 * 10 ⁻⁶ 2000	2010
Alkane										
n-Pentan					1,0					
n-Hexan					0,73	0,73	1,5			
n-Nonan					0,021					
Cyclohexan					6,3	6,3	13			
C9 - C14-Alkane / Isoalkane (aromatenarm)	0,2	2								
Mineralölkohlenwasserstoffe (aromatenarm)					0,031					
einkernige Aromaten										
Benzol				0,00017	0,00036	0,002	0,03		0,00017	0,005
Toluol	0,3	3			5,2	5,2	10		0,26	
Ethylbenzol	0,2	2			0,0011	0,002	0,1			
o-Xylol					0,1					
m-Xylol					0,1					
p-Xylol					0,1					
Summe Xylole	0,1	0,8			0,1	0,1	0,2			
Styrol	0,03	0,3			1	1	2		0,26 **)	
1,2,3-Trimethylbenzol					0,0052					
1,2,4-Trimethylbenzol					0,0073					
Propylbenzol					1,0					
Cumol					0,42					
Alkylbenzole, C9-C15	0,1	1								
PAK										
Naphthalin				0,01	0,000083	0,003	0,006			
Naphthalin und Naphthalin- ähnliche Verbindungen	0,01	0,03								
Chloraromaten										
Chlorbenzol					0,052	0,052	0,1			
1,2-Dichlorbenzol					0,21	0,21	0,42			
1,4-Dichlorbenzol					0,00026	0,003	0,02			
1,2,4-Trichlorbenzol					0,0021	0,004	0,004			
Phenole										
Phenol	0,02	0,2			0,21					
Kresole	0,005	0,05								

Vergleichswerte Innenraumluft

Medium:	Regelwerk / Quelle									
	Innenraumluft								Umgebungsluft	
	UBA IRK		2. BlmschVO Maßnahmenwert	WHO Richtwert $1 * 10^{-6}$ 2010	USEPA Prüfwert, Wohngebiete $1 * 10^{-6}$ 05/2016	NJDEP		Colorado		WHO Richtwert $1 * 10^{-6}$ 2000
Richtwert I (Vorsorgewert)	Richtwert II (Maßnahmenwert)	Prüfwert, Wohnhäuser $1 * 10^{-6}$				Maßnahmenwert, Wohnhäuser $1 * 10^{-6}$	Sanierungsziel $1 * 10^{-6}$	Maßnahmenwert $1 * 10^{-6}$		
Status:										
Risiko (kanzerogen):										
Stand:	19.03.2017		2001			2013		2006		
LHKW										
Dichlormethan	0,2	2			0,1	0,096	1,3			0,45
Trichlormethan (Chloroform)					0,00012	0,002	0,01			
Tetrachlormethan					0,00047	0,003	0,04			
Dichlordifluormethan (Freon 12)					0,1	0,1	0,2			
Trichlorfluormethan (Freon 11)					0,73	0,73	1,5			
1,1-Dichlorethan					0,0018	0,002	0,2			
1,2-Dichlorethan					0,00011	0,002	0,009			0,7 *)
1,1,1-Trichlorethan					5,2	5,2	10			
1,1,2-Trichlorethan					0,00018	0,003	0,003			
1,2-Dibromethan					0,0000047	0,004	0,004			
Tetrafluorethan, 1,1,1,2-					83					
1,1,2-Trichlor-1,2,2-trifluorethan					31	31	62			
Chlorethen (Vinylchlorid)					0,00017	0,001	0,02	0,000072	0,00072	0,001
1,1-Dichlorethen					0,21	0,21	0,42	0,005	0,005	
cis-1,2-Dichlorethen	0,04 ¹⁾							0,037	0,037	
trans-1,2-Dichlorethen					0,063	0,063	0,13	0,062	0,062	
Trichlorethen	0,02			0,0023	0,00048	0,003	0,004	0,000016	0,0008	0,0023
Tetrachlorethen			0,1	0,25	0,011	0,009	0,084	0,00031	0,0155	0,25 *)
Sonstige										
1,4-Dioxan					0,00056					
MTBE					0,0094	0,009	0,9			

¹⁾ vorläufiger Wert FHH BGV, 11/2014

*) ohne Bewertung der Kanzerogenität

**) Wert liegt über Geruchsschwelle

ABREU, L.D.V.; ETTINGER, R. & McALARY, T.
2009

Simulated soil vapor intrusion attenuation factors including biodegradation
for petroleum hydrocarbons

Ground water monitoring and remediation

29(1): 105 - 117

Westerville, OH

ABREU, L.D.V. & JOHNSON, P.C.
2005

Effect of vapor source-building separation and building construction on soil
vapor intrusion as studied with a three-dimensional numerical model

Environmental science and technology

39: 4550 - 4561

Easton, PA

ABREU, L.D.V. & JOHNSON, P.C.
2006

Simulating the effect of aerobic biodegradation on soil vapor intrusion into
buildings: influence of degradation rate, source concentration, and depth

Environmental science and technology

40: 2304 - 2315

Easton, PA

AGÖF (ARBEITSGEMEINSCHAFT ÖKOLOGISCHER FORSCHUNGSINSTITUTE E.V.)
(HRSG.)

2013

AGÖF-Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der
Raumluft

26 S.

Springe-Eldagsen

AGÖF

ALA/LABO (STÄNDIGER AUSSCHUSS ALTLASTEN DER
BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ) (HRSG.)

2008

Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten - Informationsblatt für
den Vollzug

15 S.

Berlin

ALA/LABO

ALAVES, V.M.; SLEETH, D.K.; THIESE, M.S. & LARSON, R.R.
2013

Characterization of indoor air contaminants in a randomly selected set of
commercial nail salons in Salt Lake County, Utah, USA

International journal of environmental health research

23: 419 - 433

London

API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE) (ED.)
1998

Assessing the significance of subsurface contaminant vapor migration to
enclosed spaces - site-specific alternative to generic estimates

API Publication

4674: 56

Washington, D.C.

API

API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE) (ED.)

2009

Simulating the effect of aerobic biodegradation on soil vapor Intrusion into buildings - evaluation of low strength sources associated with dissolved gasoline plumes

API Publication

4775: 53

Washington, D.C.

API

ARCHER, N.P.; BRADFORD, C.M.; VILLANACCI, J.F.; CRAIN, N.E.; CORSI, R.L.; CHAMBERS, D.M.; BURK, T. & BLOUNT, B.C.

2015

Relationship between vapor intrusion and human exposure to trichloroethylene

Journal of environmental science and health. Part A

50: 1360 - 1368

New York

ARMSTRONG, R.B.

2010

Improving indoor air quality by reducing radon and vapor intrusion through the use of ethylene vinyl alcohol (EVOH)

69 - 76 S.

Pasadena, TX

Manuskript

ATSDR (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY) (ED.)

2016

Evaluating vapor intrusion pathways

54 S.

Atlanta, GA

ATSDR

ATTEIA, O. & HÖHENER, P.

2010

Semianalytical model predicting transfer of volatile pollutants from groundwater to the soil surface

Environmental science and technology

44: 6228 - 6232

Easton, PA

BACHMANN, G.; OLTMANN, J.; KONIETZKA, R. & SCHNEIDER, K.

1999

Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten

Loseblatt S.

Berlin

E.Schmidt

BARNES, D.L. & McRAE, M.F.

2017

The predictable influence of soil temperature and barometric pressure changes on vapor intrusion

Atmospheric environment

150: 15 - 23

Oxford

BAUMANN, R.; BOOS, R.; DAMBERGER, B.; DUSSING, G.; HUTTER, H.-P.; KUNDI, M.; MOSHAMMER, H.; TAPPLER, P. & TWRDIK, F.

o.J.

Bewertung der Innenraumluft. Flüchtige organische Verbindungen - VOC. Tetrachlorethen (TCE)

31 S.

Wien

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (HRSG.)

2009

LfU - Merkblatt Altlasten 2: Hinweise zur Untersuchung und Bewertung von flüchtigen Stoffen bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen

23 S.

Augsburg

LfU Bayern

BEAULIEU, G.M. & BROWN, M.J.

2002

Monitoring and modeling methods for indoor air intrusion

Environmental claims journal

14: 121 - 132

Philadelphia, PA

BECKLEY, L.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E.; RIVERA-DUARTE, I. & MCHUGH, T.

2014

On-site gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) analysis to streamline vapor intrusion investigations

Environmental forensics

15: 234 - 243

Orlando, FL

BECKLEY, L.; MCHUGH, T.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E. & RIVERA-DUARTE, I.

2013

Use of on-site GC/MS analysis to distinguish between vapor intrusion and indoor sources of VOCs

ESTCP Final report

VIII + 78 S.

Arlington, VA

ESTCP Program Office

BECKLEY, L.; MCHUGH, T.; KUDER, T. & PHILP, R.P.

2013

Use of compound-specific stable isotope analysis to distinguish between vapor intrusion and indoor sources of VOCs

ESTCP Final report

VIII + 64 S.

Arlington, VA

ESTCP Program Office

BECKLEY, L.; MCHUGH, T. & PHILP, P.

2016

Utility of compound-specific isotope analysis for vapor intrusion investigations

Ground water monitoring and remediation

36(4): 31 - 40

Westerville, OH

- BEKELE, D.N.; NAIDU, R. & CHADALAVADA, S.
2014
Influence of spatial and temporal variability of subsurface soil moisture and temperature on vapour intrusion
Atmospheric environment
88: 14 - 22
Oxford
- BGA (BUNDESGESUNDHEITSAMT) (HRSG.)
1996
Richtwerte für die Innenraumluft: Basisschema
Bundesgesundheitsblatt
39: 422 - 426
Berlin
- BIJAK, G.R.
2014
Management systems approach to building vapor intrusion: a facility manager's guide
Remediation
24(2): 107 - 121
New York
- BOSTOCK, C.E.
2012
Vapor intrusion: a survey of current developments
Environmental claims journal
24: 314 - 335
Philadelphia, PA
- BOZKURT, O.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.
2009
Simulation of the vapor intrusion process for nonhomogeneous soils using a three-dimensional numerical model
Ground water monitoring and remediation
29(1): 92 - 104
Westerville, OH
- BRECKOW, J.
2013
Entwicklung eines effizienten Messverfahrens zur Bestimmung der Radonkonzentration als Indikator für die Qualität der Innenraumluft
68 S.
Gießen
Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, FH Mittelhessen
- BRENNER, D.
2010
Results of a long-term study of vapor intrusion at four large buildings at the NASA Ames Research Center
Journal of the Air and Waste Management Association
60: 747 - 758
Pittsburgh, PA

BREWER, R.; NAGASHIMA, J.; RIGBY, M.; SCHMIDT, M. & O'NEILL, H.
2014

Estimation of generic subslab attenuation factors for vapor intrusion investigations

Ground water monitoring and remediation

34(4): 79 - 92

Westerville, OH

BROWN, S.K.; SIM, M.R.; ABRAMSON, M.J. & GRAY, C.N.
1994

Concentrations of volatile organic compounds in indoor air - a review

Indoor air

4: 123 - 134

Oxford

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (ED.)
2009

Vapor intrusion mitigation advisory

XIII + 53 S.

Sacramento, CA

California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (ED.)
2011

Vapor intrusion mitigation advisory

XII + 48 S.

Sacramento, CA

California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (ED.)
2011

Guidance for the evaluation and mitigation of subsurface vapor intrusion to indoor air (vapor intrusion guidance)

IX + 47 S.

Sacramento, CA

California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control

CASELLI, M.; DE GENNARO, G.; SARACINO, M.R. & TUTINO, M.
2009

Indoor contaminants from newspapers: VOCs emissions in newspaper stands

Environmental research

109: 149 - 157

San Diego, CA

CHAN, W.R.; BRORBY, G.P. & MURPHY, B.L.
2010

Characterizing TCE exposure distribution for occupants of houses with basements

AWMA (Air and Waste Management Association)

491 - 503 S.

Red Hook, NY

AWMA

CHEN, Y.; HOU, D.; LU, C.; SPAIN, J.C. & LUO, J.

2016

Effects of rate-limited mass transfer on modeling vapor intrusion with aerobic biodegradation

Environmental science and technology

50: 9400 - 9406

Easton, PA

CHOI, J.-W.; TILLMAN, F.D. & SMITH, J.A.

2002

Relative importance of gas-phase diffusive and advective trichloroethene (TCE) fluxes in the unsaturated zone under natural conditions

Environmental science and technology

36: 3157 - 3164.

Easton, PA

CITYCHLOR (ED.)

2013

Groundwater, soil, soil gas and indoor air characterization - Technical book

26 S.

Utrecht

Rijkswaterstaat Environment

CITYCHLOR (ED.)

2013

Models for predicting transfers to indoor air

27 S.

Utrecht

Rijkswaterstaat Environment

CITYCHLOR (ED.)

2013

Attenuation of the vinyl chloride in the vadose zone

37 S.

Utrecht

Rijkswaterstaat Environment

COLL, F.R.; MOORE, R.A. & RITENOUR, J.

2017

Vapor intrusion mitigation challenges posed by a classic urban setting

Remediation

27(3): 55 - 65

New York

COLLIER, Z.A.; VOGEL, J.T.; ZEMBA, S.G.; FERGUSON, E.A. & LINKOV, I.

2011

Management tools for managing vapor intrusion

Environmental science and technology

45: 8611 - 8612

Easton, PA

COLORADO DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT (ED.)

2004

Indoor air guidance. Draft

I + 34 S.

Denver, CO

Colorado Department of Public Health and Environment

COLORADO DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT (ED.)

2006

Dry cleaner remediation guidance document

I + 35 S.

Denver, CO

Colorado Department of Public Health and Environment

CRUMP, D.; BROWN, V.; ROWLEY, J. & SQUIRE, R.

2004

Reducing ingress of organic vapours into homes situated on contaminated land

Environmental technology

25: 443 - 450

London

DAVIS, G.B.; PATTERSON, B.M. & TREFRY, M.G.

2009

Evidence for instantaneous oxygen-limited biodegradation of petroleum hydrocarbon vapors in the subsurface

Ground water monitoring and remediation

29(1): 126 - 137

Westerville, OH

DAVIS, G.B.; TREFRY, M.G. & PATTERSON, B.M.

2009

Petroleum vapour model comparison

CRC CARE Technical Report

9: IV + 24

Adelaide

DAVIS, G.B.; WRIGHT, J. & PATTERSON, B.M.

2009

Field assessment of vapours

CRC CARE Technical Report

13: VIII + 53

Adelaide

DAWSON, H.E. & McALARY, T.

2009

A compilation of statistics for VOCs from post-1990 indoor air concentration studies in North American residences unaffected by subsurface vapor intrusion

Ground water monitoring and remediation

29(1): 60 - 69

Westerville, OH

DAWSON, H.; McALARY, T. & GROENEVELT, H.

2015

Passive sampling for vapor intrusion assessment

V + 14 S.

Port Hueneme, CA

NAVFAC EXWC

DBV (DEUTSCHER BETON- UND BAUTECHNIK-VEREIN E.V.) (HRSG.)

2009

Merkblatt Hochwertige Nutzung von Untergeschossen - Bauphysik und Raumklima

60 S.

Berlin

DBV

DE BIASE, C.; LOECHEL, S.; PUTZMANN, T.; BITTENS, M.; WEISS, H. & DAUS, B.
2014
Volatile organic compounds effective diffusion coefficients and fluxes
estimation through two types of construction material
Indoor air
24: 272 - 282
Oxford

DEHATE, R.B.; JOHNSON, G.T. & HARBISON, R.D.
2011
Risk characterization of vapor intrusion in former manufactured gas plant
sites
Regulatory toxicology and pharmacology
59: 353 - 359
Amsterdam

DELA CRUZ, M.; CHRISTENSEN, J.H.; DYRHAUGE THOMSEN, J. & MÜLLER, R.
2014
Can ornamental potted plants remove volatile organic compounds from
indoor air? - a review
Environmental science and pollution research
21: 13909 - 13928
Landsberg

DEQ (MICHIGAN DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY) (ED.)
2013
Guidance document for the vapor intrusion pathway
getr. Zählung S.
Lansing, MI
Michigan Department of Environmental Quality

DEVAULL, G.E.
2007
Indoor vapor intrusion with oxygen-limited biodegradation for a subsurface
gasoline source
Environmental science and technology
41: 3241 - 3248
Easton, PA

DEVAULL, G.; ETTINGER, R. & GUSTAFSON, J.
2002
Chemical vapor intrusion from soil or groundwater to indoor air: significance
of unsaturated zone biodegradation of aromatic hydrocarbons
Soil and sediment contamination
11: 625 - 641
London

DoD (DEPARTMENT OF DEFENCE, TRI-SERVICE ENVIRONMENTAL RISK
ASSESSMENT WORKGROUP) (ED.)
2009
DoD Vapor intrusion handbook
VII + 59 S.
Washington, D.C.
US Army

- DOUCETTE, W.J.; HALL, A.J. & GORDER, K.A.
2010
Emissions of 1,2-dichloroethane from holiday decorations as a source of indoor air contamination
Ground water monitoring and remediation
30(1): 67 - 73
Westerville, OH
- DU, L.; BATTERMAN, S.; GODWIN, C.; ROWE, Z. & CHIN, J.-Y.
2015
Air exchange rates and migration of VOCs in basements and residences
Indoor air
25: 598 - 609
Oxford
- EKLUND, B.; BECKLEY, L.; YATES, V. & MCHUGH, T.E.
2012
Overview of state approaches to vapor intrusion
Remediation
22(4): 7 - 20
New York
- EKLUND, B. & BURROWS, D.
2009
Prediction of indoor air quality from soil-gas data at industrial buildings
Ground water monitoring and remediation
29(1): 118 - 125
Westerville, OH
- EKLUND, B.M. & SIMON, M.A.
2007
Concentration of tetrachloroethylene in indoor air at a former dry cleaner facility as a function of subsurface contamination: a case study
Journal of the Air and Waste Management Association
57: 753 - 760
Pittsburgh, PA
- ENVIRONMENT AGENCY (ED.)
2002
The Contaminated Land Exposure Assessment model (CLEA): Technical basis and algorithms
R & D Publication
10: 124
Bristol
Environment Agency
- ERDOGAN, H. & HSIEH, H.-N.
2014
Vapor intrusion investigation at a site in New Jersey: a field study
Journal of hazardous, toxic and radioactive waste
18(2): 6
Reston, VA
- EVANS, D.; HERS, I.; WOLTERS, R.B., BODDINGTON, R.T.B. & HALL, D.H.
2002
Vapour transfer of soil contaminants
V + 70 S.
Bristol
Environment Agency

EVANSON, T. & GLEASON, S.

2008

Approach to vapor intrusion at contaminated dry cleaner sites

10 S.

[ohne Ort]

State Coalition for Remediation of Drycleaners (SCRD)

FERGUSON, C.C.; KRYLOV, V.V. & McGRATH, P.T.

1995

Contamination of indoor air by toxic soil vapours: A screening risk assessment model

Building and environment

30: 375 - 383

Oxford

FHH BSFGV (FHH BEHÖRDE FÜR SOZIALES, FAMILIE, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (HRSG.)

2006

Richtwerte für die Innenraumluft

4 S.

Hamburg

Behörde für Soziales, Familie, Gesundheit und Verbraucherschutz

FISCHER, D. & UCHRIN, C.G.

1996

Laboratory simulation of VOC entry into residence basements from soil gas

Environmental science and technology

30: 2598 - 2603

Easton, PA

FISCHER, M.L.; BENTLEY, A.J.; DUNKIN, K.A.; HODGSON, A.T.; NAZAROFF, W.W.; SEXTRO, R.G. & DAISEY, J.M.

1996

Factors affecting indoor air concentrations of volatile compounds at a site of subsurface gasoline contamination

Environmental science and technology

30: 2948 - 2957

Easton, PA

FITZPATRICK, N.A. & FITZGERALD, J.J.

2002

An evaluation of vapor intrusion into buildings through a study of field data

Soil and sediment contamination

11: 603 - 623

London

FOLKES, D.J.; KURTZ, J.P. & WANNAMAKER, E.J.

2010

Vapor intrusion attenuation factors based on long term monitoring data

Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy

12: 370 - 382

Red Hook, NY

Curran

FOLKES, D.; WERTZ, W.; KURTZ, J. & KUEHSTER, T.

2009

Observed spatial and temporal distributions of CVOCs at Colorado and New York vapor intrusion sites

Ground water monitoring and remediation

29(1): 70 - 80

Westerville, OH

FUGLSANG, K

2002

A new method for measurement of the intrusion of VOCs to indoor air from contaminated soil

Levin, H.

956 - 961 S.

Santa Cruz, CA

GARBESI K. & SEXTRO R.G.

1989

Modeling and field evidence of pressure-driven entry of soil gas into a house through permeable below-grade walls

Environmental science and technology

23: 1481 - 1487

Easton, PA

GARBESI K.; SEXTRO R.G.; FISK W.J.; MODERA M.P. & REVZAN K.L.

1993

Soil-gas entry into an experimental basement: Model measurement comparisons and seasonal effects

Environmental science and technology

27: 466 - 473

Easton, PA

GORDER, K.A. & DETTENMAIER, E.M.

2011

Portable GC/MS methods to evaluate sources of cVOC contamination in indoor air

Ground water monitoring and remediation

31(4): 113 - 119

Westerville, OH

GUO, Y.; HOLTON, C.; LUO, H.; DAHLEN, P.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E. & JOHNSON, P.C.

2015

Identification of alternative vapor intrusion pathways using controlled pressure testing, soil gas monitoring, and screening model calculations

Environmental science and technology

49: 13472 - 13482

Easton, PA

HAZEBROUCK, B. & LARBRE, J.

2010

The management of contaminated sites and soils: Characterisation of indoor air quality in relation to potential soil pollution by volatile and semi-volatile chemicals

27 S.

Utrecht

Rijkswaterstaat Environment

HEALEY, S.; PETRISOR, I.G. & MORRISON, R.

2004

Vapor intrusion - forensic approaches and recent developments

Environmental claims journal

16: 237 - 248

Philadelphia, PA

HERS, I.; JOURABCHI, P.; LAHVIS, M.A.; DAHLEN, P.; LUO, E.H.; JOHNSON, P.;

DEVAULL, G.E. & MAYER, K.U.

2014

Evaluation of seasonal factors on petroleum hydrocarbon vapor
biodegradation and intrusion potential in a cold climate

Ground water monitoring and remediation

34(4): 60 - 78

Westerville, OH

HERS, I. & TRUESDALE, R.S.

2013

Evaluation of empirical data to support soil vapor intrusion screening criteria
for petroleum hydrocarbon compounds

XIV + 5 + 72 S.

Washington, D.C.

EPA

HERS, I.; ZAPF-GILJE, R.; EVANS, D. & LI, L.

2002

Comparison, validation, and use of models for predicting indoor air quality
from soil and groundwater contamination

Soil and sediment contamination

11: 491 - 527

London

HERS, I.; ZAPF-GILJE, R.; JOHNSON, P.C. & LI, L.

2003

Evaluation of the Johnson and Ettinger model for prediction of indoor air
quality

Ground water monitoring and remediation

23(1): 62 - 76

Westerville, OH

HERS, I.; ZAPF-GILJE, R.; JOHNSON, P.C. & LI, L.

2003

Evaluation of the Johnson and Ettinger model for prediction of indoor air
quality

Ground water monitoring and remediation

23(2): 119 - 133

Westerville, OH

HERS, I.; ZAPF-GILJE, R.; LI, L. & ATWATER, J.

2001

The use of indoor air measurements to evaluate intrusion of subsurface
VOC vapors into buildings

Journal of the Air and Waste Management Association

51: 1318 - 1331

Pittsburgh, PA

HILLMERT, C. & SALOWSKY, H.

2010

Altlastenbewertung - Priorisierungs- und Bewertungsverfahren

Baden-Württemberg

Altlasten und Grundwasserschadensfälle

43: 117

Karlsruhe

LUBW

HODGSON A.T.; GARBESI K.; SEXTRO R.G. & DAISEY J.M.

1992

Soil gas contamination and entry of volatile organic compounds into a house near a landfill

Journal of the Air and Waste Management Association

42: 277 - 283

Pittsburgh, PA

HOLTON, C.; GUO, Y.; LUO, H.; DAHLEN, P.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E. & JOHNSON, P.C.

2015

Long-term evaluation of the controlled pressure method for assessment of the vapor intrusion pathway

Environmental science and technology

49: 2091 - 2098

Easton, PA

HOLTON, C.; LUO, H.; DAHLEN, P.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E. & JOHNSON, P.C.

2013

Temporal variability of indoor air concentrations under natural conditions in a house overlying a dilute chlorinated solvent groundwater plume

Environmental science and technology

47: 13347 - 13354

Easton, PA

HOSANGADI, V.; SHAVER, B.; HARTMAN, B.; POUND, M.; KRAM, M.L. & FRESCURA, C.

2017

High-frequency continuous monitoring to track vapor intrusion resulting from naturally occurring pressure dynamics

Remediation

27(2): 9 - 25

New York

ITRC (INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL, GEOPHYSICAL CLASSIFICATION FOR MUNITIONS RESPONSE TEAM) (ED.)

2014

Petroleum vapor intrusion: fundamentals of screening, investigation, and management

XI + 105 S.

Washington, D.C.

ITRC

ITRC (INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL, VAPOR INTRUSION TEAM) (ED.)

2007

Vapor intrusion pathway: a practical guideline

VI + 74 S.

Washington, D.C.

ITRC

ITRC (INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL, VAPOR INTRUSION TEAM) (ED.)

2007

Vapor intrusion pathway: Investigative approaches for typical scenarios

V + 45 S.

Washington, D.C.

ITRC

JARONI, H. & DÜNNEBIER, J.

2005

Berechnung orientierender Hinweise auf Prüfwerte für flüchtige Stoffe in der Bodenluft

Altlasten und Boden News

2005-1: 21 - 22

Karlsruhe

LfU

JOHNER, H.U. & SURBECK, H.

2001

Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction

Science of the total environment

272: 337 - 341

Amsterdam

JOHNSON, P.C.

2002

Identification of critical parameters for the Johnson and Ettinger (1991) vapor intrusion model

API Soil and groundwater research bulletin

17: 29

Washington, D.C.

API

JOHNSON, P.C.

2005

Identification of application-specific critical inputs for the 1991 Johnson and Ettinger vapor intrusion algorithm

Ground water monitoring and remediation

25(1): 63 - 78

Westerville, OH

JOHNSON, P.C. & ETTINGER, R.A.

1991

Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors in buildings

Environmental science and technology

25: 1445 - 1452

Easton, PA

JOHNSON, P.C.; ETTINGER, R.A.; KURTZ, J.; BRYAN, R. & KESTER, J.E.

2002

Migration of soil gas vapors to indoor air: determining vapor attenuation factors using a screening-level model and field data from the CDOT-MTL

API Soil and groundwater research bulletin

16: 10

Washington, D.C.

API

JOHNSON, P.C.; ETTINGER, R.A.; KURTZ, J.P.; BRYAN, R. & KESTER, J.E.

2009

Empirical assessment of ground water-to-indoor air attenuation factors for the CDOT-MTL Denver site

Ground water monitoring and remediation

29(1): 153 - 159

Westerville, OH

JOHNSTON, J.E. & MACDONALD GIBSON, J.

2011

Probabilistic approach to estimating indoor air concentrations of chlorinated volatile organic compounds from contaminated groundwater: A case study in San Antonio, Texas

Environmental science and technology

45: 1007 - 1013

Easton, PA

JOHNSTON, J.E. & MACDONALD GIBSON, J.

2013

Screening houses for vapor intrusion risks: a multiple regression analysis approach

Environmental science and technology

47: 5595 - 5602

Easton, PA

JOHNSTON, J.E.; SUNAND, Q. & MACDONALD GIBSON, J.

2014

Updating exposure models of indoor air pollution due to vapor intrusion:

Bayesian calibration of the Johnson-Ettinger model

Environmental science and technology

48: 2130 - 2138

Easton, PA

JORDAN, M.

2014

Conceptual site model development and phased remedy implementation to achieve vapor screening goals at a former dry cleaner

Remediation

24(4): 107 - 126

New York

KANSAS DEPARTMENT OF HEALTH AND ENVIRONMENT (ED.)

2016

Kansas Vapor intrusion guidance

20 S.

Topeka, KS

Kansas Department of Health and Environment

KARRASCH, H. & BIEHLER, M.J.

1997

Einfluß von gasförmigen Emissionen aus Bauprodukten auf die Innenraumluftqualität. Teil 1: Gesetzliche Regelungen

Gesundheitsingenieur

118: 37 - 41

München

KEMSKI, J.; KLINGEL, R.; SIEHL, A.; STEGEMANN, R. & VALDIVIA-MANCHEGO, M.
2002
Transferfunktion für die Radonkonzentration in der Bodenluft und der
Wohnraumluft
Reaktorsicherheit und Strahlenschutz
598: 206
Köln
GRS

KIM, S.K.; BURRIS, D.R.; BRYANT-GENEVIER, J.; GORDER, K.A.; DETTENMAIER,
E.M. & ZELLERS, E.T.
2012
Microfabricated gas chromatograph for on-site determinations of TCE in
indoor air arising from vapor intrusion. 2. Spatial/temporal monitoring
Environmental science and technology
46: 6073 - 6080
Easton, PA

KIM, S.K.; BURRIS, D.R.; CHANG, H.; BRYANT-GENEVIER, J. & ZELLERS, E.T.
2012
Microfabricated gas chromatograph for on-site determination of
trichloroethylene in indoor air arising from vapor intrusion. 1. Field evaluation
Environmental science and technology
46: 6065 - 6072
Easton, PA

KRAM, M.
2015
The emperor's old clothes: an inconvenient truth about currently accepted
vapor intrusion assessment methods
Ground water monitoring and remediation
35(4): 20 - 26
Westerville, OH

KRAM, M.
2016
Response to "Comments and Corrections to: 'The emperor's old clothes: an
inconvenient truth about currently accepted vapor intrusion assessment
methods,' and 'Emperor's old clothes revisited,' Two recent editorials by
Mark Kram"
Ground water monitoring and remediation
36(3): 87
Westerville, OH

KRAM, M.L.; HARTMAN, B. & FRESCURA, C.
2016
Vapor intrusion monitoring method cost comparisons: automated continuous
analytical versus discrete time-integrated passive approaches
Remediation
26(4): 41 - 52
New York

KURTZ, J.P.; WOLFE, E.M.; WOODLAND, A.K. & FOSTER, S.J.
2010
Evidence for increasing indoor sources of 1,2-dichloroethane since 2004 at
two Colorado residential vapor intrusion sites
Ground water monitoring and remediation
30(3): 107 - 112
Westerville, OH

KURZ, D.W.

2000

Estimating residential indoor air impacts due to groundwater contamination
Great Plains/Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center
220 - 226 S.
Manhattan, KS
Great Plains/Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center

LAHVIS, M.A.

2005

Evaluation of potential vapor transport to indoor air associated with
small-volume releases of oxygenated gasoline in the vadose zone
API Soil and groundwater research bulletin
21: 4
Washington, D.C.
API

LAHVIS, M.A.; HERS, I.; DAVIS, R.V.; WRIGHT, J. & DEVAULL, G.E.

2013

Vapor intrusion screening at petroleum UST sites
Ground water monitoring and remediation
33(2): 53 - 67
Westerville, OH

LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (HRSG.)

2006

Handlungsempfehlung zur Beurteilung der Gefahrenlage anhand von Prüf-
und Maßnahmenwerten sowie sonstiger Erkenntnisse im Rahmen der
Altlastenbearbeitung und der Bearbeitung von anlagenbezogenen
schädlichen Bodenveränderungen sowie dadurch verursachter
Gewässerunreinigungen
Fachinformationen zur Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg
5: 20
Potsdam

LITTLE, J.C.; DAISEY, J.M. & NAZAROFF, W.W.

1992

Transport of subsurface contaminants into buildings
Environmental science and technology
26: 2058 - 2066
Easton, PA

LUG SACHSEN (LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE SACHSEN) (HRSG.)

2015

Bewertungshilfen bei der Gefahrenverdachtsermittlung in der
Altlastenbehandlung
73 S.
Dresden
Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen

LUO, H.; DAHLEN, P.; JOHNSON, P.C.; PEARGIN, T. & CREAMER, T.

2009

Spatial variability of soil-gas concentrations near and beneath a building
overlying shallow petroleum hydrocarbon - impacted soils
Ground water monitoring and remediation
29(1): 81 - 91
Westerville, OH

LUTES, C.C.; TRUESDALE, R.S.; COSKY, B.W.; ZIMMERMAN, J.H. & SCHUMACHER, B.A.

2015

Comparing vapor intrusion mitigation system performance for VOCs and radon

Remediation

25(4): 7 - 26

New York

MA, J.; LI, H.; SPIESE, R.; WILSON, J.; YAN, G. & GUO, S.

2016

Vapor intrusion risk of lead scavengers 1,2-dibromoethane (EDB) and 1,2-dichloroethane (DCA)

Environmental pollution

213: 825 - 832

Barking, Essex

MA, J.; XIONG, D.; LI, H.; DING, Y.; XIA, X. & YANG, Y.

2017

Vapor intrusion risk of fuel ether oxygenates methyl tert-butyl ether (MTBE), tert-amyl methyl ether (TAME) and ethyl tert-butyl ether (ETBE): A modeling study

Journal of hazardous materials

332: 10 - 18

Amsterdam

MAGED, A.F.

2009

Estimating the radon concentration in water and indoor air

Environmental monitoring and assessment

152: 195 - 201

Dordrecht / Hingham, MA

MASSDEP (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION) (ED.)

2016

Vapor intrusion guidance: Site assessment, mitigation and closure

VI + 126 S.

Boston, MA

Massachusetts Department of Environmental Protection

MCALARY, T.A.; NICHOLSON, P.J.; YIK, L.K.; BERTRAND, D.M. & THRUPP, G.

2010

High purge volume sampling - A new paradigm for subslab soil gas monitoring

Ground water monitoring and remediation

30(2): 73 - 85

Westerville, OH

MCALARY, T.; GROENEVELT, H.; DISHER, S.; ARNOLD, J.; SEETHAPATHY, S.; SACCO, P.; CRUMP, D.; SCHUMACHER, B.; HAYES, H.; JOHNSON, P. & GÓRECKI, T.

2015

Passive sampling for volatile organic compounds in indoor air-controlled laboratory comparison of four sampler types

Environmental science: Processes & impacts

17: 896 - 905

London

McALARY, T.; GROENEVELT, H.; DISHER, S.; ARNOLD, J.; SEETHAPATHY, S.; SACCO, P.; CRUMP, D.; SCHUMACHER, B.; HAYES, H.; JOHNSON, P. & GÓRECKI, T.

2015

Correction: Passive sampling for volatile organic compounds in indoor air-controlled laboratory comparison of four sampler types

Environmental science: Processes & impacts

17: 1190 - 1190

London

McALARY, T.; MCHUGH, T.; EKLUND, B.; LUTES, C.; SUUBERG, E.; HAYES, H.; PENNELL, K.G.; FOLKES, D.; DAWSON, H.; TRUESDALE, R.; BECKLEY, L. & HOLTON, C.

2016

Comments and corrections to: "The emperor's old clothes: an inconvenient truth about currently accepted vapor intrusion assessment methods," and "Emperor's old clothes revisited," Two recent editorials by Mark Kram

Ground water monitoring and remediation

36(3): 84 -

Westerville, OH

McDONALD, G.J. & WERTZ, W.E.

2007

PCE, TCE, and TCA vapors in subslab soil gas and indoor air: a case study in upstate New York

Ground water monitoring and remediation

27(4): 86 - 92

Westerville, OH

MCHUGH, T.

2012

Protocol for tier 2 evaluation of vapor intrusion at corrective action sites

ESTCP Cost and performance report

200707: VII + 38

Arlington, VA

ESTCP Program Office

MCHUGH, T.

2012

Protocol for tier 2 evaluation of vapor intrusion at corrective action sites

ESTCP Final report

200707: XIII + 95

Arlington, VA

ESTCP Program Office

MCHUGH, T.; DAVIS, R.; DEVAULL, G.; HOPKINS, H.; MENATTI, J. & PEARGIN, T.

2010

Evaluation of vapor attenuation at petroleum hydrocarbon sites: considerations for site screening and investigation

Soil and sediment contamination

19: 725 - 745

London

MCHUGH, T.E.; BECKLEY, L.; BAILEY, D.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E.; RIVERA-DUARTE, I.; BROCK, S. & MACGREGOR, I.C.

2012

Evaluation of vapor intrusion using controlled building pressure

Environmental science and technology

46: 4792 - 4799

Easton, PA

McHUGH, T.E.; CONNOR, J.A. & AHMAD, F.

2004

An empirical analysis of the groundwater-to-indoor-air exposure pathway:

The role of background concentrations in indoor air

Environmental forensics

5: 33 - 44

Orlando, FL

McHUGH, T.E.; DE BLANC, P.C. & POKLUDA, R.J.

2006

Indoor air as a source of VOC contamination in shallow soils below buildings

Soil and sediment contamination

15: 103 - 122

London

McHUGH, T.E.; HAMMOND, D.E.; NICKELS, T. & HARTMAN, B.

2008

Use of radon measurements for evaluation of volatile organic compound

(VOC) vapor intrusion

Environmental forensics

9: 107 - 114

Orlando, FL

McHUGH, T.; KUDER, T.; FIORENZA S.; GORDER, K.; DETTENMAIER, E. & PHILP, P.

2011

Application of CSIA to distinguish between vapor intrusion and indoor sources of VOCs

Environmental science and technology

45: 5952 - 5958

Easton, PA

McHUGH, T.; LOLL, P. & EKLUND, B.

2017

Recent advances in vapor intrusion site investigations

Journal of environmental management

1 - 10 S.

London

MILLS, W.B.; LIU, S.; RIGBY, M.C. & BRENNER, D.

2007

Time-variable simulation of soil vapor intrusion into a building with a combined crawl space and basement

Environmental science and technology

41: 4993 - 5001

Easton, PA

MORADI, A.; TOOTKABONI, M. & PENNELL, K.G.

2015

A variance decomposition approach to uncertainty quantification and sensitivity analysis of the Johnson and Ettinger model

Journal of the Air and Waste Management Association

65: 154 - 164

Pittsburgh, PA

MOYER, E.; LOWE, J.; MACPHAUL, D.; ETTER, C. & LUND, L.

2009

Addressing soil gas vapor intrusion using sustainable building solutions

Remediation

19(4): 17 - 33

New York

MUMFORD, K.G.; MUSTAFA, N. & GERHARD, J.I.

2016

Probabilistic risk assessment of contaminant transport in groundwater and vapour intrusion following remediation of a contaminant source

Stochastic environmental research and risk assessment

30: 1017 - 1031

Berlin / Heidelberg

MURPHY, B.L. & CHAN, W.R.

2011

A multi-compartment mass transfer model applied to building vapor intrusion

Atmospheric environment

45: 6650 - 6657

Oxford

MUSIELAK, M.

2012

Etude numérique et expérimentale des transferts de composés organiques volatils du sol à l'air ambiant, en passant au travers du béton

300 S.

Toulouse

Diss. INP Toulouse

MUSIELAK, M.; BRUSSEAU, M.L.; MARCOUX, M.; MORRISON, C. & QUINTARD, M.

2014

Determination of chlorinated solvent sorption by porous material -

Application to trichloroethene vapor on cement mortar

Transport in porous media

104: 77 - 90

Dordrecht / Boston, MA

MUSIELAK, M.; MARCOUX, M. & QUINTARD, M.

2010

Indoor air pollution: Study of trichloroethylene transport through soil and basement

8 S.

Toulouse

Manuskript

MUSTAFA, N.; MUMFORD, K.G.; GERHARD, J.I. & O'CARROLL, D.M.

2014

A three-dimensional numerical model for linking community-wide vapour risks

Journal of contaminant hydrology

156: 38 - 51

Amsterdam

NAVFAC EXWC (ED.)

2013

Innovative vapor intrusion site characterization methods

8 S.

Port Hueneme, CA

NAVFAC EXWC

NAZAROFF, W.W.

1992

Radon transport from soil to air

Reviews of geophysics

30: 137 - 160

Washington, D.C.

NIELSEN, K.B. & HVIDBERG, B.

2017

Remediation techniques for mitigating vapor intrusion from sewer systems to indoor air

Remediation

27(3): 67 - 73

New York

NJDEP (NEW JERSEY DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION) (ED.)

2013

Update to the New Jersey Department of Environmental Protection (NJDEP) vapor intrusion screening levels

20 S.

Trenton, NJ

NJDEP

NJDEP (NEW JERSEY DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION) (ED.)

2016

Vapor intrusion technical guidance. Version 4

VI + 92 S.

Trenton, NJ

NJDEP

NSW (STATE OF NEW SOUTH WALES AND THE DEPARTMENT OF ENVIRONMENT, CLIMATE CHANGE AND WATER) (ED.)

2010

Vapour intrusion: Technical practice note

21 S.

Sydney

Department of Environment, Climate Change and Water

NYSDOH (NEW YORK STATE DEPARTMENT OF HEALTH) (ED.)

2006

Guidance for evaluating soil vapor intrusion in the State of New York

82 S.

Troy, NY

New York State Department of Health

ODENCRANTZ, J.E. & O'NEILL, H.

2009

Passive to active tie-in for soil gas surveys: Improved technique for source-area, spatial variability, remediation-monitoring, and vapor-intrusion assessment

Remediation

19(2): 71 - 83

New York

ODENCRANTZ, J.E.; O'NEILL, H.; STEINMACHER, S.J.; CASE, J.D. & JOHNSON, P.C.

2008

Residential vapor-intrusion evaluation: long-duration passive sampling vs. short-duration active sampling

Remediation

18(4): 49 - 54

New York

OLSON, D.A. & CORSI, R.L.
2001

Characterizing exposure to chemicals from soil vapor intrusion using a two-compartment model

Atmospheric environment

35: 4201 - 4209

Oxford

OLSON, D.A. & CORSI, R.L.
2002

Fate and transport of contaminants in indoor air

Soil and sediment contamination

11: 583 - 601

London

OREGON DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY (ED.)

2010

Guidance for assessing and remediating vapor intrusion in buildings

V + 32 S.

Portland, OR

Oregon Department of Environmental Quality

OSWER (U.S. EPA OFFICE OF SOLID WASTE AND EMERGENCY RESPONSE) (ED.)

2015

OSWER Technical guide for assessing and mitigating the vapor intrusion pathway from subsurface vapor sources to indoor air

XXI + 188 S.

Washington, D.C.

EPA

PARKER, J.C.

2003

Modeling volatile chemical transport, biodecay, and emission to indoor air

Ground water monitoring and remediation

23(1): 107 - 120

Westerville, OH

PATTERSON, B.M.; ARAVENA, R.; DAVIS, G.B.; FURNESS, A.J.; BASTOW, T.P. & BOUCHARD, D.

2013

Multiple lines of evidence to demonstrate vinyl chloride aerobic biodegradation in the vadose zone, and factors controlling rates

Journal of contaminant hydrology

153: 69 - 77

Amsterdam

PATTERSON, B.M. & DAVIS, G.B.

2009

Quantification of vapor intrusion pathways into a slab-on-ground building under varying environmental conditions

Environmental science and technology

43: 650 - 656

Easton, PA

PENNELL, K.G.; BOZKURT, O. & SUUBERG, E.M.

2009

Development and application of a three-dimensional finite element vapor intrusion model

Journal of the Air and Waste Management Association

59: 447 - 460

Pittsburgh, PA

PENNELL, K.G.; KANGSEN SCAMMELL, M.; MCCLEAN, M.D.; AMES, J.; WELDON, B.; FRIGUGLIETTI, L.; SUUBERG, E.M.; SHEN, R.; INDEGLIA, P.A. & HEIGER-BERNAYS, W.J.

2013

Sewer gas: an indoor air source of PCE to consider during vapor intrusion investigations

Ground water monitoring and remediation

33(3): 119 - 126

Westerville, OH

PENNELL, K.G.; SCAMMELL, M.K.; MCCLEAN, M.D.; SUUBERG, E.M.; MORADI, A.; ROGHANI, M.; AMES, J.; FRIGUGLIETTI, L.; INDEGLIA, P.A.; SHEN, R.; YAO, Y. & HEIGER-BERNAYS, W.J.

2016

Field data and numerical modeling: A multiple lines of evidence approach for assessing vapor intrusion exposure risks

Science of the total environment

556: 291 - 301

Amsterdam

PENNSYLVANIA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION (ED.)

2015

Land Recycling Program Technical guidance manual for vapor intrusion into buildings from groundwater and soil under Act 2. Draft

III + 61 S.

Harrisburg, PA

Pennsylvania Department of Environmental Protection

PICONE, S.; VALSTAR, J.; VAN GAANS, P.; GROTENHUIS, T. & RIJNAARTS, H.

2012

Sensitivity analysis on parameters and processes affecting vapor intrusion risk

Environmental toxicology and chemistry

31: 1042 - 1052

New York

PLANTZ, G.M.; MCCARTHY, K.J.; EMSBO-MATTINGLY, S.D.; UHLER, A.D. & STOUT, S.A.

2008

Evaluating the vapor intrusion pathway: challenges and source identification

Environmental claims journal

20: 71 - 86

Philadelphia, PA

PROVOOST, J.; BOSMAN, A.; REIJNDERS, L.; BRONDERS, J.; TOUCHANT, K. & SWARTJES, F.

2010

Vapour intrusion from the vadose zone - seven algorithms compared

Journal of soils and sediments

10: 473 - 483

Landsberg

- PROVOOST, J.; REIJNDERS, L.; SWARTJES, F.; BRONDERS, J.; CARLON, C.;
D'ALESSANDRO, M. & CORNELIS, C.
2008
Parameters causing variation between soil screening values and the effect
of harmonization
Journal of soils and sediments
8: 298 - 311
Landsberg
- PROVOOST, J.; REIJNDERS, L.; SWARTJES, F.; BRONDERS, J.; SEUNTJENS, P. &
LIJZEN, J.
2009
Accuracy of seven vapour intrusion algorithms for VOC in groundwater
Journal of soils and sediments
9: 62 - 73
Landsberg
- RAINA, D.S. & SILFER, B.E.
2006
Soil vapor intrusion - mitigation measures
Environmental claims journal
18: 185 - 191
Philadelphia, PA
- REHWAGEN, M.; SCHLINK, U. & HERBARTH, O.
2003
Seasonal cycle of VOCs in apartments
Indoor air
13: 283 - 291
Oxford
- REICHMAN, R.; SHIRAZI, E.; COLLIVER, D.G. & PENNELL, K.G.
2017
US residential building air exchange rates: new perspectives to improve
decision making at vapor intrusion sites
Environmental science: Processes & impacts
19: 87 - 100
London
- REISINGER, J.; BURRIS, D. & ZELLERS, E.
2012
Application of advanced sensor technology to DoD soil vapor intrusion
problems
ESTCP Cost and performance report
VII + 34 S.
Arlington, VA
ESTCP Program Office
- REISINGER, J.; BURRIS, D. & ZELLERS, E.
2012
Application of advanced sensor technology to DoD soil vapor intrusion
problems
ESTCP Final report
XV + 101 S.
Arlington, VA
ESTCP Program Office

ROBINSON, N.I. & TURCZYNOWICZ, L.

2005

One- and three-dimensional soil transportation models for volatiles migrating from soils to house interiors

Transport in porous media

59: 301 - 323

Dordrecht / Boston, MA

RÖSSLER, F.A.

2013

Entwicklung eines effizienten Messverfahrens zur Bestimmung der Radonkonzentration als Indikator für die Qualität der Innenraumluft

XVIII + 167 S.

Gießen

MSc. Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, FH Mittelhessen

SAGUNSKI, H.

1996

Richtwerte für die Innenraumluft: Toluol

Bundesgesundheitsblatt

39: 416 - 421

Berlin

SAGUNSKI, H. & HEGER, W.

2004

Richtwerte für die Innenraumluft: Naphthalin

Bundesgesundheitsblatt

47: 705 - 712

Berlin

SAGUNSKI, H. & MANGELSDORF, I.

2005

Richtwerte für die Innenraumluft: Aromatenarme

Kohlenwasserstoffgemische (C9 - C14)

Bundesgesundheitsblatt

48: 803 - 812

Berlin

SANDERS, P.F. & HERS, I.

2006

Vapor intrusion in homes over gasoline-contaminated groundwater in Stafford, New Jersey

Ground water monitoring and remediation

26(1): 63 - 72

Westerville, OH

SCHULZ, C.; ULLRICH, D.; PICK-FUß, H.; SEIWERT, M.; CONRAD, A.; BRENSKE, K.-R.; HÜNKEN, A.; LEHMANN, A. & KOLOSSA-GEHRING, M.

2010

Kinder-Umwelt-Survey (KUS) 2003/06: Innenraumluft - Flüchtige organische Verbindungen in der Innenraumluft in Haushalten mit Kindern in Deutschland

Schriftenreihe Umwelt und Gesundheit

2010(3): 136

Dessau-Roßlau / Berlin

Umweltbundesamt

SCHUMACHER, B.; TRUESDALE, R. & LUTES, C.

2012

Fluctuation of indoor radon and VOC concentrations due to seasonal variations

getr. Zählung S.

Cincinnati, OH

EPA

SCHUVER, H.J. & STECK, D.J.

2015

Cost-effective rapid and long-term screening of chemical vapor intrusion (CVI) potential: across both space and time

Remediation

25(4): 27 - 53

New York

SEEGER, K.-J.

1999

Fachliche Grundlagen zur Beurteilung von flüchtigen organischen Substanzen in der Bodenluft bei Altlasten

Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz

263: II + 138

Wiesbaden

SEIFERT, B.

1999

Richtwerte für die Innenraumluft - Die Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert)

Bundesgesundheitsblatt

42: 270 - 278

Berlin

SEITZ, J.B.; HARMON, S.S. & WYMAN, C.

2016

USEPA's Vapor intrusion guidance could significantly expand the assessment and mitigation of vapor intrusion

Environmental claims journal

28: 75 - 81

Philadelphia, PA

SHEN, R.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.

2012

A numerical investigation of vapor intrusion - The dynamic response of contaminant vapors to rainfall events

Science of the total environment

437: 110 - 120

Amsterdam

SHEN, R.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.

2013

Influence of soil moisture on soil gas vapor concentration for vapor intrusion

Environmental engineering science

30: 628 - 637

Larchmont, NY

SHEN, R.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.

2014

Analytical modeling of the subsurface volatile organic vapor concentration in vapor intrusion

Chemosphere

95: 140 - 149

Oxford

SHEN, R. & SUUBERG, E.M.

2014

Analytical quantification of the subslab volatile organic vapor concentration from a non-uniform source

Environmental modelling and software

54: 1 - 8

Oxford

SHEN, R. & SUUBERG, E.M.

2016

Impacts of changes of indoor air pressure and air exchange rate in vapor intrusion scenarios

Building and environment

96: 178 - 187

Oxford

SIEGEL, L.

2015

Innocent until proven guilty: U.S. EPA's Petroleum vapor intrusion technical guide

8 S.

Mountain View, CA

CPEO

SIEGEL, L.

2015

Final at last: Notes on EPA's Vapor intrusion technical guide

17 S.

Mountain View, CA

CPEO

SIEGEL, L.

2016

Tales of Alhambra: Vapor intrusion

11 S.

Mountain View, CA

CPEO

SIEGEL, L.

2016

A stakeholder's guide to new construction at vapor intrusion sites

21 S.

Mountain View, CA

CPEO

SIEGEL, L.

2016

Avoiding vapor mitigation at Stanford Research Park housing, Palo Alto California

6 S.

Mountain View, CA

CPEO

SIEGEL, L.

2016

A stakeholder's guide to long-term management at vapor intrusion sites

20 S.

Mountain View, CA

CPEO

SILFER, B.E. & ROMANO, A.M.

2004

Vapor intrusion - just when you thought your site was cleaned up

Environmental claims journal

16: 257 - 263

Philadelphia, PA

SINGH, A.; NEUHAUSER, E.F.; AZZOLINA, N.A.; DISTLER, M.; ANDERS, K.M.;

DOROSKI, M.A. & RABIDEAU, A.J.

2013

Statistical techniques for analyzing of soil vapor intrusion data: A case study of manufactured gas plant sites

Journal of the Air and Waste Management Association

63: 219 - 229

Pittsburgh, PA

SOHR, A.

2001

Gefährdungsabschätzung, Pfad Luft

Handbuch zur Altlastenbehandlung im Freistaat Sachsen

6: 51

Dresden

SONG, S.; SCHNORR, B.A. & RAMACCIOTTI, F.C.

2014

Quantifying the influence of stack and wind effects on vapor intrusion

Human and ecological risk assessment

20: 1345 - 1358

Boca Raton, FL

SOUCY, N.C. & MUMFORD, K.G.

2017

Bubble-facilitated VOC transport from LNAPL smear zones and its potential effect on vapor intrusion

Environmental science and technology

51: 2795 - 2802

Easton, PA

TILLMAN, F.D. & WEAVER, J.W.

2005

Review of recent research on vapor intrusion

VI + 41 S.

Washington, DC

EPA

TILLMAN, F.D. & WEAVER, J.W.

2006

Uncertainty from synergistic effects of multiple parameters in the Johnson and Ettinger (1991) vapor intrusion model

Atmospheric environment

40: 4098 - 4112

Oxford

TILLMAN, F.D. & WEAVER, J.W.

2007

Parameter sets for upper and lower bounds on soil-to-indoor-air contaminant attenuation predicted by the Johnson and Ettinger vapor intrusion model
Atmospheric environment

41: 5797 - 5806

Oxford

TILLMAN, F.D. & WEAVER, J.W.

2007

Temporal moisture content variability beneath and external to a building and the potential effects on vapor intrusion risk assessment
Science of the total environment

379: 1 - 15

Amsterdam

TURCZYNOWICZ, L.; PISANIELLO, D. & WILLIAMSON, T.

2012

Health risk assessment and vapor intrusion: a review and Australian perspective

Human and ecological risk assessment

18: 984 - 1013

Boca Raton, FL

TURCZYNOWICZ, L. & ROBINSON, N.I.

2007

Exposure assessment modeling for volatiles - towards an Australian indoor vapor intrusion model

Journal of toxicology and environmental health. Part A

70: 1619 - 1634

Kensington, MD

U.S. EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) (ED.)

2002

OSWER Draft guidance for evaluating the vapor intrusion to indoor air pathway from groundwater and soils (subsurface vapor intrusion guidance)

51 S.

Washington, D.C.

EPA

U.S. EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) (ED.)

2002

Evaluating the vapor intrusion into indoor air

U.S. Environmental Protection Agency Fact sheet

2002-52: 2

Ada, OK

U.S. EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) (ED.)

2004

User's guide for evaluating subsurface vapor intrusion into buildings

XIV + 77 S.

Washington, D.C.

EPA

U.S. EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) (ED.)

2008

Indoor air vapor intrusion mitigation approaches

49 S.

Cincinnati, OH

U.S. EPA

U.S. EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) (ED.)
2012

EPA's Vapor intrusion database: evaluation and characterization of attenuation factors for chlorinated volatile organic compounds and residential buildings

XII + 72 S.

Washington, D.C.

OSWER

U.S. EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) (ED.)
2014

Vapor Intrusion Screening Level (VISL) calculator user's guide

11 S.

Washington, D.C.

EPA

U.S. EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) (ED.)
2015

Technical guide for addressing petroleum vapor intrusion at leaking underground storage tank sites

VI + 116 S.

Washington, D.C.

EPA

U.S. EPA (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) OFFICE OF UNDERGROUND STORAGE TANKS (ED.)
2014

Petroleum hydrocarbons and chlorinated solvents differ in their potential for vapor intrusion

13 S.

Washington, D.C.

EPA

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)
2007

Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten

Bundesgesundheitsblatt

50: 990 - 1005

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)
2007

Gesundheitliche Bewertung dioxinähnlicher polychlorierter Biphenyle in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

50: 1455 - 1466

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)
2008

Vergleichswerte für flüchtige organische Verbindungen (VOC und Aldehyde) in der Innenraumluft von Haushalten in Deutschland. Ergebnisse des repräsentativen Kinder-Umwelt-Surveys (KUS) des Umweltbundesamtes

Bundesgesundheitsblatt

51: 109 - 112

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2011

Richtwerte für Phenol in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

54: 1262 - 1268

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2012

Richtwerte für die Innenraumluft: erste Fortschreibung des Basisschemas

Bundesgesundheitsblatt

55: 279 - 290

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2012

Richtwerte für Kresole in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

55: 1061 - 1068

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2012

Richtwerte für Ethylbenzol in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

55: 1192 - 1200

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2012

Richtwerte für C9 - C15-Alkylbenzole in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

55: 1201 - 1214

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2013

Richtwerte für Naphthalin und Naphthalin-ähnliche Verbindungen in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

56: 1448 - 1459

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2014

Richtwerte für 1-Butanol in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

57: 733 - 743

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2015

Gesundheitliche Bewertung von Trichlorethen in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

58: 762 - 768

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2015

Gesundheitliche Bewertung krebserzeugender Verunreinigungen der Innenraumluft - erste Ergänzung zum Basisschema

Bundesgesundheitsblatt

58: 769 - 773

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2015

Stellungnahme der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) zu Luftreinigern

Bundesgesundheitsblatt

58: 1192

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2015

Richtwerte für Dimethylbenzole in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

58: 1378 - 1389

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2016

Richtwerte für Toluol und gesundheitliche Bewertung von C7-C8-Alkylbenzolen in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

59: 1522 - 1539

Berlin

UHLER, A.D.; MCCARTHY, K.J.; EMSBO-MATTINGLY, S.D.; STOUT, S.A. & DOUGLAS, G.S.

2010

Predicting chemical fingerprints of vadose zone soil gas and indoor air from non-aqueous phase liquid composition

Environmental forensics

11: 342 - 354

Orlando, FL

VAN WIJNEN, H.J. & LIJZEN, J.P.A.

2006

Validation of the VOLASOIL model using air measurements from Dutch contaminated sites. Concentrations of four chlorinated compounds

RIVM rapport

711701041: 58

Bilthoven

National Inst. for Public Health and the Environment (RIVM)

VAUPOTIC, J.; ANDJELOV, M. & KOBAL, I.

2002

Relationship between radon concentrations in indoor air and in soil gas

Environmental geology

42: 583 - 587

New York

VERGINELLI, I. & BACIOCCHI, R.

2014

Vapor intrusion screening model for the evaluation of risk-based vertical exclusion distances at petroleum contaminated sites

Environmental science and technology

48: 13263 - 13272

Easton, PA

VERGINELLI, I.; CAPOBIANCO, O.; HARTOG, N. & BACIOCCHI, R.

2017

Analytical model for the design of in situ horizontal permeable reactive barriers (HPRBs) for the mitigation of chlorinated solvent vapors in the unsaturated zone

Journal of contaminant hydrology

197: 50 - 61

Amsterdam

VERGINELLI, I.; YAO, Y. & SUUBERG, E.M.

2016

An Excel®-based visualization tool of two-dimensional soil gas concentration profiles in petroleum vapor intrusion

Ground water monitoring and remediation

36(2): 94 - 100

Westerville, OH

WANG, X.; UNGER, A.J.A. & PARKER, B.L.

2012

Simulating an exclusion zone for vapour intrusion of TCE from groundwater into indoor air

Journal of contaminant hydrology

140-141: 124 - 138

Amsterdam

WEAVER, J.W. & TILLMAN, F.D.

2005

Uncertainty and the Johnson - Ettinger model for vapor intrusion calculations

VIII + 33 S.

Washington, DC

EPA

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION) (Ed.)

o.J.

WHO Leitlinien für Innenraumluftqualität: ausgewählte Schadstoffe

11 S.

Geneva

WHO

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION) (Ed.)

2000

Air quality guidelines for Europe. 2nd edition

X + 273 S.

Copenhagen

WHO Regional Office for Europe

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION) (Ed.)

2010

WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants

XXV + 454 S.

Copenhagen

WHO

- WILSON, S.
2008
Modular approach to analysing vapour migration into buildings in the UK
Land contamination and reclamation
16(3): 223 - 236
Richmond
- WILSON, S.; ABBOT, A. & MALLETT, H.
2014
Guidance on the use of plastic membranes as VOC vapour barriers
CIRIA Publication
C748: 40
London
- WOLFF, T. & STIRN, H.
2000
Richtwerte für die Innenraumluft: Diisocyanate
Bundesgesundheitsblatt
43: 505 - 512
Berlin
- WONG, T.T. & AGAR, J.G.
2009
Development of a technically defensible soil gas sampling strategy for
vapour intrusion assessments
Canadian geotechnical journal
46: 102 - 113
Toronto
- WRIGHT, J.
2013
Petroleum hydrocarbon vapour intrusion assessment - Australian guidance
CRC CARE Technical Report
23: VIII + 36
Adelaide
- WRIGHT, R. & ILLASZEWICZ, J.
2009
Vapor intrusion into large commercial/industrial facilities
Environmental claims journal
21: 73 - 81
Philadelphia, PA
- YAO, Y.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.
2012
Estimation of contaminant subslab concentration in vapor intrusion
Journal of hazardous materials
231-232: 10 - 17
Amsterdam
- YAO, Y.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.
2013
Simulating the effect of slab features on vapor intrusion of crack entry
Building and environment
59: 417 - 425
Oxford

YAO, Y.; SHEN, R.; PENNEL, K.G. & SUUBERG, E.M.

2013

A numerical investigation of oxygen concentration dependence on biodegradation rate laws in vapor intrusion

Environmental science: Processes & impacts

15: 2345 - 2354

London

YAO, Y.; SHEN, R.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.

2011

Comparison of the Johnson - Ettinger vapor intrusion screening model predictions with full three-dimensional model results

Environmental science and technology

45: 2227 - 2235

Easton, PA

YAO, Y.; SHEN, R.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.

2013

Examination of the influence of environmental factors on contaminant vapor concentration attenuation factors using the U.S. EPA's vapor intrusion database

Environmental science and technology

47: 906 - 913

Easton, PA

YAO, Y.; SHEN, R.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.

2013

Examination of the U.S. EPA's vapor intrusion database based on models

Environmental science and technology

47: 1425 - 1433

Easton, PA

YAO, Y.; SHEN, R.; PENNELL, K.G. & SUUBERG, E.M.

2013

A review of vapor intrusion models

Environmental science and technology

47: 2457 - 2470

Easton, PA

YAO, Y.; VERGINELLI, I. & SUUBERG, E.M.

2016

A two-dimensional analytical model of petroleum vapor intrusion

Water resources research

52: 1528 - 1539

Washington, D.C.

YAO, Y.; VERGINELLI, I. & SUUBERG, E.M.

2017

A two-dimensional analytical model of vapor intrusion involving vertical heterogeneity

Water resources research

53: 4499 - 4513

Washington, D.C.

YAO, Y.; WU, Y.; SUUBERG, E.M.; PROVOOST, J.; SHEN, R.; MA, J. & LIU, J.

2015

Vapor intrusion attenuation factors relative to subslab and source,
reconsidered in light of background data

Journal of hazardous materials

286: 553 - 561

Amsterdam

YAO, Y.; WU, Y.; WANG, Y.; VERGINELLI, I.; ZENG, T.; SUUBERG, E.M.; JIANG, L.;
WEN, Y. & MA, J.

2015

A petroleum vapor intrusion model involving upward advective soil gas flow
due to methane generation

Environmental science and technology

49: 11577 - 11585

Easton, PA

YAO, Y.; YANG, F.; SUUBERG, E.M.; PROVOOST, J. & LIU, W.

2014

Estimation of contaminant subslab concentration in petroleum vapor
intrusion

Journal of hazardous materials

279: 336 - 347

Amsterdam

YU, S.; UNGER, A.J.A. & PARKER, B.

2009

Simulating the fate and transport of TCE from groundwater to indoor air

Journal of contaminant hydrology

107: 140 - 161

Amsterdam

ZEDDEL, A.; MACHTOLF, M.; BARKOWSKI, D. & SOHR, A.

2002

Leichtflüchtige Schadstoffe im Boden - orientierende Hinweise zur
Bewertung von Stoffkonzentrationen in der Bodenluft beim Wirkungspfad

Boden - Innenraumluft - Mensch für Wohngebiete

Altlasten Spektrum

11: 78 - 88

Berlin

ZIMMERMAN, J.H.; LUTES, C.; COSKY, B.; SCHUMACHER, B.; SALKIE, D. &
TRUESDALE, R.

2017

Temporary vs. permanent sub-slab ports: A comparative performance study

Soil and sediment contamination

o.S. S.

London

ZMICH, K.

2004

Vapor intrusion into indoor air: a case study of proposed new requirements

Environmental claims journal

16: 81 - 86

Philadelphia, PA

ZMICH, K.A. & ALBERTIN, C.D.

2005

Vapor intrusion part II - the fundamental elements of an effective vapor intrusion assessment

Environmental claims journal

17: 97 - 105

Philadelphia, PA

- AKBARIYEH, S.; PATTERSON, B.M.; KUMAR, M. & LI, Y.
2016
Quantification of vapor intrusion pathways: an integration of modeling and site characterization
Vadose zone journal
15(10): o.S.
Madison, WI
- ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS) (ED.)
2011
ASTM Standards on indoor air quality. 4th Edition
West Conshohocken, PA
ASTM
- AWMA (AIR AND WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION) (ED.)
2010
Vapor intrusion 2010
o.S. S.
Red Hook, NY
Curran
- AYOKO, G.A. & WANG, H.
2014
Volatile organic compounds in indoor environments
Handbook of environmental chemistry
1 - 39 S.
Cham
Springer
- BAKER, K.; HAYWARD, H.; POTTER, L.; BRADLEY, D. & MACLEOD, C.
2009
The VOCs Handbook. Investigating, assessing and managing risks from inhalation of VOCs at land affected by contamination
CIRIA Publication
C682: 215
London
- BEKELE, D.N.; NAIDU, R.; BOWMAN, M. & CHADALAVADA, S.
2013
Vapor intrusion models for petroleum and chlorinated volatile organic compounds: opportunities for future improvements
Vadose zone journal
12(2): o.S.
Madison, WI
- BGA (BUNDESGESUNDHEITSAMT) (HRSG.)
1988
Empfehlung des Bundesgesundheitsamtes zu Tetrachlorethen in der Innenraumluft
Bundesgesundheitsblatt
30: 99 - 101
Berlin
- CAVALERI, N.
2005
Etude des transferts de vapeurs de trichloroéthylène à travers des bétons insaturés représentatifs de chape béton d'habitations ou d'ateliers industriels
76 S.
Toulouse
Dess. Burgeap

CHEN, J. & FORD, K.L.

2017

A study on the correlation between soil radon potential and average indoor radon potential in Canadian cities

Journal of environmental radioactivity

166: 152 - 156

London

DERLER, P.

2015

Bauwerksabdichtung: Planung, Prävention, Mängelbeseitigung

364 S.

Kissing

Weka

DILLON, B.M. & TOBIN, L.M.

2007

Vapor intrusion: implications for environmental due diligence

Environmental quality management

17(1): 53 - 64

New York

FUGLER, D. & ADOMAIT, M.

1997

Indoor infiltration of volatile organic contaminants: measured soil gas entry rates and other research results for Canadian houses

Journal of soil contamination

6: 9 - 13

Boca Raton, FL

GOLDMAN, D.; MARNICIO, R.; DOCTOR, W. & DUDUS, L.

2006

Comparing air measurements and air modeling at a residential site overlying a TCE groundwater plume

Calabrese et al.

131 - 143 S.

New York, NY

Springer

HADDAD, S.; TARDIF, G.-C. & TARDIF, R.

2006

Development of physiologically based toxicokinetic models for improving the human indoor exposure assessment to water contaminants:

Trichloroethylene and trihalomethanes

Journal of toxicology and environmental health. Part A

69: 2095 - 2136

Kensington, MD

HARTMAN, B.

2010

The vapor-intrusion pathway: petroleum hydrocarbon issues

LUSTLine Bulletin

66: 18 - 22

Lowell, MA

New England Interstate Water Pollution Control Commission

HAY WILSON, L.; JOHNSON, P.C. & ROCCO, J.R.

2005

Collecting and interpreting soil gas samples from the vadose zone: A practical strategy for assessing the subsurface-vapor-to-indoor-air migration pathway at petroleum hydrocarbon sites

API Publication

4741: VIII + 66

Washington, D.C.

API

HE, Z.; YANG, Y. & LEWIS, R.G.

2013

Groundwater as a source of hydrogen sulfide in indoor air in central and south Florida

Environmental engineering science

30: 142 - 151

Larchmont, NY

HUI, P.S.; WONG, L.T. & MUI K.W.

2007

Evaluation of professional choice of sampling locations for indoor air quality assessment

Building and environment

42: 2900 - 2907

Oxford

JELLE, B.P.

2012

Development of a model for radon concentration in indoor air

Science of the total environment

416: 343 - 350

Amsterdam

JOHNSON, R.

2001

Protective measures for housing on gas-contaminated land

IV + 66 S.

London

BRE

KNIGHT, J.H. & DAVIS, G.B.

2013

A conservative vapour intrusion screening model of oxygen-limited hydrocarbon vapour biodegradation accounting for building footprint size

Journal of contaminant hydrology

155: 46 - 54

Amsterdam

KOLARŽ, P.; VAUPOTIC, J.; KOBAL, I.; UJIC, P.; STOJANOVSKA, Z. & ŽUNIC, Z.S.

2017

Thoron, radon and air ions spatial distribution in indoor air

Journal of environmental radioactivity

173: 70 - 74

London

KRYLOV V.V. & FERGUSON C.C.

1998

Contamination of indoor air by toxic soil vapours: effects of subfloor ventilation and other protective measures

Building and environment

30: 331 - 347

Oxford

KRZYZANOWSKI, M.

2008

WHO air quality guidelines for Europe

Journal of toxicology and environmental health. Part A

71: 47 - 50

Kensington, MD

LEVIN, H. (ED.)

2002

Indoor air 2002: proceedings: 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, California, June 30 - July 5, 2002. 5 Bände
o.S. S.

Santa Cruz, CA

International Academy of Indoor Air Sciences

LEVSEN, K.

1998

Die Belastung des Menschen durch Benzol und andere aromatische Kohlenwasserstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Beitrages der Innenraumluft

347 S.

Hannover

Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Aerosolforschung

LINK, B.

1999

Empfehlungen: Richtwerte für die Innenraumluft - Quecksilber

Bundesgesundheitsblatt

42: 168 - 174

Berlin

MALLET, H.; COX, L.; WILSON, S. & CORBAN, M.

2014

Good practice on the testing and verification of protection systems for buildings against hazardous ground gases

CIRIA Publication

C735: 130

London

MARONI, M.; SEIFERT, B. & LINDVALL, T. (EDS.)

1995

Indoor air quality: a comprehensive reference book

IL + 1049 S.

Amsterdam

Elsevier

MCALARY, T.A.; PROVOOST, J. & DAWSON, H.E.

2011

Vapor intrusion

Swartjes, F.A.

409 - 453 S.

Dordrecht

Springer

MINKIN, L.

2001

Thermodiffusion in concrete slab as a driving force of indoor radon entry

Health physics

80: 151 - 156

New York

MOSE, D.G. & MUSHRUSH, G.W.

1999

Comparisons between soil radon and indoor radon

Energy sources

21: 723 - 731

Philadelphia, PA

MUSIELAK, M.

2009

Etude des transferts de polluant (TCE) du sol à l'air ambiant, en passant au travers de béton

o.S. S.

Toulouse

Master Internship report, National Agronomic School of Toulouse

NAGAOSA, R.S.

2014

A new numerical formulation of gas leakage and spread into a residential space in terms of hazard analysis

Journal of hazardous materials

271: 266 - 274

Amsterdam

NAZAROFF, W.W.

1988

Predicting the rate of ²²²Rn entry from soil into the basement of a dwelling due to pressure-driven air flow

Radiation protection dosimetry

24: 199 - 202

Oxford

PHILLIPS, W.; CARLSON, R. & BOBEN, C.

2002

Background sources of benzene complicate indoor air sampling at a petroleum release site

Environmental claims journal

14: 223 - 233

Philadelphia, PA

RAMOLA, R.C.; PRASAD, G. & GUSAIN, G.S.

2011

Estimation of indoor radon concentration based on radon flux from soil and groundwater

Applied radiation and isotopes

69: 1318 - 1321

Oxford

SCHIMMING, E.

1998

Die Belastung des Menschen durch Benzol und andere aromatische Kohlenwasserstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Beitrages der Innenraumluft

239 S.

Göttingen

Cuvillier

SEIFERT, B.

1982

Indoor air concentrations of benzene and some other aromatic hydrocarbons?

Ecotoxicology and environmental safety

6: 190 - 192

San Diego, CA

SYMMS, K.G.; LAWRENCE, K.G.; WARDROP, D.H. & VITALE, R.J.

1995

Modeling Voc migration and vapor intrusion into building indoor air from subsurface soil sources

Soil and environment

5: 551 - 556

Dordrecht

Kluwer

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2013

Richtwerte für Methylisobutylketon in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

56: 148 - 158

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2013

Richtwerte für Glykolether und Glykolester in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

56: 286 - 320

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2013

Richtwerte für 2-Ethylhexanol in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

56: 590 - 599

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2013

Richtwerte für Acetaldehyd in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

56: 1434 - 1447

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2014

Gesundheitlich-hygienische Beurteilung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft mithilfe von Geruchsleitwerten

Bundesgesundheitsblatt

57: 148 - 153

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2014

Richtwerte für 1-Methyl-2-pyrrolidon in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

57: 1232 - 1241

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2014

Richtwerte für Ethylacetat in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

57: 1442 - 1450

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2015

Richtwerte für Butanonoxim in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

58: 505 - 512

Berlin

UBA (UMWELTBUNDESAMT) (HRSG.)

2016

Richtwert für Formaldehyd in der Innenraumluft

Bundesgesundheitsblatt

59: 1040 - 1044

Berlin

VÁZQUEZ, B.F.; ADÁN, M.O.; PONCELA, L.S.Q.; FERNANDEZ, C.S. & MERINO, I.F.

2011

Experimental study of effectiveness of four radon mitigation solutions, based on underground depressurization, tested in prototype housing built in a high radon area in Spain

Journal of environmental radioactivity

102: 378 - 385

London

VERGINELLI, I. & BACIOCCHI, R.

2011

Modeling of vapor intrusion from hydrocarbon-contaminated sources accounting for aerobic and anaerobic biodegradation

Journal of contaminant hydrology

126: 167 - 180

Amsterdam

VERGINELLI, I.; CAPOBIANCO, O. & BACIOCCHI, R.
2016
Role of the source to building lateral separation distance in petroleum vapor intrusion
Journal of contaminant hydrology
189: 58 - 67
Amsterdam

VERGINELLI, I.; YAO, Y.; WANG, Y.; MA, J. & SUUBERG, E.M.
2016
Estimating the oxygenated zone beneath building foundations for petroleum vapor intrusion assessment
Journal of hazardous materials
312: 84 - 96
Amsterdam

VIVEIROS, F.; FERREIRA, T.; SILVA, C. & GASPAR, J.L.
2009
Meteorological factors controlling soil gases and indoor CO2 concentration: A permanent risk in degassing areas
Science of the total environment
407: 1362 - 1372
Amsterdam

WILLIAMS D.R.; PASLAWSKI J.C. & RICHARDSON G.M.
1996
Development of a screening relationship to describe migration of contaminant vapors into buildings
Journal of soil contamination
5: 141 - 156
Boca Raton, FL

WILSON, S.; OLIVER, S.; MALLETT, H.; HUTCHINGS, H. & CARD, G.
2007
Assessing risks posed by hazardous ground gases to buildings (revised)
CIRIA Publication
C665: XVIII + 183
London

WOZNIAK, A. & LAWLESS, C.
2006
Case study of TCE attenuation from groundwater to indoor air and the effects of ventilation on entry routes
Calabrese et al.
493 - 504 S.
New York, NY
Springer

YAO, Y.; SHEN, R.; PENNELL, K.G.; & SUUBERG, E.M.
2013
Estimation of contaminant subslab concentration in vapor intrusion including lateral source - building separation
Vadose zone journal
12(3): o.S.
Madison, WI

YAO, Y.; WANG, Y.; VERGINELLI, I.; SUUBERG, E.M. & YE, J.

2016

Comparison between PVI2D and Abreu - Johnson's Model for Petroleum Vapor Intrusion Assessment

Vadose zone journal

15(11): o.S.

Madison, WI

YAO, Y.; WU, Y.; TANG, M.; WANG, Y.; WANG, J.; SUUBERG, E.M.; JIANG, L. & LIU, J.

2015

Evaluation of site-specific lateral inclusion zone for vapor intrusion based on an analytical approach

Journal of hazardous materials

298: 221 - 231

Amsterdam