



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Thoronmålinger til identifikation af indtrængningsveje fra poreluft til indeklima

Miljøprojekt nr. 1453

Titel:

Thoronmålinger til identifikation af
indtrængningsveje fra poreluft til indeklima

Redaktion:

Jesper Bruun Petersen, Henrik Engdal Steffesen, Mette Neerup
Jeppesen, Niras A/S, VIA University College, Horsens, Børge
Hvidberg, Region Midtjylland

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

År:

2012

ISBN nr.

978-87-92903-72-3

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

FORORD	7
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	9
1.1 BAGGRUND OG FORMÅL	9
1.2 UNDERSØGELSEN	9
1.3 HOVEDKONKLUSIONER	10
SUMMARY AND CONCLUSIONS	12
1.1 BACKGROUND AND OBJECTIVE	12
1.2 THE INVESTIGATION	12
1.3 PRINCIPAL CONCLUSIONS	13
2 INDLEDNING	15
2.1 LÆSEVEJLEDNING	16
3 GENERELLE PROBLEMSTILLINGER	17
3.1 EMANATION	17
3.2 INDTRÆNGNING AF PORELUFT TIL INDEKLIMAET	18
3.2.1 <i>Drivkræfter</i>	19
3.3 DIFFUSIV OG ADVEKTIV TRANSPORT AF THORON	20
3.3.1 <i>Diffusiv transportlængde</i>	20
3.3.2 <i>Advektiv transportlængde</i>	22
3.3.3 <i>Total migrationslængde</i>	22
3.4 RADIOAKTIVE STOFFER I INDEKLIMAET	23
3.4.1 <i>Bygningsmaterialer</i>	24
4 METODE- OG UDSTYRSBESKRIVELSE	26
4.1 OVERORDNET METODEBESKRIVELSE	26
4.2 UDSTYR	26
4.2.1 <i>RAD7</i>	26
4.2.2 <i>Trykdifferensmåler</i>	28
4.2.3 <i>Flowmåler</i>	28
4.3 MÅLING I UDVALGTE PUNKTER	28
4.4 TOLKNING AF RESULTATER	29
4.5 USIKKERHEDER	31
4.5.1 <i>Radon vs. thoron som tracer</i>	32
4.6 INSTALLATION AF BLOWERDOOR	33
5 UNDERSØGELSESPROGRAM OG LOKALITETER	34
5.1 UNDERSØGELSESPROGRAM	34
6 UNDERSØGELSESRISULTATER	36
6.1 INDLEDENDE METODEUDVIKLING (DELUNDERSØGELSE 1)	36
6.2 RESULTATER FRA DELUNDERSØGELSE 2	37
6.3 RESULTATER FRA DELUNDERSØGELSE 3	38
6.3.1 <i>Frederiksbjerg Torv</i>	39
6.3.2 <i>Østergade</i>	40
7 VURDERING AF MÅLEDATA	43

7.1	OVERORDNEDE VURDERINGER	43
7.2	SAMMENFATNING, PÅVISTE INDTRÆNGNINGSPUNKTER	43
7.3	MÅLING UNDER NATURLIGT VARIERENDE FORHOLD	44
7.3.1	<i>Variationer i trykdifferens</i>	44
7.3.2	<i>Variierende indtrængning i samme målepunkt</i>	46
7.3.3	<i>Indtrængning ved radiatorroset</i>	48
7.4	MÅLING UNDER KONTROLLEREDE FORHOLD	48
7.4.1	<i>Øget indtrængning ved øget trykdifferens</i>	49
7.4.2	<i>Forskelle i trykdifferens</i>	49
7.5	METODEEVALUERING	50
7.5.1	<i>Fejlkilder og fejlfortolkning</i>	51
7.5.2	<i>Opsamling</i>	52
8	METODENS ANVENDELIGHED	54
8.1	THORON SOM SPORGAS FOR INDTRÆNGENDE PORELUFT	54
8.2	ANBEFALINGER FOR FREMTIDIG ANVENDELSE AF METODEN	55
8.2.1	<i>Måleprogram</i>	55
9	REFERENCELISTE	57

BILAGSFORTEGNELSE:

BILAG 1: Henfaldskæder

BILAG 2: Situationsplaner

- BILAG 2.1: Delundersøgelse 2, lille hus, Peder Kællers vej
- BILAG 2.2: Delundersøgelse 2, stort hus, Peder Kællers vej
- BILAG 2.3: Delundersøgelse 3, Frederiksbjerg Torv, Århus
- BILAG 2.4: Delundersøgelse 3, Østergade, Spøttrup

BILAG 3: Grafisk præsentation

- BILAG 3 Læsevejledning til bilag 3
- BILAG 3.1: Delundersøgelse 1
- BILAG 3.2: Delundersøgelse 2
- BILAG 3.3: Delundersøgelse 3
- BILAG 3.4: Delundersøgelse 3 – trykdata
- BILAG 3.5: Temablad: variation i målepunkt

BILAG 4: Fotos

- BILAG 4.1: Delundersøgelse 2, Peder Kællers vej
- BILAG 4.2: Delundersøgelse 3, Frederiksbjerg Torv, Århus
- BILAG 4.3: Delundersøgelse 3, Østergade, Spøttrup

BILAG 5: Datablade

- BILAG 5.1: Tryklogger GMSD 2,5 MR
- BILAG 5.2: Tryklogger Micatrone MF-P
- BILAG 5.3: Vindmåler SwemaAir 40

BILAG 6: Lokalteter

Forord

Denne rapport har til formål at introducere og beskrive en metode til lokalisering af advektive spredningsveje for flygtig forurening fra poreluften under gulvet til indeklimaet. Metoden tager udgangspunkt i naturligt forekommende radioaktive isotoper, der findes i enhver jordart overalt i Danmark.

Projektet er gennemført i perioden september 2009 til maj 2010 og indeholder metodeudvikling og –afprøvning på en række forskellige lokaliteter. I projektet er benyttet lokaliteter som både er påvist påvirket i indeklimaet fra en underliggende forurening og lokaliteter uden forurening. I begge tilfælde vil der til stadighed forekomme indtrængning af den naturlige, radioaktive, kræftfremkaldende gasart radon, herunder en isotop af denne, thoron. Det er netop denne indtrængning, der i projektet anvendes til at spore indtrængningsveje.

Projektet er gennemført af NIRAS A/S for Region Midtjylland og er primært finansieret af Miljøstyrelsens Teknologipulje for jord- og grundvandsforurening. En del af projektaktiviteterne er gennemført ved hjælp af udstyr venligst udlånt af VIA University College v. lektor Inga Sørensen. Samtlige projektaktiviteter er udført af NIRAS A/S.

Sammenfatning og konklusioner

1.1 BAGGRUND OG FORMÅL

I forbindelse med Miljøprojekt nr. 1094, 2006 /1/ og ATV's temadag "Poreluft og indeklima – Hvordan er de to koblet?" /2/ samt Miljøprojekt /3/ er der redegjort for, at radonmålinger kan anvendes til at fastlægge en dæmpningsfaktor for et givent betondæk. I /1/ er det endvidere konkluderet, at radon er en anvendelig indikator til at påvise poreluftindtrængning til indeklimaet, blandt andet fordi radon i poreluften forekommer i koncentrationer som er op til 10.000 gange højere end koncentrationer i udeluften. Desuden er det i litteraturen foreslået, at måling af thoron muligvis kan benyttes til sporing af luftbevægelser og transport af radon til indeklimaet /9/.

Thoron er en isotop af radon (^{222}Rn). Thoron (^{220}Rn) har en meget kort halveringstid ($T_{\frac{1}{2}^{220}\text{Rn}} = 56 \text{ s}$). Til sammenligning har radon en halveringstid på ca. 3,8 døgn. Ligesom radon findes thoron overalt i poreluften i højere eller lavere koncentrationer, afhængig af jordens beskaffenhed.

Grundet thorons korte halveringstid er stoffets diffusionslængde (se afsnit 3) meget kort, hvilket umuliggør en længere diffusiv transport af stoffet. En påvisning af thoron i indeklimaet vil derfor være et udtryk for at thoron trænger ind via advektive indtrængningsveje – revner, sprækker og andre utætheder hvor poreluften uhindret kan strømme fra undergrunden til indeklimaet.

Projektets primære formål er at udvikle og afprøve en metode til, vha. thoronmålinger, at lokalisere advektive indtrængningspunkter for poreluft til indeklimaet.

1.2 UNDERSØGELSEN

Projektet har indledningsvist indeholdt en erfaringsopsamling fra allerede udførte målinger i andet projektregi, samt litteraturstudie af relevante internationale erfaringer. Desuden indeholder projektet feltmålinger af thoron og radon i indeklimaet på 21 lokaliteter. 17 af disse er enfamiliehuse med terrændæk. De resterende 4 lokaliteter er etagebyggeri hvor der er målt i nederste etage. 5 af de 21 lokaliteter er forurenede med olie eller chlorerede opløsningsmidler. Forureningssituationen og afværgeindsatsen på de 5 forskellige lokaliteter er alle beskrevet i selvstændige miljørapporter /28, 29, 43, 44, 46, 48, 49/.

Undersøgelsens feltarbejde er inddelt i 3 delundersøgelser hvis omfang er følgende:

Subproject 1. Indledende metodeudvikling, 17 lokaliteter

Subproject 2. Specifik metodeafprøvning, 9 lokaliteter

Subproject 3. Metodeafprøvning med supplerende målinger, 2 lokaliteter

Hvor delundersøgelserne 1 og 2 alene omfatter thoronmålinger, er der i delundersøgelse 3 tillige indeholdt samtidig måling vha. termografi, sporgas og PID-gasdetektoren ppBRAE. En samlet rapport med sammenligninger af de forskellige metoder for sporing af indtrængning af poreluft til indeklimaet findes i /54/.

Feltarbejde i forbindelse med denne undersøgelse er udført i perioden september 2009 til maj 2010.

Projektet er udført for Region Midtjylland af NIRAS A/S og indgår i Miljøstyrelsens Teknologipulje for jord- og grundvandsforurening.

1.3 HOVEDKONKLUSIONER

Thoron kan bruges som sporgas. Metoden inkluderer målinger af både radon- og thoronkoncentrationer, eller rettere; indholdet af polonium-radioisotoperne ^{216}Po og ^{218}Po i målepunktet. Det meget kortlivede henfaldsprodukt fra thoron, ^{216}Po , benyttes som den primære tracer, idet både thoron og henfaldsproduktet ^{216}Po har så korte halveringstider, at ^{216}Po ikke vil trænge ind i indeklimaet i større mængder. Det er således kun thoron og ^{216}Po , der vil afsætte et markant koncentrationsspor ved indtrængningsstedet, som ikke kan være en falsk-positiv. Radon og det henfaldsprodukt ^{218}Po har for lange halveringstider til med sikkerhed at indikere indtrængning, og bruges ved denne målemetode derfor mere som en verificering.

Målemetoden, som er benyttet i dette projekt, vurderes direkte at kunne benyttes til identifikation af indtrængningsveje af flygtige forureningsstoffer fra poreluft til indeklima.

Ved undersøgelserne er der primært fundet indtrængning af poreluft til indeklimaet ved rørgennemføringer og lignende installationer samt ved skader i gulvkonstruktionen. Det anbefales at der rettes et særligt fokus på disse risikopunkter ved fremtidige undersøgelser.

Ved undersøgelserne er det fundet, at indtrængning af poreluft primært er afhængig af trykdifferensen mellem indeluft og under gulv; et forhold styret af gulvkonstruktionens tæthed samt eksterne påvirkninger som temperaturer og vindforhold. Trykdifferensen er tidslig varierende. Det anbefales derfor, at der foretages en udvikling af en standardiseret metode til trykdifferensmåling til brug ved fremtidige indeklimatemålinger.

Thoronmålinger, som udført i dette projekt, vurderes at give et godt billede af indtrængningsmønstre til indeklimaet. Under danske forhold vil der normalt være et svagt undertryk i bygninger i forhold til både udeluften og det kapillarbrydende lag. Trykforskellen mellem indeklimaet og det kapillarbrydende lag kan dog variere fra rum til rum og også over tid. Det er derfor vigtigt at registrere denne trykforskel i forbindelse med målingerne. En blowerdoor kan benyttes til at øge undertrykket og dermed indtrængningen af poreluft til indeklimaet, men ulempen er, at en blowerdoor kan generere en indtrængning af poreluft gennem indtrængningspunkter som normalt er inaktive eller mindre dominerende. Der kan dog forekomme situationer, hvor der ikke forekommer et relativt undertryk i den pågældende bygning, og hvor det således kan være en god ide at anvende blowerdoor, men det bør overvejes i den enkelte sag. Det anbefales, som dokumentation for trykforholdende på

den givne lokalitet, at registrere trykdifferensen mellem indeklima og forholdene under gulvet.

Summary and Conclusions

1.1 BACKGROUND AND OBJECTIVE

In connection with the Danish Environmental Protection Agency's project no. 1094, 2006 /1/ and the ATV-foundation feature day "Soil Gas and Indoor Climate – how are the Two Connected?" /2/ it has been described that radon measurements can be applied to establish an attenuation factor for a given concrete floor. In /1/, it is further concluded that radon is a useful indicator for the detection of soil gas intrusion into indoor air, partly because radon in soil gas is present in concentrations up to 10,000 times higher than those in outdoor air. Moreover, it has been suggested that measurements of thoron may be used to track air movement and transport of radon to indoor air /9/.

Thoron is an isotope of radon (^{222}Rn) with a very short half-life ($T_{1/2}^{220\text{Rn}} = 56$ seconds). In comparison, the half-life of radon is approximately 3,8 days. Like radon, thoron exists everywhere in the soil gas in higher or lower levels of concentration depending on soil conditions.

Due to the short half-life of thoron, its diffusion length (see section 3) is very short, thus impeding prolonged diffusive transport. Detecting thoron in the indoor air will hence indicate the intrusion of thoron via advective pathways; cracks and other leakages where soil gas flows freely from the subsurface to the indoor air.

The primary objective of this project is to develop and test a method using thoron measurements to locate advective intrusion pathways of soil gas into indoor air.

1.2 THE INVESTIGATION

Initially, the project included a compilation of experiences from already performed measurements in other project frameworks and a review of relevant international literature. Furthermore, the project contains field measurements of thoron and radon in indoor air at 21 locations, of which 17 are single family houses with concrete floors. The remaining 4 sites are multi-storey buildings where measurements were performed in the bottom floor. 5 of the 21 sites are contaminated with NAPLs.

The pollution situation and remedial actions taken at the 5 different sites are all described in separate environmental reports /28, 29, 43, 44, 46, 48, 49/.

The fieldwork of the project is divided into 3 substudies containing the following:

- Substudy 1. Initial method development, 17 locations
- Substudy 2. Specific method testing, 9 locations
- Substudy 3. Method testing and additional measurements, 2 locations

Where sub study 1 and 2 comprised thoron measurements only, sub study 3 includes simultaneous investigations using thermography, tracer gas and PID-gas tracer ppbRAE measurements. A comprehensive report comparing the various methods for detecting intrusion pathways for soil gas to indoor air can be found in /54/.

Fieldwork for this project was carried out from September 2009 to May 2010. The project was carried out for Central Denmark Region by NIRAS A/S as a part of the Danish Environmental Protection Agency's Technology Fund for Soil and Groundwater Contamination.

1.3 PRINCIPAL CONCLUSIONS

Thoron can be used as a tracer gas. The method includes measurements of both radon and thoron concentrations, or rather, the content of the polonium-radioisotopes ^{216}Po and ^{218}Po at the measuring point. The very short-lived decay product of thoron, ^{216}Po , is used as the primary tracer since the short half-lives of both thoron and ^{216}Po make it impossible for ^{216}Po to enter the indoor air in large quantities. Thus it is only thoron and ^{216}Po which will leave a clear non-false-positive concentration trace at the point of intrusion. Radon and its decay product ^{218}Po are too long-lived to accurately indicate intrusion, and are used merely as verification when using the described technique.

The measurement methodology used in this project is estimated as suitable for the assessments of intrusion of volatile contaminants into a given indoor environment.

In the field tests, intrusion of soil gas into indoor air has primarily been found at pipe ducts and similar installations as well as by cracks in the floor construction. Emphasis on such points of elevated risk is recommended in future studies.

Intrusion of soil gas is found to be mainly dependent on the differential pressure of inside air versus sub slab soil gas. This pressure difference is governed by the structural density of the floor and external influences such as temperatures and wind conditions. The pressure difference is a temporal variable. Therefore, the development of a standardized method for measuring this pressure difference is recommended for future indoor air investigations.

Thoron measurements, as conducted in this project, present a good understanding of intrusion pathways to the indoor air. In Danish condition, the indoor air is typically depressurized relative to outdoor or sub slab air. The pressure difference between the indoor and sub slab air can vary in time and from room to room, stressing the need for pressure difference measurements during the investigation. A blower door may be used to scale the depressurization and thus the flow of soil gas to the indoor air. The disadvantage of using this technique, however, is that intrusion of soil gas may be forced through usually inactive or recessive pathways. A situation with no depressurized indoor air might arise, thus opting for a blower door installation, but this should be deliberated in the individual case. It is recommended to register the pressure difference between the indoor and sub slab air as documentation for pressure and flow conditions in the given case.

2 Indledning

Thoron (^{220}Rn) er en radioaktiv ædelgas, der formes af naturligt forekommende thorium (^{232}Th), der eksisterer overalt i Jordens lithosfære. Thorium er med en halveringstid på ca. 14 milliarder år svagt radioaktivt, og gennem en serie af henfald (henfaldskæde, se bilag 1) stabiliseres stoffet som en bly-isotop.

Et radioaktivt henfald forekommer, når en ustabil (radioaktiv) isotop omdannes til en mere eller mindre stabil isotop (datterprodukt), ved udsendelse af en subatomar partikel, eksempelvis en alfa- eller betapartikel. Thoron dannes, når isotopen ^{224}Ra med en halveringstid på 3,7 dage, henfalder ved udsendelse af alfastråling.

Thoron er en isotop af radon (^{222}Rn). Forskellen på de to stoffer er, at thoron indeholder to færre neutroner i atomkernen, hvilket medfører uensartede halveringstider for de to stoffer. Stofferne har herudover ens kemiske egenskaber. Ligesom radon henfalder thoron ved udsendelse af alfastråling, og ligesom for radon er thorons datterprodukter kræftfremkaldende ved eksponering i indeklimaet.

Hensigten med dette projekt er ikke at undersøge forhold af sundhedsmæssig karakter. Der findes flere udenlandske studier der beskæftiger sig med denne omstændighed. Hensigten er derimod at benytte den naturlige forekomst af thoron, som en sporgas til undersøgelse af porelufts indtrængning til indeklimaet i huse. På grund af thorons korte halveringstid vil gassen kun eksistere i umiddelbar nærhed af et indtrængningspunkt for poreluft fra jorden. I større afstand fra indtrængningspunktet vil gassen på grund af dens korte halveringstid være henfaldet og omdannet til det radioaktive metal polonium (^{216}Po). Til forskel fra litteraturens studier om thoron og distribution af thorondøtre i indeklimaet (eksempelvis /13 – 18/), måles der i dette projekt direkte på thorongassen. Det er derfor forekomst af thoron og ikke thorondøtre, der måles på, hvilket er essentielt, idet thoron pga. det hurtige henfald ulig radon ikke distribueres uniformt i indeklimaet, se afsnit 3. Dette gør, at thoronforekomst er indikation på utætheder, hvor der sker konventiv indtrængning af poreluft.

I Danmark findes mange lokaliteter, hvis undergrund er forurenede af menneskelige aktiviteter. Det kan eksempelvis være oliespild i forbindelse med utætte villatanke eller forurening med chlorerede opløsningsmidler på en gammel renserigrund. En sådan forurening kan på sigt give sundhedsmæssige problemer for indeklimaet i bebyggelserne på disse lokaliteter, idet flygtige organiske forureningskomponenter (VOC'er) via poreluften kan strømme fra undergrunden til indeklimaet. Denne indtrængningsmekanisme er identisk med indtrængning af radon /1, 3, 5/ og dermed thoron, hvorfor thoronmålinger teoretisk set kan benyttes til identifikation af disse indtrængningspunkter.

Såfremt simple thoronmålinger i praksis kan dokumenteres at kunne bruges til at identificere indtrængende poreluft, vil det være muligt i de specifikke sager, at forbedre grundlaget for vurderinger omkring spredningsveje. Endvidere vil

det være muligt at gennemføre en mere sikker risikovurdering i forhold til påvirkninger af indeklimaet fra en underliggende forurening, idet påvirkning fra andre kilder (brug af kemikalier i boligen, drift af oliefyr, rensning af tøj, rygning osv.) ikke påvirker måleresultaterne.

2.1 LÆSEVEJLEDNING

Rapporten indeholder først en gennemgang af de forskellige problemstillinger, der knytter sig til viden/forståelse omkring drivkræfter for indsvivning af poreluft til indeklimaet og lign. (afsnit 3). Afsnittet indeholder ikke egentlige projektresultater, og afsnittet skal alene betragtes som relevant baggrundsviden for de, der ønsker en overordnet indsigt i de komplekse problemstillinger omkring drivkræfter.

Herefter følger en beskrivelse af det anvendte udstyr og måleprocedure (afsnit 4). Afsnittet indeholder desuden en vejledning i tolkning af måleresultater og fremhæver de væsentligste målepunkter til en eventuel fremtidig undersøgelse.

Afsnit 5 indeholder en beskrivelse af undersøgelsens måleprogram. En detaljeret beskrivelse af samtlige forsøgslokaliteter med gennemgang af lokaliteternes byggetekniske udformning og geologi kan findes i bilag 6. Afsnit 5 i rapporten samt bilag 6 kan læses i det omfang, hvor detailindsigt i de specifikke forhold på de enkelte forsøgslokaliteter er nødvendig.

Samtlige måledata gennemgås i afsnit 6, og resultater for hver enkelt lokalitet opstilles. Afsnittet efterfølges af en samlet diskussion af data og usikkerheder i afsnit 7, og projektets konklusioner er sammenfattet i afsnit 8.

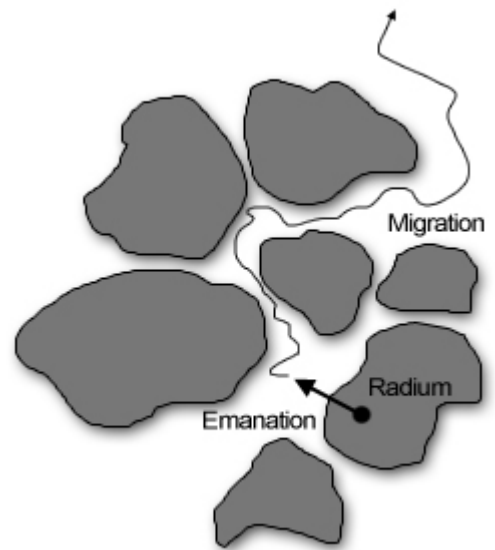
3 Generelle problemstillinger

Thoron og radon er almindeligt forekommende gasarter, der eksisterer naturligt overalt i alle jord- og bjergarter. Gasserne er radioaktive og hidrører fra henfald fra moderstofferne thorium og uran. Dette kapitel indeholder et litteraturstudie af generelle problemstillinger indenfor dannelse af gasserne i jorden og transport til indeklimaet. Kapitlet beskæftiger sig kun delvist med rapportens primære formål, men er et nødvendigt grundlag for forståelse af indvirkende processer.

3.1 EMANATION

Thoron (^{220}Rn) og radon (^{222}Rn) oprinder fra henfald af radiumisotoperne ^{224}Ra og ^{226}Ra , som eksisterer i mineraler i jordpartikler. Radium (^{224}Ra eller ^{226}Ra) henfalder ved udsendelse af alfastråling og producerer herved hhv. thoron eller radon. Indholdet af thoron og radon i en given jord er afhængig af jordens geologiske beskaffenhed og indhold af moderstofferne, hhv. thorium ^{232}Th og uran ^{238}U . Indholdet af disse stoffer i jordens skorpe er normalt i intervallet $19\text{--}38\text{ mg/m}^3$ ($2\text{--}4\text{ ppm}$) for uran og 114 mg/m^3 (ca. 12 ppm) for thorium. Selvom indholdet af thorium generelt er højere i jorden end indholdet af uran, er produktionen (emanationen) af radon og thoron nogenlunde den samme, idet halveringstiden for thorium (ca. 14 mia. år) er væsentligt længere end for uran (ca. $4,5\text{ mia. år}$). Thorium og uran findes i alle jord- og bjergarter over hele verden [27].

Emanation er et udtryk for den hastighed hvormed der dannes radon- eller thoronatomer i jordens porer. Emanation er en del af henfaldskæden for uran og thorium (bilag 1) og forekommer når radium ved henfald danner thoron/radon, altså når et metal omdannes til en gasart. Radon og thoron er de eneste stoffer, der optræder gasformig i henfaldskæderne. Emanationsraten er afhængig af indholdet af radiumisotoper i jorden (som dannes under henfald fra hhv. uran og thorium, se ovenfor) og vandindholdet i jordmatricen.



Figur 3.1: Emanation og videre migration af radon/thoron i poreluft.

Når radium henfalder udsendes alfastråling. Det medfører et alfarekyl som sender partiklen i den modsatte retning af strålingen [3] og kan sammenlignes med rekylet fra en riffel. Rekylet giver moderatomet en energi proportionelt med forholdet mellem alfapartiklen og moderpartiklens vægt, ganget med

alfastrålingens energi. På denne måde kan thoron eller radon skubbes fri af jordpartikler og entrere den fri poreluft, se figur 3.1.

Emanationsraten fra en given jord er defineret som antallet af radon- eller thoronatomer (pr. sekund pr. kg jord) som undslipper fra faste partikler og er til rådighed for fri transport i poreluften /11/.

3.2 INDTRÆNGNING AF PORELUFT TIL INDEKLIMAET

Indtrængningen af thoron (og radon) til indeklimaet, er styret af et kompliceret system af variable drivkræfter og faktorer. Følgende afsnit indeholder en oversigt over problemstillingen med benævnelse af de indeholdte variable, men ikke en fuldstændig udredning af indtrængningsmekanismen. Flere studier er nødvendige for helt at forstå den individuelle sammenhæng mellem faktorerne.

Overordnet er indtrængningen af thoron og radon baseret på tre forskellige omstændigheder, hver især drevet af individuelle kræfter:

- A. Drivkræfter for poreluft til indeklimaet
- B. Størrelsen af influenszonen
- C. Faktorer bestemmende for koncentrationen af thoron i den indtrængende poreluft

Hver især bidrager ovenstående til den totale indtrængning af thoron og radon til et indeklima. Thoron og radon transporteres i jorden via diffusion og via advektion som følge af konvektiv transport af poreluft i jorden. Poreluften vil agere som bæregas for thoron og radon, og er en sammensætning af forskellige koncentrationer af normalt forekommende gasarter i jordmatricen, bl.a.; O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2 , N_2 og H_2S /30, 31/. Indholdet af thoron og radon i poreluften er bl.a. afhængigt af jordlagenes geologiske oprindelse og mineralogi. For en nærmere beskrivelse af faktorer bestemmende for koncentrationen af thoron og radon i den indtrængende poreluft se /3/.

Den konvektive transport af poreluft fra jordmatricen til indeklimaet er styret af at der sædvanligvis er et relativt undertryk i boligen, fremkaldt af indendørs-udendørs temperaturforskelle, ventilation af indeklimaet og vindpåvirkning af konstruktionen. Ovenstående faktorer har indflydelse på strømningsfeltet i jorden under og omkring bygningen som kaldes influenszonen. Størrelsen af zonen er afhængig af jordlagenes beskaffenhed, permeabilitet og vandindhold, som påvirkes af jordens udtørring under bygningen /1, 32/. Enhver gaspartikel indført i influenszonen vil føres via gasstrømmen ind til husets indeklima /1/.

Udover de nævnte tre omstændigheder, som driver thoron og radon fra jorden til indeklimaet, vil bygningens konstruktion yde en form for modstand mod den indtrængende luft. Antallet, form og størrelse af revner i betondækket, beskaffenheden af et eventuelt kapillarbrydende lag, rørgennemføringer mv. spiller alle en rolle for, hvor let poreluften passerer gennem barrieren og ind til indeklimaet. Modelberegninger viser, at revner og utætheder bredere end 0,5 mm i gulvkonstruktionen, giver poreluft fra undergrunden uhindret adgang til indeklimaet /33/. I tilfælde af en indtrængning gennem revner og utætheder spiller et kapillarbrydende lag under bygningen en væsentlig rolle for poreluftens adgang til indeklimaet, idet laget sørger for hurtig og let transport af opstigende poreluft til den nærmeste revne.

3.2.1 Drivkræfter

Transporten af poreluft til indeklimaet er primært drevet af kræfter der opstår på grund af variable tryk-, temperatur- og koncentrationsforhold mellem indeklimaet og udeluften. Drivkræfterne virker samtidigt men med varierende individuel styrke.

Overordnet set er der tale om følgende to transportmetoder:

- Diffusion
- Konvektion

Dette afsnit omhandler ovenstående drivkræfters opståen, og er yderligere omtalt i afsnit 3.3.

3.2.1.1 Diffusion

Diffusion er en transport af et stof på grund af variationer i stoffets termodynamiske potentiale. Diffusion er den dominerende transportmekanisme i poreluft og mikrofrakturer /30/ og drives af koncentrationsgradienter. Diffusion er allestedsnærværende såfremt en koncentrationsgradient eksisterer.

Thoron og radon diffunderer relativt let gennem materialer, idet de er enkeltatomare gasarter. De er dog imidlertid radioaktive, hvilket betyder at de på et givent tidspunkt henfalder, hvor diffusionsprocessen således ophører. Afstanden som gasarterne kan diffundere er betinget af stoffernes individuelle diffusionslængde, se afsnit 3.3.1.

3.2.1.2 Konvektion

Konvektion er transport af poreluft via eksterne påvirkninger som eks. tryk, vind og temperaturer. Svingninger i trykket vil skabe en strømning af luft til eller fra jorden, afhængig af geologien.

Opvarmning af et indeklima giver anledning til at luften i indeklimaet stiger til vejrs. Dette skaber et konstant relativt indendørs undertryk, som bestandigt trækker poreluft fra jorden op mod indeklimaet. Effekten kaldes skorstenseffekt, og størrelsen af det fremkaldte undertryk betegnes Δp , og er trykforskellen mellem ude- og indeklima. Størrelsen af undertrykket kan udregnes af nedenstående ligning (1) /6/.

$$\Delta p = C \cdot a \cdot h \cdot \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (1)$$

Hvor: Δp = trykdifferens [Pa]
 $C = 0,0342$
 a = atmosfærisk tryk [Pa]
 h = højde af bygning [m]
 T_o = udendørs temperatur [K]
 T_i = indendørs temperatur [K]

For et atmosfærisk normaltryk på 1013 hPa og en temperaturforskel mellem inde og ude på 20°C (ved $T_o = 0^\circ\text{C}$ og $T_i = 20^\circ\text{C}$) fås af (1) en $\Delta p \approx 4$ Pa. Udendørs temperatursvingninger vil skabe variationer af størrelsen på temperaturforskellen og give anledning til svingninger i skorstenseffekten

mellem dag og nat. Denne tendens er registreret i nærværende projekt under delundersøgelse 3, se afsnit 7.2.1. Skorstenseffekten giver anledning til et samlet opadrettet flow og udledning gennem konstruktionens tag. Flowet kan beregnes ud fra ligning (2) /6/.

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_i}} \quad (2)$$

Hvor: Q = flow gennem samlet indtrængningsareal [m^3/s]
 A = Indtrængningsarealet (flow-området) [m^2]
 C = udledningskoefficient (typisk 0,65 – 0,70)
 g = tyngdeacceleration [$9,82 \text{ m/s}^2$]
 h = højde af bygning [m]
 T_o = udendørs temperatur [K]
 T_i = indendørs temperatur [K]

Q er det samlede flow gennem indtrængningsarealet A i bygningens klimaskærm. Indtrængningsarealet udgør eksempelvis vindues- og døråbninger men også utætheder i gulvkonstruktionen og lignende lækager.

Vindpåvirkning af konstruktionen og mekanisk og manuel ventilation af indeklimaet, kan bidrage yderligere til dette undertryk.

Indtrængningsraten ved konvektiv strømning af poreluft vurderes for et almindeligt dansk parcelhus at være 0,1 – 1 m^3/h , proportionelt med størrelsen af det relative undertryk /1, 7/. Høje indtrængningsrater i enfamiliehuse med terrændæk kan kun forekomme ved konvektiv strømning /5/.

3.3 DIFFUSIV OG ADVEKTIV TRANSPORT AF THORON

I følgende afsnit beskrives henholdsvis diffusiv og advektiv transport af thoron og radon til indeklimaet.

3.3.1 Diffusiv transportlængde

I et porøst medie (eksempelvis beton) vil der altid forekomme en diffusiv transport af radon på grund af molekyllære bevægelser fra høj til lav koncentration. Til forskel fra forskellige andre gasarter er radon (og thoron) radioaktiv, hvorfor den på et tidspunkt vil henfalde og derved bringe diffusionstransporten til et stop, idet henfaldsprodukterne ikke er luftformige.

Diffusionslængden for et stof er en fysisk størrelse, som knytter sig til stoffets kemiske egenskaber og det materiale det diffunderer igennem. Diffusion til indeklimaet vil til enhver tid foregå fra materialer indeholdende radon, med andre ord både bygningsmaterialer og jorden under bygningen. Diffusiv indtrængning er beskrevet af Fick's lov og er afhængig af forholdet mellem koncentrationen under og over gulvkonstruktionen. Jo større forskel i koncentration, jo højere diffusiv flux af stoffet. Ved radioaktive stoffer (såsom thoron og radon) er stoffets diffusionslængde også afhængig af halveringstiden. Diffusion er desuden afhængig af stoffets opløselighed med det materiale, det skal diffundere igennem.

Det diffusive bidrag med radon til indeklimaet fra både bygningsmaterialer og jord afhænger i høj grad af porøsiteten af de materialer som gassen skal

diffundere igennem, beskrevet som $D = \text{pore diffusions koefficient } [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ /25/.

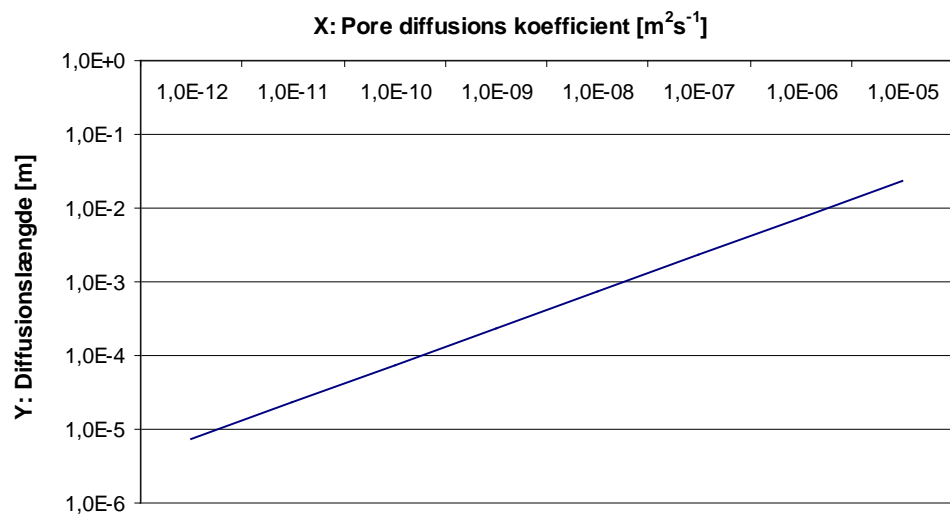
$$\frac{1}{L_D} = \left(\frac{\lambda}{D} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Hvor: $\lambda = \text{henfaldskonstant } (= 1/T_{1/2}) [\text{s}^{-1}]$
 $L_D = \text{diffusionslængde } [\text{m}]$

Ligning 3 kan omskrives til:

$$L_D = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (4)$$

Herefter kan diffusionslængden simpelt beregnes på baggrund af pore diffusions koefficientens størrelse, se figur 3.2.



Figur 3.2: Diffusionslængde Y udtrykt ved pore diffusions koefficient X.

I litteraturen er betonpladers effektive diffusions koefficient for radon (og thoron) fundet til $1,3 \cdot 10^{-6}$ til $6,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ /25, 26/. Radons diffusionskoefficient i luft benævnes $D_0 = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ /25/.

Benyttes en yderst konservativ værdi (D_0), findes derfor thorons maksimale diffusionslængde fra beton til indeklima:

$$L_D = \sqrt{\frac{0,1 \cdot 10^{-4}}{1/56}} = 0,024 \text{ m}$$

Ovenstående må ses om den maksimale afstand thorongas kan diffundere fra bygningsmaterialer (eller jord) til indeklima, såfremt diffusionen sker fra materialets yderste overflade og diffunderer til og i stillestående luft. Selv en mindre overdækning af materialet som thoron skal diffundere ud fra, vil resultere i en væsentlig formindskelse af ovenstående afstand, jf. figur 3.2.

Diffusiv indtrængning af thoron og radon til et indeklima er jf. ligning 3 og 4 samt figur 3.2 primært bundet til gulvkonstruktionens porøsitet og tykkelse. Teoretisk udgør en betonkonstruktion en solid barriere, men i praksis kan beton være endog meget permeabel. I betonkonstruktioner udvikles mikrofrakturer som følge af udtørring og belastning. Disse mikrofrakturer kan udvikles til makrofrakturer; synlige revner i konstruktionen, eksempelvis sætnings- og svindrevner. Mikrofrakturer vil altid opstå i betonkonstruktioner, selv inden disse udsættes for stress, og giver anledning til en enklere diffusiv indtrængning af primært radon (på grund af stoffets lange halveringstid) som følge af interaktion mellem diffusiv og advektiv transport gennem betonlegemet.

Der er i dette projekt ikke set nærmere på den diffusive indtrængnings direkte betydning i de enkelte feltundersøgelser.

3.3.2 Advektiv transportlængde

Transport ved advektion kan udtrykkes ved hjælp af Darcy's hastighedsvektor q , som beskriver transporthastigheden for et stof i et givent medie.

$$L_A = \sqrt{\frac{q}{\eta \cdot \lambda}} \quad (5)$$

Hvor

L_A = advektionslængden [m]

$$q = -\frac{k}{\mu} \cdot \Delta p \quad (6)$$

k = gas permeabilitet for medie

η = gas porøsitet af medie

μ = dynamisk viskositet ($1,82 \cdot 10^{-5}$ Pa·s ved 20°C)

Δp = trykdifferens

3.3.3 Total migrationslængde

Den samlede transportvej i et givent medie, som thoron- og radonatomer bevæger sig forinden henfald til datterprodukter, kaldes migrationslængden. Størrelsen er et udtryk for den samlede rejselængde ved både diffusiv og advektiv transport. For radon og thoron er migrationslængden afhængig af stoffets halveringstid og er givet ved:

$$L_M = \frac{1}{2} \cdot \left(L_A + \sqrt{L_A^2 + 4 \cdot L_D} \right) \quad (7)$$

Hvor

L_M = Migrationslængden [m]

L_A = Advektionslængde [m]

L_D = Diffusionslængde [m]

Den samlede migrationslængde er således et udtryk for den afstand, et radon- eller thoronatom kan transporteres gennem et givent medie, som følge af diffusion samt advektiv transport med poreluften, førend atomet henfalder.

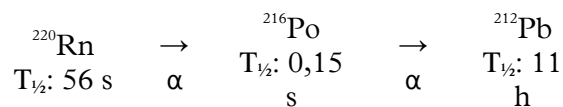
3.4 RADIOAKTIVE STOFFER I INDEKLIMAET

Radon og thoron emanerer fra jordmatricen og føres til indeklimaet via strømning af andre gasser. Udover denne indtrængning fra undergrunden, er indeklimaet påvirket af emanation og udånding af radioaktive stoffer fra bl.a. bygningsmaterialer. Dette afsnit beskriver indhold og distribution af radon, thoron og disses henfaldsprodukter i indeklimaet, og hvilke faktorer der volder indflydelse herpå, herunder tillæg fra bygningsmaterialer.

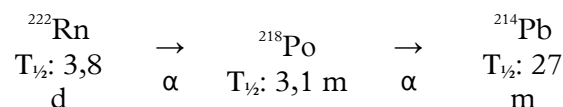
Indtrængende poreluft vil, afhængig af indtrængningsmekanismen (se afsnit 3.2 og 3.3), indeholde varierende koncentrationer af thoron og radon. Ved henfald i indeklimaet dannes datterprodukter som distribueres afhængig af deres individuelle halveringstider. I litteraturen er thoron- og radonkoncentrationer ofte målt med henblik på en evaluering af stoffernes farlighed ved menneskelig eksponering, hvor det er nødvendigt at give et udtryk for indholdet af henfaldsprodukter i et givent indeklima¹.

I nærværende projekt har fokus været på selve gasserne thoron og radon, og deres individuelle indtrængnings- og henfaldsmønstre. Det er vigtigt at forstå, at fordelingen af visse henfaldsprodukter i indeklimaet kan differentiere sig signifikant fra fordelingen af radon- og thorongas. Derfor er der i nærværende projekt benyttet alfaspktrometri (se afsnit 4.1.1) ved prøvetagning for at differentiere de enkelte radionuklider.

Forskellen i distribution af radon, thoron og henfaldsprodukter i indeklimaet, beror på stoffernes halveringstider og placering i henfaldskæden. Specielt interessant er følgende henfaldskæde:



Thorongas (²²⁰Rn) dannes kontinuerligt ved emanation i jorden, og føres ved advektion via revner, sprækker og andre utætheder til indeklimaet. Afstanden som gassen bevæger sig ved advektion er afhængig af poreluftens indtrængningshastighed. Under transporten henfalder en del af gassen. Ved henfald dannes den stærkt radioaktive polonium-isotop ²¹⁶Po, som øjeblikkeligt henfalder videre til blyisotopen ²¹²Pb. Både mængden og den relative placering af ²¹⁶Po i indeklimaet er således i ækvivalens med ²²⁰Rn og vil primært findes ved indtrængningspunkter /34-41/ eller i tæt nærhed på bygningsmaterialer /19-24/. ²¹²Pb vil derimod fortsætte sin eksistens i timevis, idet stoffets halveringstid er væsentligt længere, og kan derfor distribueres nogenlunde uniformt i indeklimaet /13-18/.



Ligeledes dannes radon, som via ens transportveje føres til indeklimaet. Radongas har imidlertid en væsentligt længere halveringstid end thorongas, hvorfor radon (A) kan tilbagelægge længere afstande i jordmatricen, og (B) vil have god tid til at fordele sig nogenlunde ligeligt i indeklimaet. En del af

¹ Sundhedsrisici forbundet med eksponering af radon og thoron er forbundet til inhalering af radioaktive aerosoler; mikropartikler i luften hvortil kemisk aktive radon- og thorondøtre bindes.

gassen vil dog til stadighed henfalde under transporten og indtrængningen, hvor radon omdannes til polonium-isotopen ^{218}Po . Dette stof vil, grundet sin væsentligt kortere halveringstid, findes i forhøjede koncentrationer i samme områder som radongas findes i høje koncentrationer – i relativ nærhed af indtrængningspunkter for poreluft til indeklime.

3.4.1 Bygningsmaterialer

Langt de fleste bygningsmaterialer indeholder koncentrationer af naturlige radioaktive stoffer. Koncentrationerne er primært styret af råprodukternes geologiske oprindelse, eksempelvis tegl som kan være formet af glacialt ler. Indholdet af radioaktive stoffer er således højest i sten-baserede materialer, med sand, cement og kalk i den lave ende /10/ og stigende radioaktivitet med indhold af knust granit. Endnu højere radioaktivt indhold forekommer ved brug af beton med indhold af alun skifter, såkaldt *blåbeton*, som primært er brugt i Sverige. Af andre stoffer der kan give anledning til forhøjet radioaktivt indhold i bygningsmaterialer kan nævnes eksempelvis beton indeholdende slagge fra jernproduktion samt gips formet af restprodukter fra gødningsproduktion.

Tabel 3.1 giver en oversigt over indholdet af radium og thorium i forskellige bygningsmaterialer.

Bygningsmateriale	^{226}Ra [Bq/kg]	^{232}Th [Bq/kg]
Træ	0,3-0,5	0,2-1,5
Naturlige byggesten	0,-400	1-350
Mursten, tegl	25-160	70-180
Mursten, kalk og sand	6-25	4-30
Cement	10-190	<4-110
Beton	5-160	3-390
Porebeton	7-130	4-150
Blåbeton	650-2600	20-80
Letklinker	120-140	110-180
Gips	2-11	<1-12
Fosforgips	590-630	<16-18

Tabel 3.1: Aktivitetskoncentrationer i forskellige bygningsmaterialer /10/.

Indholdet af thorium (^{232}Th) i ovenstående bygningsmaterialer, kan give et passivt bidrag til den indendørs thoronkoncentration. Indholdet er overordentligt varierende på grundlag af den geologiske oprindelse. Således kan thorium indholdet i bygninger i andre lande være afvigende fra danske forhold, idet sedimenters geologiske oprindelse er forskellig /12/.

Flere steder i litteraturen er beskrevet, at bygningsmaterialer er en vigtig kilde til indhold af thorondøtre i indeklime. På grund af thorons korte halveringstid henfalder det efter kort migration til ^{216}Po . På grund af ^{216}Po 's yderst korte halveringstid på 150 ms, vil stoffet øjeblikkeligt herefter omdannes til ^{212}Pb . Dette stof vil herefter have god tid til distribution og plate-out i indeklime før det henfalder med en halveringstid på 11 timer.

3.4.1.1 Diffusionstillæg fra vægge og gulve

Den gennemsnitlige radonkoncentration i danske enfamiliehuse er på 77 Bq/m^3 /8/ hvorimod radonkoncentrationen i etagebyggeri over terræn

gennemsnitligt ligger på ca. 20 Bq/m^3 . Forskellen grunder i, at etagebyggeri over terræn ikke har direkte kontakt med den underliggende jord. Således er indsvingning af poreluft, som indeholder en væsentligt højere koncentration af radon end indeluften, den primære årsag til forhøjede radonkoncentrationer i indeklimaet /11/. Der forekommer dog altid et bidrag fra bygningsmaterialer, og ifølge /11/ ligger dette bidrag på mindre end 10 Bq/m^3 for typiske danske bygningsmaterialer. Således vil et indeklima med et givent bidrag fra undergrunden på $X \text{ Bq/m}^3$, alt andet lige have en indendørs radonkoncentration på $< X + 10 \text{ Bq/m}^3$.

Bidraget fra bygningsmaterialer til thoronindholdet i indeluften er dog mere usikkert, specielt fordi thoron ikke kan bevæge sig særligt langt via diffusion på grund af den korte halveringstid (afsnit 3.3.1). Flere steder i litteraturen /13 – 18/ beskrives, at indholdet af thorium i bygningsmaterialer er en vigtig kilde til thorons datterprodukter i indeklimaet (primært ^{212}Pb). Her er det vigtigt at understrege, at indholdet af thorons datterprodukter i indeklimaet ikke er proportionelt med indholdet af thorongas i indeklimaet (afsnit 3.4). Datterprodukterne dannes ved udånding af thoron fra bygningsmaterialer og henfalder omgående til længere levende henfaldsprodukter til distribution i indeklima. Modellering af thorongas emanation fra bygningsmaterialer viser eksponentielt faldende thorongas koncentration med afstand fra vægge /19 – 24/ og målinger viser generelt meget lave eller ikke-eksisterende koncentrationer af thorongas i indeklimaet, eller meget varierende rumlige indhold, afhængig af målepunkternes placering /35/.

På baggrund af den gennemgåede litteratur må der forventes et meget lavt indhold af thorongas i indeklimaet som følge af udånding fra bygningsmaterialer. Det må yderligere forventes at såfremt et sådan indhold eksisterer, vil udåndingen fra bygningsfladerne være omtrentlig homogen, og ikke give anledning til forhøjede værdier i enkelte målepunkter.

4 Metode- og udstyrsbeskrivelse

Nedenfor beskrives forsøgsopstillingen, de udførte thoronmålinger og det anvendte udstyr. Desuden beskrives alternative udstyrsmuligheder, samt usikkerheder forbundet med målingerne.

4.1 OVERORDNET METODEBESKRIVELSE

Thoronmålinger foretages med et radon måleudstyr, der kan foretage alfaspektrometri. I projektet er målingerne udført med et udstyr af typen *RAD7*. Ved alfaspektrometri analyseres og kategoriseres de enkelte radioaktive alfahenfald på baggrund af henfaldets unikke energi. Instrumentet kan derved bestemme hvilken specifik radionuklide henfaldet oprandt fra. Ved måling i et punkt, og kategorisering af de enkelte alfahenfald, kan udstyret over en given tidsperiode herved bestemme, hvor høj koncentrationen af de enkelte datterprodukter er.

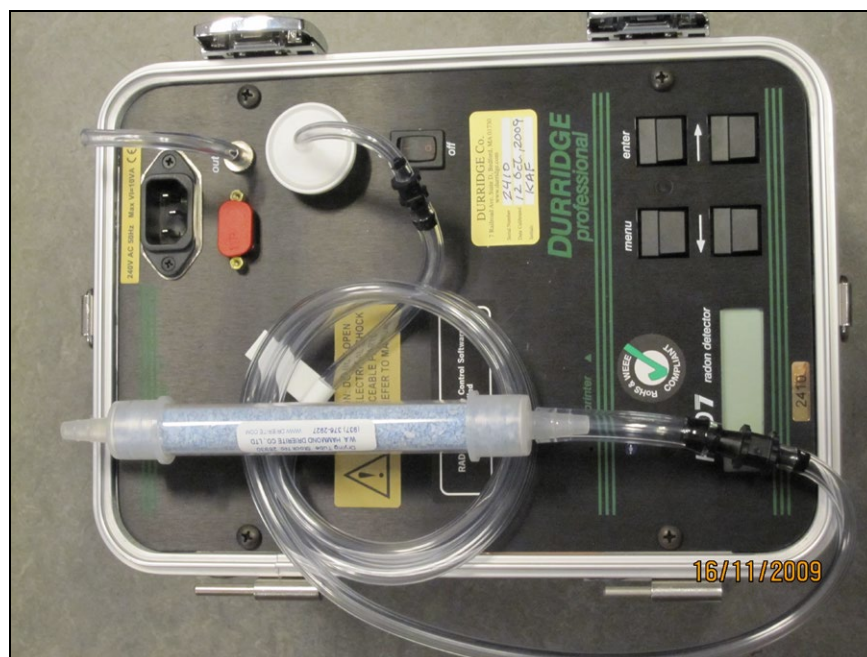
4.2 UDS TYR

Samtidig med de udførte thoronmålinger i delundersøgelse 3, se afsnit 5.1, er der foretaget trykdifferensmålinger, samt spotmålinger af luftens flow op gennem revner og sprækker i konstruktionen. Disse undersøgelser er foretaget som led i en større undersøgelse af indtrængning af poreluft /54/. Samtlige udstyr er præsenteret herunder.

4.2.1 RAD7

Instrumentet RAD7, se figur 4.1, suger luft gennem flere filtre, der blokerer for vand, støv, aerosoler og radondøtre. Således trænger kun radon og thoron ind til instrumentets interne målekammer hvor målingen finder sted.

I midten af målekammeret, som er en 0,7 liters hemisfære, befinder sig en *solid-state, ion-implanted, planar, silicon* alfadetektor. Når radon og thoron henfalder inde i kammeret, drives de elektrisk ladede radon- og thorondøtre til alfadetektoren ved hjælp af et elektrisk felt, hvor de sætter sig fast. Når radon- og thorondøtrene herefter henfalder, produceres et elektrisk signal proportionelt med alfastrålingens energi. Dette signal opfanges af alfadetektoren, som filtrerer og sorterer signalerne, alt efter deres energiniveau (alfaspektrometri).



Figur 4.1; Udstyr af typen RAD7.

Ved thoronmåling søges kun efter to specifikke radionuklider; ^{218}Po (første radondatter) og ^{216}Po (første thorondatter), se bilag 1. ^{218}Po har en halveringstid på ca. 3 minutter, hvorimod ^{216}Po har en halveringstid på 150 ms. ^{216}Po vil derfor henfalde straks efter den er dannet fra ^{220}Rn . Svartiden på pludselige stigninger eller fald i thoronconcentrationen er derfor øjeblikkelig, hvorimod svartiden for radon (^{218}Po) kan strække sig over flere minutter. Der vil dog uundgåeligt forekomme en forsinkelse, idet instrumentet via en slange transporterer luft fra målepunktet til sit interne målekammer. Passagen tager ca. 30 – 45 sekunder, hvorfor forhøjet thoronindhold i ét punkt kan trækkes med over i næste punkt. Dette forhold er nærmere beskrevet i afsnit 4.5.

4.2.1.1 Måleprocedure – RAD7

Da metoden er nyudviklet som en del af projektet, er der eksperimenteret med forskellige procedurer for at opnå størst mulig målesikkerhed. Den anvendte metode (konkluderede bedst egnede metode) er beskrevet nedenfor.

Når udstyret tændes gennemgår det først en cyklus på ca. 30 sekunder. Instrumentet er herefter klar til at påbegynde måling. Inden der måles i de udvalgte punkter, er det nødvendigt at foretage en referencemåling af evt. baggrundsindhold af thoron. Dette kan forekomme i særlige tilfælde hvor meget store lækager tillader en ekstrem indstrømning af poreluft til indeklimaet. Thoron kan her ekstraordinært spredes over længere afstande end normalt. Referencemålingen udføres derfor midt i rummet, eksempelvis på et bord eller en stol (minimum 1,25 m over gulvniveau).

Der skal foretages referencemåling først, i ca. 3x5 minutter. Hver måling sker over min 5 minutter. Efter endt referencemåling er apparatet flyttet til første målepunkt. Dette skal ske så hurtigt som muligt umiddelbart efter referencemålingens afslutning (med mindre målingen pauses).

Der skal udføres ny referencemåling, såfremt indeklimaets atmosfære ændrer sig betydeligt. Eksempelvis hvis der måles i både kælder og stueetage.

4.2.2 Trykdifferensmåler

I delundersøgelse 3 er foretaget trykdifferensmålinger på to uafhængige lokaliteter, og på hver lokalitet ved anvendelse af to forskellige typer udstyr. Målingerne er foretaget som målt trykdifferens mellem indeklima og under gulv/hulmur med tilgængeligt udstyr, se nedenfor afsnit 4.2.2.1 og 4.2.2.2. Til måling af trykdifferens mellem indeklima og udenfor, er benyttet udstyr tilknyttet blowerdoor, se afsnit 4.6.

4.2.2.1 GMSD 2,5 MR

Instrumentet indeholder en tryksensor, der måler den piezoresistive effekt af en indbygget halvleder (strain gage). Udstyret måler forskellen i tryk mellem to målepunkter i intervallet -199,9 til 250,0 Pa. Udstyret har en måleusikkerhed på 0,1 Pa. For en nærmere beskrivelse af udstyret, se databladet i bilag 5.1 eller /42/.

4.2.2.2 Micatrone MF-P

Instrumentet er en tryktransmitter der kan måle positivt, negativt og differentieret tryk. For differentieret tryk måler udstyret forskellen i tryk mellem to målepunkter i intervallet -50 til 50 Pa. Udstyret har en måleusikkerhed på 0,5 Pa. For en nærmere beskrivelse af udstyret, se databladet i bilag 5.2 eller /42/.

4.2.3 Flowmåler

I delundersøgelse 3 af de udførte undersøgelser, er foretaget uafhængige flowmålinger for flere af de udvalgte målepunkter. Vindmålingerne er foretaget for at dokumentere et luftflow op/ud gennem målepunktet. Målingerne er foretaget med en flowmåler af typen SwemaAir 40; et instrument der kan måle vindhastigheder og lufttemperatur i intervallerne 0,10-30,00 m/s og -20 til 80 °C. Instrumentet har en indbygget usikkerhed på $\pm 0,04$ m/s ved lufthastigheder mellem 0,1-2,0 m/s, og ± 2 % for hastigheder i intervallet 2-30 m/s. For en nærmere beskrivelse af udstyret, se databladet i bilag 5.3. Målingerne er illustreret i bilag 4.2 og 4.3 og er ikke kommenteret yderligere i denne rapport.

4.3 MÅLING I UDVALGTE PUNKTER

De målepunkter der anvendes til screening i indeklimaet ved thoronmåling, bør udvælges på baggrund af en grundig byggeteknisk gennemgang af konstruktionen med fokus på forventede spredningsveje /4/. Eksempler på hyppige indtrængningspunkter er listet nedenfor. Alle disse bør som udgangspunkt screenes ved en thoronmåling. Yderligere målepunkter lokaliseres ved den byggetekniske gennemgang. Guidelines for lokalisering af spredningsveje er nærmere beskrevet i /4/.

- Teknikskab(e)
- Gulv afløb
- Fodpaneler såfremt betonpladen ikke er støbt fuldt ud
- Radiatorer (ved gennemføring, gerne under ”kappen”, se bilag 4.1)
- Øvrige rørgennemføringer (vand, fjernvarme, ventilation, el mv.)
- Yderdøre, samlinger ved ydervæg
- ”Gulv-til-loft” -vinduer, samlinger ved ydervæg
- Synlige revner/huller/utætheder i gulv- og/eller vægkonstruktion

Samlinger ved ydervægge kan desuden ofte give anledning til indtrængning, eksempelvis ved indtrængning af poreluft gennem samlingsdetaljen mellem fundament, ydervæg og gulvkonstruktion. Det er derfor vigtigt at måle flere steder ved konstruktionens ydervægge (ca. hver 2. m).

Samtlige målepunkter indtegnes på en plantegning over bygningen (inkl. referencemåling). Udstyret klargøres og placeres og en målerunde kan påbegyndes, se afsnit 4.2.

Målingen angives i CPM (*Counts Per Minute*) for ^{216}Po , som er et udtryk for, hvor mange af de registrerede henfald i målecyklussen, der oprinder fra ^{216}Po . Erfaringsmæssigt kan indhold $> 0,7$ CPM (målt over 5 min) indikere, at der er tale om et indtrængningspunkt. Registreringen betyder at der er registreret mere end 3 registrerede henfald af ^{216}Po over cyklussens 5 minutters interval. For at verificere målingen, måles i yderligere 2x5 minutter i samme punkt, og først herefter konkluderes hvorvidt målingen vurderes at indikere et indtrængningspunkt.

I det tilfælde at der er registreret forhøjet indhold af thoron i et målepunkt, er instrumentet efterfølgende flyttet til referencepunktet eller udendørs for ”udluftning”. Målet er at undgå at ”slæbe” radon og thoron med til næste målepunkt og dermed skabe krydskontaminering. Udluftning af instrumentet er gennemført over en periode på minimum 2x5 minutter.

4.4 TOLKNING AF RESULTATER

En typisk thoron målerunde indeholder ofte mange data. For at opnå overblik, er det derfor nødvendigt at foretage en klassificering af data ved en inddeling i flere undergrupper. Klassificeringen baseres primært på det målte indhold af ^{216}Po . Ved klassificeringen inddeles måleresultaterne i nedenstående 4 klasser:

1. Lavt thoron indhold ($^{216}\text{Po} < 3$)
2. Lavt thoron indhold ($^{216}\text{Po} < 3$) men forhøjet radonkoncentration
3. Thoron indhold ($^{216}\text{Po} \geq 3$)
4. Thoron indhold ($^{216}\text{Po} \geq 3$ målt ≥ 2 gange i samme punkt)

Klassificeringen beskrives uddybende nedenfor. Samtlige måleresultater i bilag 7.5 – 8.9 er vægtet efter ovenstående.

4.4.1.1 Klasse 1: Lavt thoron indhold ($^{216}\text{Po} < 3$)

Klasse 1 indeholder målepunkter med < 3 registrerede henfald af ^{216}Po over måletidsrummet på 5 minutter, se figur 4.2 nedenfor. Det formodes, på baggrund af afsnit 3.4, at enkelte thoronatomer kan frigøres fra bygningsmaterialer ved diffusion og dermed indgå som en del af målingen ved et specifikt målepunkt. For at negere denne falsk positive ved måling antages det, at > 3 ^{216}Po sandsynligvis kun vil forekomme i forbindelse med en direkte konvektiv indtrængning af poreluft i umiddelbar nærhed af det givne målepunkt. Vurderingen er dels baseret på studier gjort i forbindelse med udførelsen af delundersøgelserne 1 og 2, samt tidligere undersøgelser /52 og 53/.

Et målepunkt i klasse 1 er ikke et indtrængningspunkt.

4.4.1.2 Klasse 2: Lavt thoron indhold ($^{216}\text{Po} < 3$) men forhøjet radonkoncentration

Klasse 2 er tilsvarende målepunkter med < 3 registrerede henfald af ^{216}Po over måletidsrummet på 5 minutter, men dog et samtidigt forhøjet indhold af radon (radondatter ^{218}Po), se figur 4.2 nedenfor. Vurderingen er baseret på studier i forbindelse med udførelsen af delundersøgelserne 1 og 2, idet der ved et målepunkt kan forekomme en forhøjet koncentration af ^{218}Po uden en samtidig forhøjet koncentration af ^{216}Po . Et eksempel på et sådan punkt kan være en indtrængningsvej gennem eksempelvis afløb eller kloak. Transportvejen kan her tænkes at være fra jord via diffusion ind i afløbsrør og advektiv transport via kloakluft til indeklima – dermed for lang en migrationslængde for thorongas, se afsnit 3.3.3. Et målepunkt i klasse 2 kan udgøre et indtrængningspunkt, afhængig af omstændighederne.

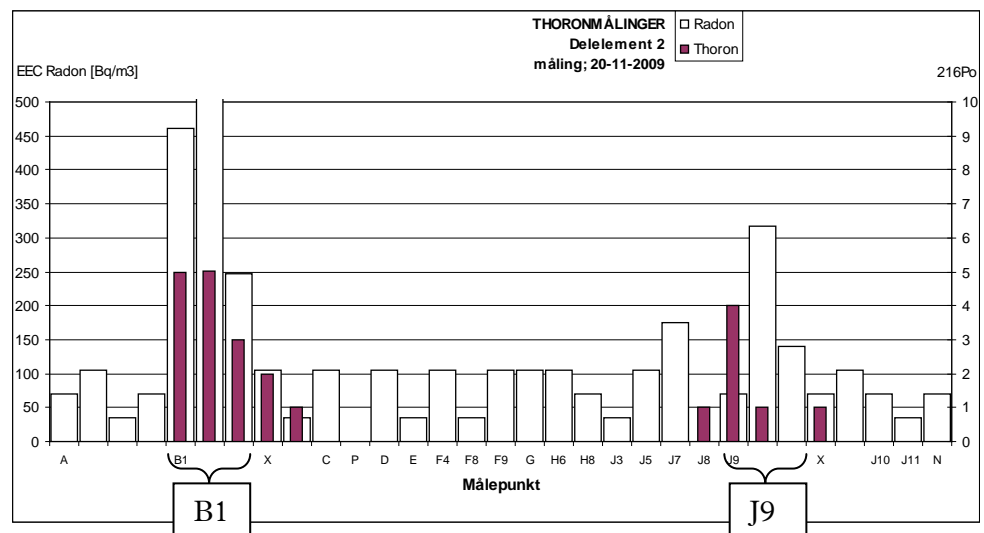
4.4.1.3 Klasse 3: Thoron indhold ($^{216}\text{Po} \geq 3$)

Målepunkter i klasse 3 har ≥ 3 registrerede henfald af ^{216}Po over måletidsrummet på 5 minutter, se figur 4.2 nedenfor. Som regel følges dette indhold af et forhøjet indhold af ^{218}Po , men ikke nødvendigvis altid. Vurderingen er dels baseret på studier gjort i forbindelse med udførelsen af delundersøgelserne 1 og 2, samt tidligere undersøgelser /52 og 53/. Det formodes at et målepunkt i klasse 3 udgør et egentligt indtrængningspunkt.

For at dokumentere indtrængning ved et målepunkt hvor der er registreret ≥ 3 henfald af ^{216}Po over måletidsrummet på 5 minutter, gentages målingen i samme punkt i 2x5 minutter i umiddelbar forlængelse af første måling, se afsnit 4.3.

4.4.1.4 Klasse 4: Thoron indhold ($^{216}\text{Po} \geq 3$ målt ≥ 2 gange i samme punkt)

Målepunkter i klasse 4 har ≥ 3 registrerede henfald af ^{216}Po over et samlet måletidsrum på $\geq 2 \times 5$ minutter, og kan påvises som følge af de supplerende målinger der foretages som følge af en måling i kategori 3. Det vurderes at et målepunkt i klasse 4 udgør et egentligt indtrængningspunkt. En præsentation af en måling i klasse 4 er vist på figur 4.2 nedenfor.



Figur 4.2; Eksempel på thoronmåling fra delundersøgelse 2. Enheden på højre y-akse er counts pr. minute af polonium-isotopen ^{216}Po .

Ovenstående figur er et eksempel på en thoronmåling taget fra bilag 3.2. Hver søjle illustrerer en måling på 5 minutter. Hvide søjler illustrerer det

registrerede antal henfald af ^{218}Po i måletidsrummet omregnet til en ækvivalent radonkoncentration (venstre ordinatakse), hvorimod farvede søjler illustrerer henfald af ^{216}Po (højre ordinatakse). Som illustreret på abscisseaksen er målt i alt i 22 målepunkter, hvoraf 1 er en referencemåling (målepunkt A måling i 4x5 minutter), og 2 er udluftning af instrumentet (målepunkt X, måling i 2x2x5 minutter). En forklaring af målepunkterne kan findes i bilag 3.2 og 3.5.

I målepunktet B1 måles i første måletidsrum en forhøjet radonkoncentration (i forhold til den indledende referencemåling) samt et samlet antal henfald af ^{216}Po på ≥ 3 . Målingen er således en klasse 3 måling, og for at dokumentere en indtrængning fortsættes med 2x5 minutters målinger i samme punkt. Ved de to næste målinger påvises ligeledes et forhøjet radonindhold samt et samlet antal henfald af ^{216}Po på ≥ 3 . Målepunktet B1 er derfor i klasse 4.

I målepunktet J8 måles et samlet antal henfald af ^{216}Po på < 3 . Der foretages ikke en yderligere måling i punktet, som således tilhører klasse 1.

I målepunktet J9 påvises et samlet antal henfald af ^{216}Po på ≥ 3 . Som datavalidering fortsættes med 2x5 minutters målinger i samme punkt. I anden måleperiode måles et samlet antal henfald af ^{216}Po på < 3 , men samtidig forhøjet radonkoncentration (altså en måling i klasse 2). I tredje måleperiode registreres ingen henfald af ^{216}Po . Målepunktet J9 klassificeres derfor samlet som klasse 3 måling. Årsagen til den fluktuerende indtrængning i måleperioden ved målepunktet kan eksempelvis skyldes skiftende vindhastigheder og/eller – retning og disses øjeblikkelige betydning for trykforholdene i konstruktionen, og dermed skiftende vilkår for indtrængning, se afsnit 3.2.

4.5 USIKKERHEDER

Forhøjet thoronindhold i luften ved et målepunkt indikerer, at der forekommer et indtrængningspunkt relativt tæt på målingen. Afstanden afhænger af kildestyrken, men er begrænset af thorons hurtige henfald hvorfor indholdet af thoron i en måling drastisk minimeres med afstanden til indtrængningspunktet. Indtrængning af poreluft kan forekomme gennem forskellige advektive indtrængningsveje, beskrevet overordnet i afsnit 3.3. Der kan forekomme indtrængningsveje som ikke kan påvises med thoronindhold og ligeledes kan indtrængningsveje være forgrenede, eller overdækket af gulvbelægning, hvilket kan give anledning til, at den påviste indtrængning ikke sker lige ved målepunktet.

Det er vanskeligt at foretage en præcis måling af thoron gas ved et givent målepunkt, fordi indtrængning af thorongas er afhængig af variationer i tidlige faktorer. Thorongas trænger ind til indeklimaet via utætheder i konstruktionen og ved diffusiv emanation fra bygningsmaterialer, og henfalder kontinuerligt til sine datterprodukter. Gassens korte levetid gør, at koncentrationen i et rum varierer utroligt meget, afhængig af indeluftens bevægelser og turbulens, samt af eksterne påvirkninger der bidrager til øget eller mindsket indtrængning i måletidspunktet. Disse forhold gør målemetoden til et kritisk punkt ved en undersøgelse.

For målemetoden er konsistens i målingerne afgørende for målesikkerheden. Måleudstyrets (RAD7) interne pumpe skal køre med kontinuerligt og støt flow. Såfremt flowet ændres, vil målingen ændres, idet mere eller mindre luft derved suges gennem systemet. Tilsammen vil en del af den mængde

thorngas, der ved målepunktet suges ind i instrumentet, henfalde i udstyrets "luftveje". Det anbefales derfor at benytte et ind sugningssystem med konsistente dimensioner, og at benytte samme flow fra målepunkt til målepunkt og måleserie til måleserie. Eventuelt kan benyttes et flowmeter i forbindelse med målingerne.

Måleudstyret (RAD7) beregner en thoron gas koncentration baseret på de registrerede henfald i udstyrets målekammer. Beregningen er en standard kalibrering indkodet i udstyret, og baserer sig på brugen af et standard RAD7 indløbsfilter, en standard 1 m lang og 0,48 cm indre diameter vinyl slange samt et standard 15 cm tørrerør fra Drierite. Afvigelser fra dette setup kan betyde, at de foretagne thoronmålinger ikke er korrekte. Benyttes eksempelvis en meget lang eller tyk slange fra måleinstrumentet til tørrerøret, vil en større del af den opsugede mængde thoron gas nå at henfalde under transporten i slangen. Thoronkoncentrationen ved instrumentets indløb (*inlet*) kan udtrykkes matematisk jf. følgende ligning /52/:

$$C_1 = C_0 \cdot e^{-L \cdot V_1 / q} \quad (8)$$

Hvor

C_0 = Den oprindeligt registrerede koncentration

V_1 = Samlet volumen af tørrerør, slange og filter (standard ca. 50 ml)

q = Flow (standard ca. 0,65 l/min)

L = Thorons henfaldskonstant (ca. 0,756 pr. min)

Den typiske værdi (standardkalibreringen) for ovenstående ligning bliver da $C_1 = 0,94 = 94 \%$, hvilket betyder at den målte koncentration udgør ca. 94 % af den oprindelige koncentration af thoron gas i målepunktet.

Fra indløbet (*inlet*) til selve målekammeret i instrumentet sker tillige et konstant henfald af thorngas, som kan udregnes efter ligning (8). Fra indløb til udstyr (*inlet*) til indløb i selve målekammeret reduceres koncentrationen yderligere, og $C_2 = 0,96 = 96 \%$. Inde i målekammeret bestemmes thoronkoncentrationen ud fra følgende formel /52/:

$$C_3 = \frac{C_2}{1 + L \cdot V_2 / q} \quad (9)$$

Hvor

V_2 = Volumen af internt målekammer (ca. 750 ml)

Sammenlagt for hele måleudstyret med standardopsætning, fås en koncentration i det interne målekammer på ca. 48 % af koncentration ved målepunktet. Den resterende koncentration af thoron, der var til stede i luften ved ind sugningspunktet ved målepunktet, er henfaldet i transporten fra ind sugningspunkt til detektion i instrumentets interne målekammer.

4.5.1 Radon vs. thoron som tracer

Metoden beskrevet i afsnit 4.3 og 4.4 baserer sig på at benytte thoron som den primære tracer, og radon til verifikation af målingerne. Ulempen ved at benytte thoron som tracer er, at det er nødvendigt at benytte udstyr, der kan

foretage alfaspektrometri. Der er dog måletekniske forhold, der gør, at brugen af blot radon som tracergas ikke anbefales.

Thorons henfaldsprodukt ^{216}Po har en væsentlig kortere halveringstid end radons henfaldsprodukt ^{218}Po . Det har to vigtige betydninger. For det første kan en ændring i koncentrationen hurtigere bestemmes, idet selve målingen sker i det øjeblik henfaldet sker. Et hurtigere henfald giver således en hurtigere måling. For det andet vil en registrering af et indtrængningspunkt ikke give samme efterslæb ved primært at benytte ^{216}Po som ved ^{218}Po . Den længere halveringstid gør, at der er større risiko for, at det endnu ikke henfaldne datterprodukt ^{218}Po , som allerede sidder på halvlederen i udstyret, se afsnit 4.2.1, giver udslag når man har passeret indtrængningspunktet. At bruge radons henfaldsprodukt ^{218}Po som primær tracer, vil derfor nødvendiggøre en længere efterfølgende udluftning af udstyret.

Usikkerhederne ved målemetoden, som omtalt i afsnit 4.5, gør, at det vurderes, at den optimale metode til sporing af indtrængningsveje ved thoronmålinger, er at gøre brug af både radons og thorons henfaldsprodukter.

4.6 INSTALLATION AF BLOWERDOOR

En blowerdoor anvendes typisk til at måle lufttætheden af bygninger. Udstyret består af en ventilator til at skabe et undertryk og måle en luftmængde, samt en tryksensor til måling af det af ventilatoren skabte luftryk. En blowerdoor installeres i en eksisterende dørkarm.

I nærværende projekt er der anvendt blowerdoor i forbindelse med undersøgelserne i delundersøgelse 3. Formålet med her at anvende blowerdoor er at fastholde et givent undertryk i testboligen, og således undersøge forekomsten af thoron under ”normale” forhold (uden blowerdoor) og under mekanisk frembragte forøgede undertryk (med blowerdoor) svarende til trykforhold i boligen under eksempelvis blæsevejr.

Der er foretaget thoronmålinger under 2 mekanisk frembragte undertryk på i alt 2 lokaliteter. Det blev i forvejen besluttet at foretage målinger under et forholdsvist normalt undertryk af størrelsesordenen ca. 5 Pa, samt et noget større undertryk på ca. 20 Pa. Det naturlige undertryk i boliger, fremkaldt af eksempelvis opstigende opvarmet indeluft, ligger sædvanligvis på ca. 1-3 Pa. Påvirkning af konstruktionen fra eksempelvis vind kan imidlertid give væsentligt større undertryk, og der er i flere forsøg fundet periodiske relative indendørs undertryk op til 40-50 Pa /3/.

Et relativt undertryk på 20 Pa, som er benyttet som maksimal værdi i dette forsøg, er derfor på ingen måde udtryk for en ikke-naturlig situation, men dog ikke normal tilstand under almindelige vejrforhold.

5 Undersøgellesprogram og lokaliteter

Nedenfor præsenteres undersøgelsesprogrammet overordnet, og der gives en oversigt af de enkelte lokaliteter, der har været inddraget i projektet. En detaljeret beskrivelse af de enkelte lokaliteter kan findes i bilag 6.

5.1 UNDERSØGELSESPROGRAM

Undersøgelsen er, som tidligere nævnt, inddelt i 3 delundersøgelser, som har følgende omfang:

Delundersøgelse 1. Indledende metodeudvikling, 17 lokaliteter

Delundersøgelse 2. Specifik metodeafprøvning, 9 lokaliteter

Delundersøgelse 3. Metodeafprøvning med supplerende målinger, 2 lokaliteter

Delundersøgelse 1 omfatter undersøgelser foretaget i forbindelse med en generel metodeudvikling og – afprøvning. Der er i denne fase foretaget feltarbejde på 17 lokaliteter.

Delundersøgelse 2 omfatter lokalitetsspecifikke (i alt 7 stk.) undersøgelser baseret på metodebeskrivelsen. Der er i denne fase foretaget målinger på 9 lokaliteter. Flere af de i delundersøgelse 1 indeholdte lokaliteter går igen i denne projektfase.

Delundersøgelse 3 omfatter udvidede undersøgelser på 2 selvstændige lokaliteter, forurenede af en underliggende jordforurening. Undersøgelserne er gennemført med samtidig montage af blowerdoor for at tydeliggøre indtrængningspunkterne i bygningen. Samtidig med thoronmålinger er der foretaget undersøgelser med termografi, sporgas og ppbRAE samt trykdifferensmålinger for [inde – ude] og [inde – under gulv]. De supplerende målinger er alle afrapporteret i et selvstændigt projekt /42/, men er delvist inddraget i nærværende undersøgelse for at påvise en eventuel overensstemmelse eller afvigelse mellem thoronmålinger og påviste indtrængningspunkter.

Tabel 5.1 herunder giver en samlet oversigt over projektets feltarbejde, inddelt efter ovenstående opdeling i delundersøgelser. I bilag 6 afsnit 1.2 er projektets lokaliteter i delundersøgelse 1 overordnet præsenteret. I bilag 6 afsnit 1.3 gives endvidere en præsentation af de supplerende lokaliteter der har været inddraget i delundersøgelserne 2 og 3. For hver lokalitet er præsenteret både byggetekniske og geologiske forhold såfremt de er tilgængelige.

Del	Lokaliteter	Indhold
1	Karolinegade, Skive Skovløkken, Tejn Dyrehavegårdsvej, Kolding Mømhøjvej, Studsgård Lindevej, Fredericia Lindevej, Horsens Peder Kællers vej, Horsens (11 lokaliteter)	Indledende thoronmåling med måling over 5 minutter pr. målepunkt, ca. 20 målepunkter pr. lokalitet. Samtidig med disse indledende forsøg er foretaget en metodeudvikling.
2	Peder Kællers vej, Horsens (9 lokaliteter)	Thoronmålinger efter nyudviklet metodebeskrivelse. Ca. 25 målepunkter pr. lokalitet.
3	Frederiksbjerg Torv, Århus Østergade, Rødding, Spøttrup	Udvidet undersøgelse. Thoronmålinger efter metodebeskrivelse, udført tre gange i samme målepunkter pr. lokalitet ved forskellige trykforhold afstemt med blowerdoor. Ca. 30 målepunkter pr. lokalitet. Herudover er foretaget undersøgelser med termografi, ppBRAE og sporgas.

Tabel 5.1: Oversigt over projektets feltarbejde og lokaliteter

I forbindelse med undersøgelserne udført i delundersøgelse 1 og 2, er følgende simple forholdsregler overholdt ved feltarbejdets udførelse:

- Vinduer og døre holdes lukkede
- Radiatorer og andre varmeapparater tændes
- Mekanisk udluftning aktiveres hvor det er muligt

Bevæggrunden for ovenstående forholdsregler er at skabe et så stort relativt undertryk i boligen som muligt uden brug af eksterne midler, som eksempelvis installation af blowerdoor. Ved at øge den indendørs temperatur samt udsugning via mekaniske installationer som emhætter og badeværelsesventilatorer, øges tryk- og temperaturdifferensen maksimalt uden større indgreb. Dette vil, alt andet lige, give anledning til en forøget indtrængning af poreluft til indeklima. For en nærmere uddybning se afsnit 3.

Ved undersøgelserne i delundersøgelse 3 blev installeret blowerdoor for således at skabe et konstant og veldefineret undertryk i boligen.

Ved samtlige undersøgelser undersøges primært ved rørgennemføringer af alle slags samt synlige revner og andre utætheder. For en specifik liste over undersøgelsespunkter mv., se afsnit 4.3.

For en detaljeret gennemgang af samtlige lokaliteter, se bilag 6.

6 Undersøgelsesresultater

Følgende afsnit indeholder en præsentation af data fra undersøgelserne med thoronmålinger i samtlige delundersøgelser. Resultaterne vil blive diskuteret og vurderet i afsnittene 7 og 8.

Der er foretaget i alt 28 individuelle thoron-undersøgelser på 21 lokaliteter. Undersøgelserne varierer i størrelse og omfang, afhængig af i hvilken delundersøgelse af projektet de er indeholdt. Målingerne er foretaget med et specialiseret radon måleudstyr (RAD7, nærmere beskrevet i afsnit 4.1). Selve måleproceduren er nærmere beskrevet i afsnit 4.2. Samtlige måleresultater samt målepunkternes placering er præsenteret i bilagene 2.1 – 2.4 (situationsplaner) samt 3.1 – 3.3 (måleresultater). Ved de gennemførte målinger er der påvist forhøjede thoron – og radonkoncentrationer i flere målepunkter, hvilket indikerer at der er påvist en række specifikke indtrængningspunkter for radonholdig poreluft.

6.1 INDLEDENDE METODEUDVIKLING (DELUNDERSØGELSE 1)

Undersøgelserne udført i delundersøgelse 1 omfatter en generel indledende metodeudvikling og – afprøvning. I denne delundersøgelse er foretaget thoronmålinger på 17 lokaliteter og målingerne er udført gennem 2009. Lokaliteterne er nærmere beskrevet i bilag 6 afsnit 1.2.1 – 1.2.7.

Metoden udsprang oprindeligt fra et projekt omhandlende brugen af radonmålinger som tracer for beregning af dæmpningsfaktorer over betongulv /51/. Til nævnte projekt blev indkøbt udstyr (RAD7) der har mulighed for at foretage alfaspektrometri, se afsnit 4.1. På baggrund af erfaringer fra dette projekt samt tidligere udenlandske erfaringer /52/ blev thoronmålinger første gang udført i foråret 2009. Målingerne blev udført efter en simpel målemetode med måling i udvalgte målepunkter over 5 minutter. Metoden er efterfølgende videreudviklet gennem målingerne ved de i delundersøgelse 1 inkluderede lokaliteter. I forbindelse med metodeudviklingen har der endvidere pågået tæt dialog med producenten af måleudstyret² samt en svensk entreprenør der i flere år har benyttet sig af thoronmålinger til påvisning af indtrængende radon til indeklimaet /53/.

Der er ikke i dette afsnit vist resultater fra målingerne foretaget under delundersøgelse 1, idet arbejdet i delundersøgelse 1 udgør grundlaget for den endelige metode, og målingerne differentierer sig dermed fra kategorierne i afsnit 4.4. Samtlige måleresultater samt målepunkternes placering er dog præsenteret grafisk i bilagene 2.1, 2.2 og 3.1. Målingerne er gennemført med 23 – 89 målepunkter på hver af de undersøgte i alt 17 lokaliteter. 7 af disse 17 lokaliteter er inkluderet i undersøgelserne i delundersøgelse 2. Vejrdata med temperatur- og trykforhold for et givent måletidspunkt er påskrevet bilagene såfremt de er tilgængelige.

² DurrIDGE Inc., www.durrIDGE.com

På baggrund af datagranskning er der på bilag 3.1 angivet mulige indtrængningspunkter for poreluft til indeklima, vurderet efter prioriteringsfølgen i afsnit 4.4. En vurdering af validiteten af de i delundersøgelse 1 udførte undersøgelser findes i afsnit 7.1.

På baggrund af studierne i delundersøgelse 1 er den endelige målemetode fastlagt. Metoden er nærmere beskrevet i afsnit 4.4. Fejlkilder og usikkerheder ved målingerne, som blev identificeret under undersøgelserne i delundersøgelse 1, er omtalt i afsnit 8.

6.2 RESULTATER FRA DELUNDERSØGELSE 2

Forsøgene udført i delundersøgelse 2 er udført efter metodebeskrivelsen i afsnit 4. Der er foretaget thoronmålinger på denne basis på 9 lokaliteter alle beliggende Peder Kællers vej, og målingerne er udført i december 2009. Lokaliteterne er nærmere beskrevet i bilag 6 afsnit 1.3.1. Undersøgelsen her er gennemført for at opnå et større datamateriale for vurdering af metoden.

Måledata er grafisk præsenteret i bilag 3.2. Samtlige målepunkters placering er præsenteret i bilagene 2.1 og 2.2. Målingerne er gennemført med 16 – 22 målepunkter i hver af de undersøgte i alt 9 boliger. Vejrdata med temperatur- og trykforhold for et givent måletidspunkt er påskrevet bilagene såfremt de er tilgængelige.

Samtlige klassifikationer ud fra målinger i delundersøgelsen er anført i tabellerne 6.1 og 6.2 herunder (og i bilag 3.2), vurderet efter prioriteringsfølgen i afsnit 4.4. I tabellerne er vandret angivet målepunkterne og lodret husnumre. Et tomt felt angiver at målepunktet ikke er benyttet i boligen.

En forklaring af målepunkterne ses på bilag 3.2, og målepunkterne er markeret på situationsplanerne i bilag 2.1 og 2.2. Fejlkilder og usikkerheder ved målingerne er omtalt i afsnit 8. En sammenligning mellem undersøgelser på sammenfaldende lokaliteter i delundersøgelserne 1 og 2 er beskrevet i afsnit 7.2 og i bilag 3.5.

Nr.*	B1	B2	B3	C	P	D	E	F1	F2	F4	F5	F6	F8	F9	G	H1	H3	H4	H5
15	2			1	1	1	1	1	1							1	1		
19		3		1	1	1	1	1	4							1	1		
21	1			1	2	1	1	1	1						1	1	1		
23	1			1	1	1	1	1	1	1					1	1	1		
24	4			1	1	1	1			1			1	1	1				
25	1			1	1	1	1		1	1	1				1		1		1
27	4			2	1	1	1	4	1	1	1	4			1		1	4	
29	1			1	1	1	1		4	1					1		1		2
31		4	4	1		1	1	1					1	1		1			

Tabel 6.1: Kategori-inddeling for delundersøgelse 2, målepunkter B1-H5.

* Nr. er lodret angivet med husnumre, og vandret med målepunkt nr.

Nr.*	H6	H8	I1	I2	I3	I4	J1	I2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	N
15			1	1	1		1		1		1							1
19			1	1	1		1	1	2		1							1
21			1	1	3		1	1	1		1							1
23			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						1
24	1	1							1		1		1	1	3	1	1	1
25			1	1	1		1	1	1	1	1							1
27			3	1	3		1	1		1	1							1
29			2	1	1		1	4	4		2							2
31									1		1		1	1	1		1	1

Tabel 6.2: Kategori-inddeling for delundersøgelse 2, målepunkter H6-N.
* Nr. er lodret angivet med husnumre, og vandret med målepunkt nr.

Ved undersøgelsen findes primært indtrængning ved rørgennemføringer, og gennemføringerne i teknikskabet (målepunkterne B1-B3) vurderes generelt som værende det sted i boligerne hvor den største indtrængning finder sted. Herudover er fundet indtrængning ved ydervægge, målt i udvalgte punkter hvor gulvkonstruktionen møder væggen.

6.3 RESULTATER FRA DELUNDERSØGELSE 3

I delundersøgelse 3 er foretaget udvidede undersøgelser på i alt 2 lokaliteter, Frederiksbjerg Torv og Østergade. Lokaliteterne er nærmere beskrevet i bilag 6 afsnit 1.3.2 – 1.3.3. Undersøgelserne er gennemført som beskrevet i afsnit 4, og er udført i perioden 28. april til 12. maj 2010. Ingen af de to lokaliteter har indgået i delundersøgelserne 1 og 2.

Måledata er grafisk præsenteret i bilag 3.3. Samtlige målepunkters placering er præsenteret i bilagene 2.3 og 2.4. Målingerne er gennemført med hhv. 21 og 26 målepunkter i de to undersøgte boliger. Vejrdata med temperatur- og trykforhold for et givent måletidspunkt er påskrevet bilagene såfremt data er tilgængelige. En tolkning af resultaterne for målingerne under forskellige trykforhold er beskrevet i afsnit 7.3.

Fejlkilder og usikkerheder ved målingerne er omtalt i afsnit 7.5.1.

De udvidede undersøgelser i delundersøgelse 3 er foretaget på 2 lokaliteter, forurenede af en underliggende jordforurening. Delundersøgelse 3 har inkluderet supplerende undersøgelser med montage af blowerdoor samt undersøgelser med termografi, ppbRAE - og sporgasmålinger, og trykdifferensmålinger. Samtlige supplerende undersøgelser er afrapporteret i selvstændigt projekt /42/. I dette projekt omtales primært de gennemførte thoronmålinger.

Det primære formål med de udvidede undersøgelser er at undersøge hvorledes thoronmålinger påvirkes under forskellige trykforhold. Således er undertrykket, genereret af den installerede blowerdoor, påført samtlige målesteder i delundersøgelse 3. Der er foretaget flowmålinger for enkelte målepunkter, se bilagene 4.2 og 4.3. Flowmålingerne er udført som dokumentation for indstrømning af poreluft. Målingerne er omtalt i kapitel 7.

Nedenfor ses fra hver af de to lokaliteter en nærmere præsentation af de gennemførte undersøgelser samt datapræsentation.

6.3.1 Frederiksbjerg Torv

Der er på lokaliteten gennemført i alt tre målerunder (M1-M3 i tabel 6.3) og målt i alt i 21 målepunkter. Der er målt under tre forskellige trykforhold. I målerunde 1 er målt under naturlige forhold, med varierende trykdifferens afhængig af eksterne påvirkninger (vind, temperatur mv.). Trykdifferensen i målerunde 1 er for måleperioden målt til ca. 0,6 Pa indendørs undertryk, målt som gennemsnit af trykdifferens mellem indeklime og under gulv i to målepunkter samt trykdifferensen mellem indeklime og hulmur i ét punkt.

I målerunde 2 og 3 er installeret blowerdoor og målt under forholdene 4 Pa indendørs undertryk (målerunde 2) og 20 Pa indendørs undertryk (målerunde 3). Disse undertryk er trykdifferens mellem indeklime og udenfor, etableret og målt via blowerdoor.

Målingerne på Frederiksbjerg Torv er grafisk illustreret i bilag 3.3 og resultaterne er herunder i tabel 6.3 inddelt kategorimæssigt efter den i afsnit 4.4 angivne skala. I tabellen er vandret angivet målepunkterne og lodret målerunderne 1-3.

MP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
M1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	2
M2	1	4	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	3	1	4	1	4
M3	1	4	4	4	1	1	1	3	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	4	1	4

Tabel 6.3: Kategori-inddeling for målepunkt MP 1-21, målerunde M1-M3 for lokaliteten Frederiksbjerg Torv, Århus, delundersøgelse 3.

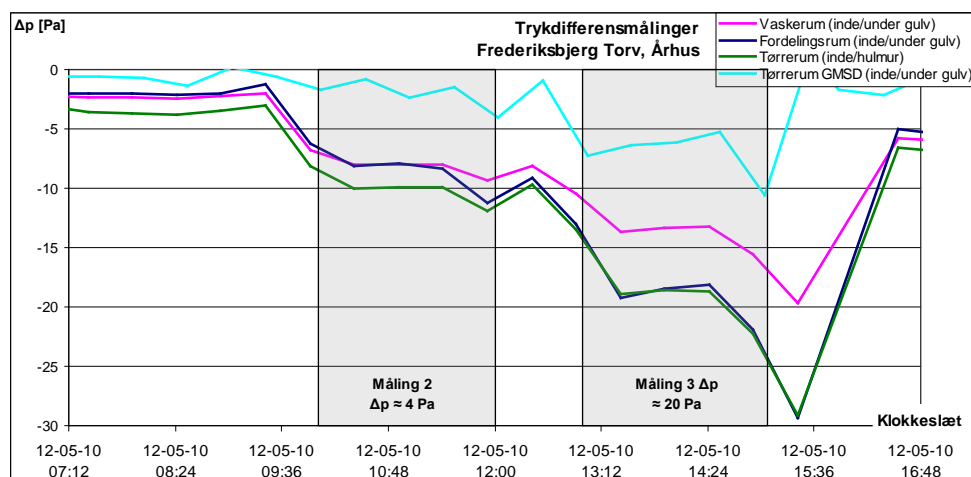
I målepunkt 2, 3, 4, 8, 9, 11, 12 og 21 sker der en vækst i målepunkternes kategori-inddeling ved stigende trykdifferens. Indholdet af radon i eksempelvis målepunkt 3 stiger nærmest lineært med voksende trykdifferens, med indhold i målepunktet på op til 880 Bq/m³ ved 0,7 Pa, op til 1.660 Bq/m³ ved 4 Pa, og op til 10.100 Bq/m³ ved 20 Pa undertryk. Indholdet i thoron i den indtrængende luft er ligeledes synligt stigende med øget trykdifferens, primært i målepunkterne 2, 3, 19 og 21.

6.3.1.1 Trykdifferens

Der er endvidere målt trykdifferens i forskellige punkter i de to boliger i delundersøgelse 3. I boligen på Frederiksbjerg Torv er målt trykdifferens i fire punkter, placeret som vist på situationsplanen i bilag 2.3. Tre af disse fire målinger er benyttet som datagrundlag, for at sikre ensartede målinger (de tre målinger er foretaget med samme instrument MFP, se afsnit 4.1.2, og viser ensartede data, se figur 6.1). Der er målt trykdifferens i følgende rum:

- Fordelingsrum (Δp mellem indeklime og under gulv, MFP)
- Vaskerum (Δp mellem indeklime og under gulv, MFP)
- Tørrerum (Δp mellem indeklime og hulmur, MFP)
- Tørrerum (Δp mellem indeklime og under gulv, GMSD 2,5 MR)

Da lokaliteten alene består af ovennævnte 3 rum i kælderniveau, er der derved målt trykdifferens i samtlige lokaler på lokaliteten. En grafisk oversigt over udviklingen i trykdifferensen over de 14 dage hvor målingen gennemføres for de fire punkter er vist i bilag 3.4. Trykdifferensen for de fire punkter på måledagen med blowerdoor er vist herunder på figur 6.1.



Figur 6.1: Udvikling af trykdifferens på måledag m blowerdoor. Negativ Δp på y-aksen betyder et relativt undertryk indendørs i forhold til under gulv.

6.3.2 Østergade

Der er gennemført tre målerunder (M1-M3) og målt i alt i 26 målepunkter. Der er målt under tre forskellige trykforhold. I målerunde 1 (M1) er målt under naturlige forhold, med varierende trykdifferens afhængig af eksterne påvirkninger (vind, temperatur mv.). Trykdifferensen i M1 er for måledagen gennemsnitligt 0,0 Pa.

I målerunde M2 og M3 er installeret blowerdoor og målt henholdsvis 5 Pa indendørs undertryk (M2) og 20 Pa indendørs undertryk (M3). Disse undertryk er trykdifferens mellem indeklima og udenfor, etableret og målt via blowerdoor.

Målingerne på Østergade er grafisk illustreret i bilag 3.3 og resultaterne er herunder i tabel 6.4 inddelt kategorimæssigt efter den i afsnit 4.4 angivne skala.

MP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
M1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M2	1	4	3	1	1	4	4	4	4	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2
M3	4	1	1	1	1	3	1	4	4	1	4	4	1	3	4	1	1	1	1	1

MP	20	21	22	23	24	25	26
M1	1	1	1	1	1	4	1
M2	1	3	1	1	4	3	1
M3	1	3	1	1	4	1	3

Tabel 6.4: Kategori-inddeling for målepunkt MP 1-26, målerunde M1-M3 for lokaliteten Østergade, Spøttrup, delundersøgelse 3.

I visse punkter sker en øgning af målepunkternes indhold af radon og thoron ved stigende trykdifferens, men det er ikke så udtalt som ved lokaliteten Frederiksbjerg Torv. Til gengæld sker der en aktivering af målepunkter ved højere trykdifferens. Således kan kun ét målepunkt tildeles kategori 4 i målerunde 1, hvilket stiger til 6 målepunkter i målerunde 2 og 7 målepunkter i målerunde 3. Ligeledes stiger antallet af kategori 3 punkter, fra hhv. 0 målepunkter i målerunde 1, 3 målepunkter i målerunde 2 til 4 målepunkter i målerunde 3.

Intensiteten af indtrængningen stiger ligeledes, hvilket tydeligt fremgår af figurerne for lokalitetens undersøgelse på bilag 3.3.

6.3.2.1 Trykdifferens

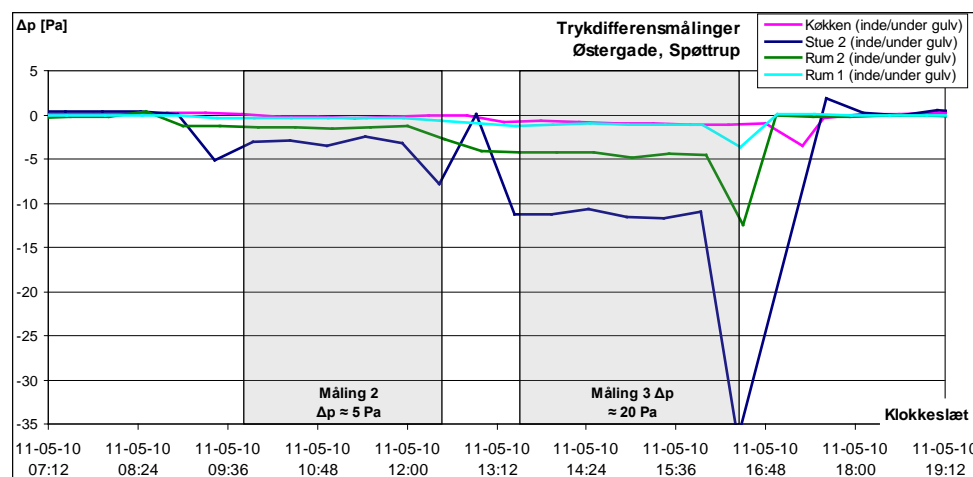
For lokaliteten på Østergade er tillige målt trykdifferens fire steder, også vist på situationsplan, bilag 2.4. På Østergade er alle trykdifferensmålinger foretaget med instrumentet af typen GMSD 2,5 MR. Der er ikke foretaget trykdifferensmålinger i samtlige lokaler. I lokaler hvor der ikke er målt en trykdifferens er denne fastlagt på baggrund af målinger i tilstødende lokaler. Lokaliteten på Østergade er inddelt i alt i 9 rum, som angivet i tabellen nedenfor, og som angivet på situationsplanen i bilag 2.4.

Rum	Baggang	Køkken	Kontor	Bad	Stue 1	Stue 2	Rum 1	Rum 2	Entré
Δp	Køkken	X	Rum 1	Køkken	Rum 1+2	X	X	X	Stue 2

"X": Lokalet har sit eget trykdifferens målepunkt

Tabel 6.5: Trykdifferens for Østergade, Spøttrup

Jf. tabel 6.5 har lokalerne Køkken, Stue 2, Rum 1 og Rum 2 sine egne trykdifferensmålepunkter. For de resterende lokaler er angivet hvilke trykdifferensmålepunkter der benyttes som reference. Således benyttes trykdifferensmålingen i Rum 1 som reference til kontoret, og gennemsnittet af Rum 1 og Rum 2 benyttes til Stue 1. Samtlige målinger er angivet på den grafiske præsentation af måledata i bilag 3.3.



Figur 6.2; Udvikling af trykdifferens på måledag m blowerdoor.

Herover er vist en grafisk præsentation af trykdifferens for lokaliteten Østergade, Spøttrup på måledagen med blowerdoor. En grafisk oversigt for udviklingen i trykdifferensen over de 14 dage målingen i de fire punkter varede, er vist i bilag 3.4. Efter måling 3 er foretaget målinger til projektet /42/ under forøgede trykforhold.

7 Vurdering af måledata

Dette afsnit indeholder generelle tolkninger af de indhentede data fra måleserierne i delundersøgelserne 1, 2 og 3, og en sammenfatning og oversigt over typisk påviste indtrængningspunkter. Desuden er indeholdt vurderinger i forhold til de individuelle undersøgelser, herunder naturlige varierende parametre og kontrollerede ændringer i trykdifferensen.

7.1 OVERORDNEDE VURDERINGER

Forsøgene i delundersøgelse 1 er udført med henblik på at opnå et erfaringsgrundlag for fastlæggelse af en konstruktiv målemetode med minimal måleusikkerhed.

Undersøgelserne er udført som enkelte målinger i enkelte boliger og viser generelt meget varierende måleværdier. Undersøgelserne er udført i boliger spredt over mange forskellige lokaliteter med forskelligartet geologi og således på lokaliteter med uens potentiale for radonindtrængning (uens indhold i jorden og uens tæthed i gulvkonstruktionen). Idet målingerne kun er foretaget som én målerunde per lokalitet, har det været essentielt i delundersøgelse 1, på forhånd at udpege de typiske målepunkter som ofte er indtrængningspunkter for thoron og radon. Undersøgelserne i delundersøgelse 1 er grafisk præsenteret i bilag 3.1. Et eksempel herfra er illustreret nedenfor på figur 7.1.

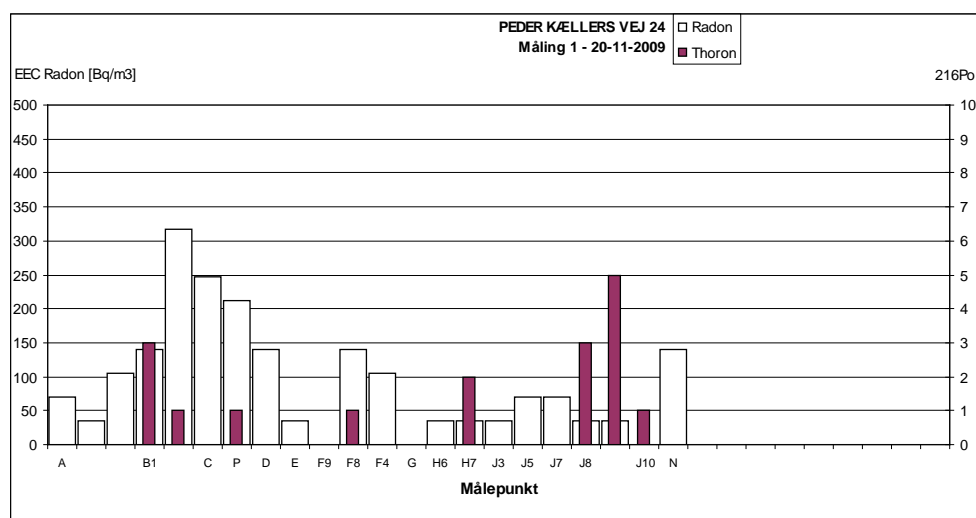
På baggrund af de praktiske erfaringer i delundersøgelse 1, er det fundet vigtigt at tilføje en referencemåling i en bolig forinden selve thoronmålingerne igangsættes. Referencemålingen udføres med henblik på at opnå en baggrundsværdi for radonindholdet i indeklimaet til senere grundlag for sammenligning efter endt måling. Det er desuden vigtigt at være opmærksom på varierende radonkoncentrationer i forbindelse med thoronmålingerne, idet forhøjet radonindhold kan forekomme i målepunkter uden væsentligt forhøjet indhold af thoron. Denne anomalitet skyldes sandsynligvis målepunktets afstand fra indtrængningspunktet, eller spredningsvejen fra poreluften til indtrængningspunktet.

Der er med baggrund i ovenstående udarbejdet en målemetode, hvor der tages højde for ovenstående problemstillinger, og en metode som tillader et mindre indhold af thorongas, uden nødvendigvis at klassificere målingen som værende tegn på et indtrængningspunkt. Målemetoden er nærmere beskrevet i afsnit 4.3 og 4.4.

7.2 SAMMENFATNING, PÅVISTE INDTRÆNGNINGSPUNKTER

Ved undersøgelserne i forbindelse med samtlige delundersøgelser, er der primært fundet forhøjede koncentrationer af thoron ved rørgennemføringer i tekniskskabe og ved radiatorer samt ved synlige skader på gulvkonstruktionen, eksempelvis revner eller huller (se bilag 3.3). Praksis følger derved litteraturen (se afsnit 3.4), hvor indtrængningen gennem disse punkter som regel er dominerende, og ofte meget tydeligt overskygger andre indtrængningspunkter.

Desuden er fundet forhøjede koncentrationer ved ”ikke-visuelle” indtrængningspunkter ved eksempelvis samlinger langs gulvflade og ydervægge. Der findes kun sjældent indtrængning gennem afløb og vandløse.



Figur 7.1; Thoronmåling, Peder Kællers vej 24, delundersøgelse 1. Enheden på højre y-akse er counts pr. minute af polonium-isotopen ²¹⁶Po.

Ovenstående figur 7.1 illustrerer som eksempel thoronmålinger foretaget i en bolig under forsøgene i delundersøgelse 1. Temperaturforhold under undersøgelsen er præsenteret i bilag 3.1. Figuren illustrerer indholdet af radon og thoron i det givne målepunkt (et målepunkt per dobbeltsøjle). I den givne måling er fundet forhøjet indhold af thoron i målepunkterne B1 (tekniskab) og J8 (ydervæg i stue, se bilag 2.1 og 2.2). Der er foruden thoron også påvist en forøget radonkoncentration i tekniskabet. Der er i enkelte andre målepunkter (P, F8, H7 og J10) fundet mindre indhold af thoron, som ikke kan afvises at udgøre indtrængningspunkter, men ikke er undersøgt ved yderligere målinger. Lokaliteten præsenteret i figur 7.1 er yderligere undersøgt i delundersøgelse 2, se figur 7.5.

7.3 MÅLING UNDER NATURLIGT VARIERENDE FORHOLD

Thorongassen spredes via poreluftens strømning gennem utætheder i gulvkonstruktionen til indeklimaet. Indstrømningen er afhængig af et indendørs undertryk (opadrettet trykdifferens over gulvet) skabt af temperaturforhold og vindpåvirkninger, se afsnit 3.2. Eftersom disse påvirkninger er varierende, er det nødvendigt at tage højde for, at målinger på samme lokalitet ikke nødvendigvis vil give enslydende resultater, idet indtrængningen er direkte påvirket af varierende faktorer. I delundersøgelse 3 er der foretaget målinger af denne trykdifferens for at påvise de naturligt forekommende variationer.

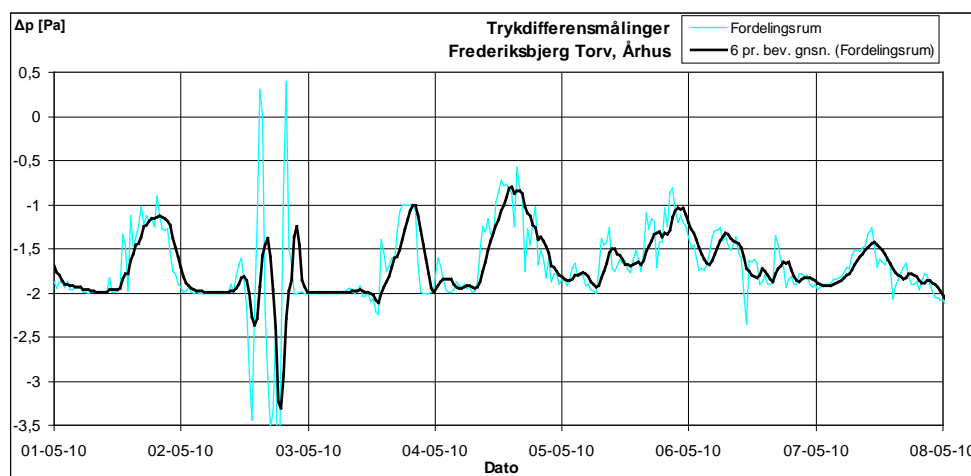
7.3.1 Variationer i trykdifferens

Forud for undersøgelse 3 er trykdifferensen mellem indeklima og under gulvet monitoreret over en forudgående 14 dages periode.

7.3.1.1 Frederiksbjerg Torv, Århus

For lokaliteten på Frederiksbjerg Torv i Århus er der ikke noget klart mønster i døgnvariationer af trykdifferens inde/under gulv. Målingen er vist herunder

på figur 7.2. Der ses dog døgnvariationer på grafen, med lokale svingninger som følge af en døgnrytme. For lokaliteten på Frederiksbjerg Torv vil denne rytme være påvirket af konstruktionen på en anden måde end for lokaliteten i Spøttrup, idet der her er tale om kælderetagen i etagebyggeri, kontra enfamiliehus i Spøttrup.

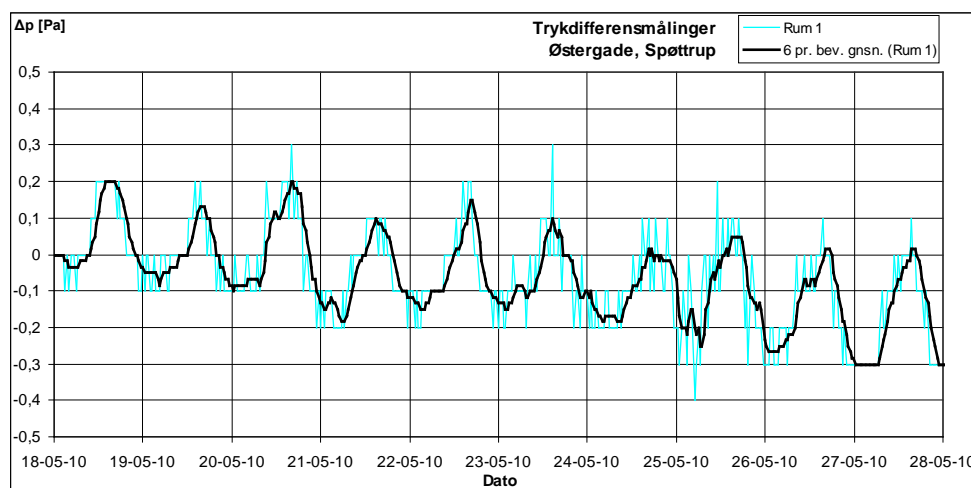


Figur 7.2; Udviklingen i trykdifferens, Frederiksbjerg Torv, Århus. Den sorte kurve viser et løbende gennemsnit over seks målinger.

For måleperioden illustreret på figur 7.2, er der generelt registreret minimal trykdifferens (mindste negative værdi) i eftermiddagstimerne. Størst trykdifferens (største negative værdi) findes generelt om natten eller i de tidlige morgentimer (lodrette gitterlinjer på kategoriakse skærer ved midnat). Der er i måleperioden påvist en gennemsnitlig variation i trykdifferensen på ca. 1 Pa mellem nat og dag. Målingerne er dog langt fra så homogene som for lokaliteten i Spøttrup. Eksempelvis ses store udsving i trykket den 2. maj om eftermiddagen. Årsagen til svingningerne er ukendte, men formodes at skyldes menneskelig aktivitet i kælderrummet, åbning af døre og vinduer, ventilation og lign. Årsagen kan også ligge i meteorologiske faktorer som eksempelvis øget vindpåvirkning af konstruktionen.

7.3.1.2 Østergade, Spøttrup

For lokaliteten på Østergade i Spøttrup varierer trykdifferensen entydigt med dag/nat temperatursvingningen. Målingen er vist herunder på figur 7.3. Fra litteraturen er det kendt, at koncentrationen af radon i et givent indeklima varierer over døgnet /ref. 8/. Det vurderes, at svingningerne i trykdifferensen er altoverskyggende årsag til disse variationer. Det vurderes yderligere, at svingningerne i trykdifferensen skyldes temperaturændringer som følge af den varmere udeluft i dagtimerne, og den modsatte nedkøling om natten. Dette vil give anledning til en større temperaturdifferens mellem inde og ude i løbet af natten, og dermed større relativt indendørs undertryk, hvilket stemmer pænt overens med de påviste variationer for trykdifferensen (figur 7.3).



Figur 7.3; Udviklingen i trykdifferens, Østergade, Spøttrup.
Hver lodret gitterlinje skærer kl. 0.00. Det ses, at den største opadrettede trykdifferens optræder mellem kl. 00-08. Ved negativ Δp er lavere tryk over gulv og højere tryk under gulv. Den sorte kurve viser et løbende gennemsnit over seks målinger

For måleperioden illustreret på figur 7.3, er der generelt registreret minimal trykdifferens (mindste negative værdi) i eftermiddags- og aften timerne. Størst trykdifferens (største negative værdi) findes generelt om natten eller i de tidlige morgentimer. Der er i måleperioden påvist en gennemsnitlig variation i trykdifferensen på ca. 0,3 Pa mellem nat og dag. Det skal samtidig bemærkes at det relative tryk indendørs (kontra under gulv) her svinger mellem over- og undertryk afhængig af tidspunktet på døgnet. For den samlede periode ses endvidere en tendens til øget undertryk i indeklimaet. Det skal dog bemærkes, at der ikke er målt meteorologiske data for måleperioden (ude – og indetemperatur samt vinddata), og trykdifferensmålingerne kan således ikke sammenlignes med måldata for faktorer, der yder indflydelse på trykdifferensen.

7.3.2 Varierende indtrængning i samme målepunkt

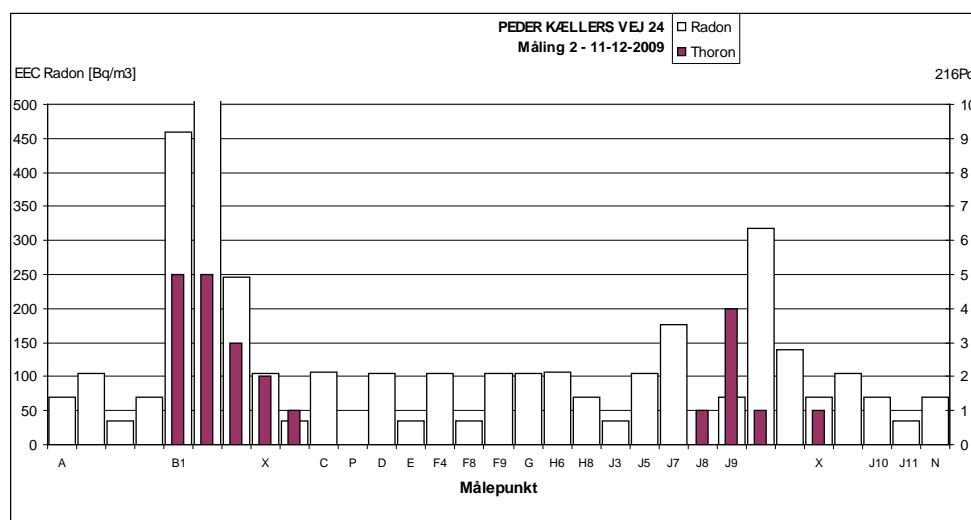
I delundersøgelse 2 er der foretaget målinger på et udvalg af lokaliteter indeholdt i delundersøgelse 1, for at undersøge en eventuel korrelation mellem målinger i samme boliger, men under naturligt varierende forhold. Målingerne er sammenholdt i bilag 3.5.

Indtrængningsraten for radon og thoron fra poreluft til indeklima er afhængig af følgende faktorer; mængden af radon og thoron der dannes i jorden, konstruktionens og jordens transportegenskaber (gennemtrængelighed) og de drivkræfter, der driver poreluft mod indeklimaet (trykdifferens over/under gulv genereret af eksempelvis temperaturforskelle ude/ide, vindpåvirkninger af konstruktionen mv.) Flere af disse faktorer giver anledning til fluktuerende tilstrømninger af poreluft (indeholdende radon og thoron) til indeklimaet. Alle ovennævnte forhold er nærmere beskrevet i afsnit 3.1 og 3.2.

Som det fremgår ovenfor er indholdet af thoron i indeklimaet i måleøjeblikket, derfor følsomt overfor den aktuelle målesituation og størrelsesordenen på de drivkræfter der i det aktuelle øjeblik indvirker på indtrængningsraten. For en måling i en bolig under ”normale omstændigheder” (altså hvor der måles under de gældende trykforhold) skal det derfor understreges, at det er muligt at ikke alle indtrængningsveje til boligens indeklima er ”aktive” i måleøjeblikket, eksempelvis på grund af varierende vindpåvirkninger, og

dermed varierende trykdifferens i specifikke rum i boligen. Der foreligger pt. ingen danske eller udenlandske undersøgelser der i detaljer afdækker hvor stor spredning der kan forekomme under varierende forhold. Hvis der ønskes et sikkert billede af alle indtrængningspunkter, vil det derfor være nødvendigt at foretage genmåling flere gange under varierende vejr- og temperaturforhold (samt eventuelt varierende beboeradfærdsmønstre).

Nedenstående figur 7.4 illustrerer en thoronmåling foretaget i en bolig under undersøgelse i delundersøgelse 2. Lokalteten er også undersøgt i delundersøgelse 1, se figur 7.1. Måleforhold under undersøgelsen er angivet i bilag 3.2. I den givne måling er fundet forhøjet indhold af thoron i målepunkterne B1 (teknikskab) og J9 (ydervæg i stue). Der er foruden thoron fundet en forøget radonkoncentration i teknikskabet.



Figur 7.4; Thoronmåling i delundersøgelse 2 (samme bolig som figur 7.1). Enheden på højre y-akse er counts pr. minute af polonium-isotopen ^{216}Po .

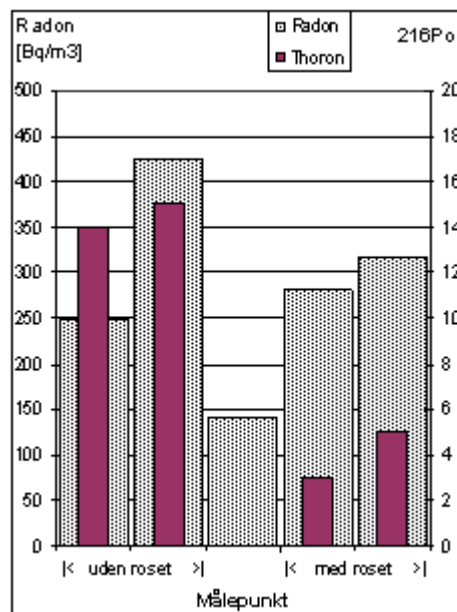
Ved undersøgelsen på samme lokalitet i delundersøgelse 1 (måling 1), blev fundet forhøjet indhold af thoron i målepunkterne B1 og J8 (afstanden mellem målepunkterne J8 og J9 er ca. 1 m). Måling 1 (under delundersøgelse 1) blev foretaget den 20. november 2009, og måling 2 (delundersøgelse 2), blev foretaget d. 11. december 2009. På trods af manglende informationer om eksempelvis trykforholdende i boligen (trykdifferens), vindpåvirkning og grundvandsstanden for måledagene, viser de to undersøgelser god overensstemmighed.

I delundersøgelse 2 ved måling i målepunktet J8, er der fundet mindre indhold af thoron i forhold til under målingen foretaget i delundersøgelse 1. Årsagen til det mindre indhold af thoron under 2. måling i forhold til 1. måling kan sandsynligvis tilskrives eksterne faktorer påvirkning af trykforholdende i boligen, og dermed indtrængningsraten i det enkelte målepunkt.

I delundersøgelse 2 finder vi, at målingerne fra delundersøgelse 1 generelt ikke er reproducerbare, og ofte giver 2. måling et andet billede end hvad der påvises ved 1. målerunde. Ofte ses dog mange sammenfaldende målinger, eksempelvis hvor en måling den ene måledag giver et højt udslag og næste dag et lidt mindre udslag, men stadig udslag. Det vurderes, at årsagen til dette er svingende tryk- og temperaturforhold, og dermed varierende indtrængningsrater i måleøjeblikket. Eftersom trykdifferensen mellem inde og

under gulvet er den afgørende drivkraft for radon og thoron til indeklimaet forventes det, at sammenfaldende trykdifferensmålinger for hovedparten ville kunne afklare afvigelseerne.

7.3.3 Indtrængning ved radiatorroset



Figur 7.5; Thoron ved radiator. Enheden på højre y-akse er counts pr. minute af polonium-isotopen ^{216}Po .

Indtrængningen af thoron blokeres meget let i forhold til radon, idet thoron har en langt kortere halveringstid. Dette er tydeligt i forbindelse med undersøgelsen i delundersøgelse 2, hvor forskellen i måleværdierne ved måling ved radiatorgennemføring med og uden roset blev undersøgt, se figur 7.5 (rosetten af plastic ses øverst på billedet). Som det ses af figuren er indholdet af radon med og uden roset nogenlunde ens, mens indholdet af thoron i den undersøgte luft er væsentlige mere varierende, svarende til ca. en faktor 3. Dette betyder, at selv simple byggetekniske foranstaltninger kan være med til at bremse indtrængningen af thoron, idet transporttiden øges og gassen dermed når at henfalde.

7.4 MÅLING UNDER KONTROLLERERE FORHOLD

I delundersøgelse 3 er der på to lokaliteter først gennemført én målerunde under naturligt varierende trykforhold og derefter to målerunder under kontrollerede trykforhold. Undersøgelsen er udført med henblik på at fastslå om der er væsentlige forskelle på indtrængningen af thoron og radon under hhv. naturligt varierende og kontrollerede trykforhold.

Undersøgelserprogrammet er nærmere beskrevet i afsnit 5.1 og bilag 6. Udover thoron og radon er der for hver lokalitet og måletidspunkt som supplement i forhold til delundersøgelse 1 og 2 målt trykforskellen mellem indeluften og under gulvet, og ved kontrollerede forhold desuden trykforskellen mellem ude og inde vha. en blowerdoor.

Målingerne i delundersøgelse 3 er grafisk illustreret i bilag 3.3 med tilhørende trykdifferens for de enkelte målepunkter. Trykdifferensen mellem indeklima og under gulv er præsenteret grafisk, mens trykdifferensen mellem indeklima og udenfor er præsenteret med tal på de enkelte grafer. Resultaterne fra måledagene er inddelt kategorimæssigt efter den i afsnit 4.4 angivne skala og vist i tabellerne 6.1 og 6.2. Den kontinuerte trykdifferens målt mellem indeklima og under gulv over en periode på ca. 14 dage, er grafisk illustreret i bilag 3.4 for begge lokaliteter.

7.4.1 Øget indtrængning ved øget trykdifferens

For begge lokaliteter er foretaget måling under forskellige trykforhold. Generelt giver større trykdifferens (indeklima/under gulv og indeklima/udenfor) anledning til en større koncentration af både thoron og radon i de individuelle målepunkter, hvilket bekræfter antagelsen om at der her vil ske en øget indtrængning af poreluft. De to lokaliteter giver imidlertid udtryk for forskellige tendenser ved måling under øget trykdifferens.

For lokaliteten på Frederiksbjerg Torv i Århus øges antallet af indtrængningspunkter og den individuelle signifikans af indtrængningen ved de enkelte målepunkter. Disse aflæses tydeligt af den grafiske fremstilling for lokaliteten på bilag 3.3.

For lokaliteten på Østergade i Spøttrup er situationen anderledes, idet signifikansen af de enkelte punkter ikke synes forøget med eskalerende trykdifferens. Dog øges den overordnede indtrængning ved et øget antal indtrængningspunkter. Lokaliteten i Spøttrup er imidlertid væsentlig mere utæt, idet det i forsøgene viste sig problematisk at forcere det relative indendørs undertryk. Som det kan aflæses af bilag 3.3 formår blowerdoor installationen ikke at oparbejde en trykdifferens mellem indeklimaet og under gulvet på 20 Pa i samtlige rum. Dette må skyldes utæthed i konstruktionen, og kan være årsag til, at signifikansen af de enkelte utætheder mod jorden ikke eskalerer.

7.4.2 Forskelle i trykdifferens

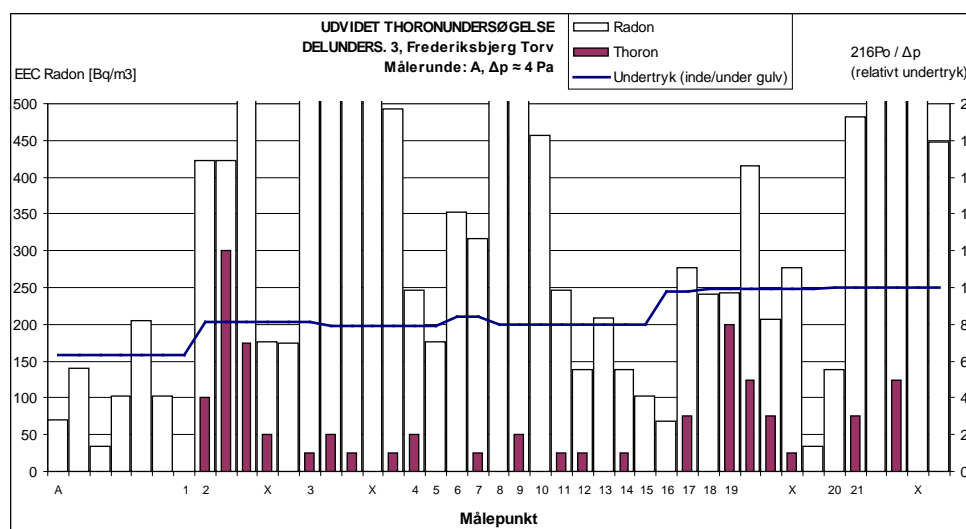
For lokaliteterne Frederiksbjerg Torv, Århus og Østergade, Spøttrup er foretaget målinger af trykdifferens i en række punkter. Indledende er målt trykdifferensen mellem indeklima og under gulvet for en længere periode, og i denne periode er foretaget en indledende thoronmåling (M1, afsnit 6.3). Herudover er for begge lokaliteter udført to ekstra målerunder under kontrollerede trykforhold (M2 og M3, afsnit 6.3). Generelt er det ved undersøgelsen tydeligt, at øget trykdifferens mellem indeklima og udenfor (ved anvendelse af blowerdoor), giver anledning til en øget trykdifferens mellem indeklima og under gulv – dog ikke nødvendigvis med sammenlignelige trykforhold.

Vigtigst er det at bemærke, at en given konstant trykdifferens inde/ude ikke giver anledning til samme konstante trykdifferens inde/under gulv. Dette vurderes at skyldes forskelle i gulv- og vægkonstruktionens tæthed mod jorden, hvor rum med tætte gulve har højere relative trykdifferenser inde/under gulv end mere utætte rum.

For lokaliteten i Århus er der for enkelte lokaler målt højere trykdifferens inde/under gulv end den samtidige trykdifferens inde/ude. Dette er illustreret på figur 7.6 herunder samt bilag 3.3 hvor trykdifferensen inde/under gulv er

vist med en kurve for et samtidigt undertryk inde/ude. For eksempel ses det, at trykdifferensen inde/under gulv varierer mellem 6-10 Pa for et samtidigt undertryk inde/ude på ca. 4 Pa. Årsagen til denne forskel kendes ikke, men kan formodentlig have oprindelse i temperaturforskelle mellem inde, ude og under gulv.

For lokaliteten i Spøttrup er trykdifferensen inde/under gulv væsentlig mere trægt (varierer fra 0-5 Pa ved 5 Pa undertryk), hvilket må formodes at skyldes mere utætte gulv- og vægkonstruktioner. Dog har lokaliteten i Spøttrup en større klimaskærm der ved installation af blowerdoor skulle tætnes. Såfremt denne tætning ikke er udført tilstrækkelig kan det formodes, at det undertryk der skabes af blowerdoor hurtigt ”uddør” inden det forplantes videre over boligens areal. Lokaliteten i Århus var væsentlig mindre og derved lettere at sikre tæthed overfor infiltration fra udeluften.



Figur 7.6; Delundersøgelse 3 målerunde 2, Frederiksbjerg Torv, Århus. Enheden på højre y-akse er counts pr. minute af polonium-isotopen ^{216}Po samt det relative indendørs undertryk i Pa.

7.5 METODEEVALUERING

De udførte undersøgelser på i alt 21 individuelle lokaliteter i delundersøgelserne 1,2 og 3, har givet anledning til en indsigt i målemetodens anvendelighed under meget forskellige forhold.

Metoden er stadig ny, og har kun meget sjældent været benyttet udover undersøgelserne i dette projekt. Desuden er litteraturen knap med projekter der direkte belyser forhold omkring ”indtrængning af thoron” og ”vurderinger baseret på thoronmåling”. Modsat dette forekommer der en del udenlandsk materiale, der beskriver thorons datterprodukter som mulige sundhedsskadelige stoffer på linje med radondøtre.

Dette afsnit vil summere op på usikkerheder der kan forekomme ved thoronmålinger.

7.5.1 Fejlkilder og fejlfortolkning

Der er flere aspekter i forbindelse med en thoronmåling, hvor der kræves opmærksomhed på mulige usikkerheder. Mange af disse er nævnt under afsnit 4.5, som opridser usikkerheder og fejlkilder i forbindelse med selve målingen og måleinstrumentet. Disse gentages kort herunder. Herudover er flere eksterne mulige fejlkilder som desuden skal tages højde for.

7.5.1.1 *Fejlkilder forårsaget af drivkræfter for poreluftindtrængning*

Som nævnt i afsnit 7.3 og 3.2 styres den konvektive indtrængning af poreluft af trykdifferens over gulv, skabt af primært temperatur og vindforhold. Disse forhold er tidsligt foranderlige og vil dermed variere, med varierende indtrængning til følge. Som eksempel herpå, er koncentrationen af radon i et givent indeklima generelt højere om vinteren end sommeren, idet temperaturforskellen mellem inde og ude her er højest, og idet der sjældnere ventileres med kold udeluft. Det er nogle af disse forhold, der er forsøgt undersøgt i delundersøgelse 3, hvor de målepunkter der under normale, naturlige trykforhold klassificeres som indtrængningsveje, også ofte øges i intensitet med øget undertryk. Der er dog flere punkter hvor dette ikke er gældende, og hvor et indtrængningspunkt fundet under ”naturlige” forhold, ikke er gennemgående ved en efterfølgende måling i samme punkt. Et forhold der også afspejler sig i delundersøgelse 2, som netop gik ud på at undersøge de samme boliger to gange. Det vurderes på baggrund heraf, at målinger af trykdifferensen mellem indeluften og under gulv er essentielle i sammenhæng med thoronmålinger.

7.5.1.2 *Fejlkilder forårsaget af undersøgelsesmetode*

Alt andet lige, vil et øget indhold af thoron og radon i et målepunkt i indeklimaet vise, at der her sker en indtrængning af poreluft. Som omtalt i afsnit 4.5 er der dog flere faktorer det er nødvendigt at være opmærksom på ved udstyrets opsætning og ved metodens udførelse.

Det er vigtigt at sikre konsistens i målingerne og at sikre at det benyttede udstyr er kalibreret korrekt, også i forhold til måleprogrammets fysiske setup. Det anbefales at benytte et system med konsistente dimensioner, hvor udstyret er kalibreret i forhold til en standardopsætning. Det benyttede udstyr i dette projekt, er indstillet som angivet i afsnit 4.5, og afvigelser fra dette setup betyder, at målingen kan være behæftet med fejl. Benyttes et længere indsugningssystem, andre filtre eller lignende, kan det skabe fejl i udstyrets beregninger af gas koncentrationen. Dette er videre forklaret i /52/.

Som yderligere nævnt i afsnit 4.5, giver et standard udstyrs setup en thoronkoncentration i udstyrets interne målekammer på ca. 48 % af den oprindelige koncentration ved målepunktet. Den resterende koncentration af thoron, der var til stede i luften ved indsugningspunktet ved målepunktet, er henfaldet i transporten fra indsugningspunkt til detektion i instrumentets interne målekammer. Det vurderes, at dette forhold kan give problemer i forhold til ”svage” indtrængningspunkter under naturlige trykforhold. Afhængig af indtrængningspunktets fysiske udformning kan det tænkes, at visse utætheder tillader større flow end andre. Utætheder der blot tillader et lavt flow og dermed en lille indtrængning af poreluft til indeklimaet, vil muligvis ikke indeholde tilstrækkeligt thorongas til en fuldstændig detektion ved målepunktet, såfremt drivkraften (undertrykket i indeklimaet) i måletidspunktet er lille, hvilket understreges af undersøgelserne i delundersøgelse 3.

En meget vigtig fejlkilde ved at benytte thoronmålinger til at lokalisere indtrængningspunkter, er at thoronmålinger, som foretaget i dette projekt, kun foretages i udvalgte målepunkter. Som metoden foreligger nu, måles ikke kontinuerligt over hele bygningsfladen, men i på forhånd udvalgte punkter som følge af en byggeteknisk gennemgang af bygningen. Det skal derfor gøres klart, at eftersom thoronmålinger ikke foretages overalt, kan der forekomme vigtige indtrængningspunkter som ikke identificeres ved undersøgelsen. Det er derfor vigtigt at forberede et grundigt måleprogram, hvor de erfaringsmæssigt hyppigste indtrængningspunkter gennemgås.

7.5.1.3 Fejlkilder forårsaget af de fysiske omstændigheder

Udover mulige fejlkilder ved udstyr og varierende indtrængningsmønstre for poreluft til indeklimaet, kan de fysiske omstændigheder ved målingen tillige forårsage kilde til usikkerheder.

En vigtig fejlkilde ved en undersøgelses fysiske omstændigheder, er omtalt i afsnit 7.3.2, hvor det illustreres at simple installationer (som rosetter) kan være medvirkende årsag til begrænset indtrængning af thorongas. Disse installationer vil ikke nødvendigvis standse indtrængning af hverken radon eller flygtige organiske forureningskomponenter, hvorfor det er en idé at holde sådanne installationer for øje ved en eventuel måling.

Som nævnt i afsnit 4.5 kan der forekomme målepunkter hvor en indtrængningsvej ikke påvises med øget thoronindhold, men hvor indholdet af radon vil være udslagsgivende. Det vurderes at byggetekniske forhold, som eksempelvis gulvbelægning over en sætningsrevne, kan give anledning til sådanne målinger, idet spredningsvejen fra jord til indeklima i så fald kan blive så lang, at indholdet af thoron når at henfalde forinden målepunktet. Derved sker indtrængningen ikke direkte i forbindelse med målepunktet, men andetsteds, og en eventuel senere tætning vil ikke have effekt, med mindre det oprindelige indtrængningssted lokaliseres.

Det forventes desuden, at enkelte kilder i indeklimaet kan bidrage til et thoronindhold i umiddelbar nærhed af objektet. Materialer af sten- og bjergarter som eksempelvis granitbordplader og lignende, kan forventes at indeholde uran og thorium i større mængder, og vil givetvis bidrage til en øget radonkoncentration i indeklimaet. Hvorvidt sådanne materialer bidrager til thoronmålinger vides ikke, men det anbefales at undgå målinger i umiddelbar nærhed af disse materialer. Desuden må det forventes, at bygningens konstruktion og materialevalg kan have betydning for målingerne (afsnit 3.4.1). Bygninger uden betondæk, eksempelvis med trægulv på strøer direkte på jord, må tillige formodes at give anledning til mere komplicerede forhold, idet der i sådanne tilfælde kan forventes et væsentligt forøget indhold af både radon og thoron i indeklimaet /57, 58/.

7.5.2 Opsamling

Overordnet set har projektet vist, at thoronmålinger kan benyttes til at registrere indtrængning af poreluft til indeklimaet. Undersøgelselementerne i projektet har alle haft til hensigt at udvikle en målemetode og at finde og påvise usikkerheder ved målingen og de forhold og faktorer der gør sig gældende i måletidspunktet.

Det er tiltænkt at en thoronmåling fremover skal være en simpel metode til registrering af indtrængende poreluft fra jorden, og her er det vigtigt at minimere risikoen for fejlkilder og usikkerheder ved udførelse.

Den vigtigste usikkerhed ved målingerne udført under delundersøgelserne 1 og 2 er usikkerheden omkring trykforholdene på måletidspunktet. Som illustreret i delundersøgelse 3, er undertrykket i indeklimaet, forholdet mellem trykket i indeklimaet og under gulvet, afgørende for den mængde af poreluft der suges ind. Der er tidligere foretaget modelberegninger der viser, at indtrængningsraten er direkte proportional med størrelsen af undertrykket /7/. Undersøgelserne foretaget i dette projekt understøtter ikke konsekvent disse modelberegninger, men viser tydeligt, at indtrængningen primært styres af undertrykkets størrelse. Det er derfor tilrådeligt at registrere undertrykkets størrelse ved fremtidige målinger, for at vurdere indtrængningen under varierende forhold.

Det vurderes at thoronmålinger, som udført i dette projekt, giver et rimelig tilfredsstillende billede af poreluftens indtrængning til indeklimaet, selv hvis målingerne udføres under normale trykforhold. , eftersom sådanne vil give anledning til et relativt indendørs undertryk. En blowerdoor kan benyttes til at forcere indtrængning af poreluft til indeklimaet, men det vurderes ikke at være nødvendigt for at anvende thoronmålinger, fordi en blowerdoor genererer et relativt undertryk i boligen og dermed en indtrængning af poreluft, der ikke hører hverdagen til. Der kan dog forekomme situationer hvor dette undertryk ikke eksisterer, og hvor det således kan være en god ide at anvende blowerdoor. Dette bør overvejes i den enkelte sag, og bør understøttes med måling af trykdifferensen mellem indeklima og forholdene under gulvet.

8 Metodens anvendelighed

I dette afsnit diskuteres de gennemførte undersøgelselementer indeholdt i projektet i forhold til en fremtidig anvendelse af thoron- og radonmålinger i forbindelse med undersøgelser og afværgestrategier på forurenede lokaliteter.

Måleresultaterne vurderes at have givet et væsentligt forbedret grundlag for fremtidige overvejelser om at anvende thoron og radon som sporgas i undersøgelses- og afværgesammenhæng.

Endvidere har projektet givet mulighed for ny dataindsamling, der kan anvendes i vurderinger omkring de processer og mekanismer, der spiller ind ved selve indtrængningen af poreluft der eventuelt kan indeholde forureningsstoffer.

8.1 THORON SOM SPORGAS FOR INDRÆNGENDE PORELUFT

Når indeklimaet i en bygning er varmere end den omgivende atmosfære, vil den opvarmede luft stige til vejrs, og forlade konstruktionen gennem utætheder i tag - og vægkonstruktion. Herved dannes et undertryk i bygningens lavere dele som vil tiltrække koldere luft udefra og fra jorden under bygningen.

Thoron dannes kontinuerligt i jorden og spredes via poreluftens strømning i influenzonen til indeklimaet. Strømningen foregår primært konvektivt, direkte afhængigt af undertrykkets størrelse. Givet et konstant undertryk vil thoron og radon altid føres ind i indeklimaet, via poreluftens konstante flow. Strømning af radon til et indeklima er styret af både advektiv og diffusiv transport hvorimod strømningen af thoron er styret af advektiv transport jf. afsnit 3.3.

Et betondæk konstituerer sædvanligvis barrieren mellem jord og indeklima. Dækket skal udføres så lavpermeabelt som muligt for at forhindre opstigende fugt og poreluft. Der vil dog typisk foregå en indtrængning af poreluft til indeklimaet, grundet gennembrydninger af betondækket af diverse installationer, rørgennemføringer, svind- og sætningsrevner samt skader på bygningens radonsikring i forbindelse med udførelsen. Sådanne utætheder vil oftest udgøre poreluftens spredningsvej fra jord til indeklima.

Et forhøjet indhold af thoron i et målepunkt, set i forhold til indholdet i referencepunktet, vil, alt andet lige, give antydning af en indtrængning af poreluft i umiddelbar nærhed af målepunktet. Indholdet af thoron i indeklimaet kan således benyttes som sporgas for poreluftsindtrængning til indeklimaet.

Thorons henfaldsprodukt ^{216}Po benyttes som den primære tracer, og radons henfaldsprodukt ^{218}Po som den sekundære. Årsagen er, at forhøjet indhold af ^{216}Po i indeklimaet kun kan oprinde fra advektiv indtrængning af thoron i umiddelbar nærhed af målepunktet, og derfor ikke kan anlede til en falsk-positiv måling. Desuden har ^{216}Po en væsentlig kortere halveringstid end

radons henfaldsprodukt, og muliggør derfor hurtigere målinger, idet en koncentrationsændring vil vise sig hurtigt. Målinger af indholdet af ^{218}Po vil bidrage til målingens validitet, og kan benyttes som en verificering af resultatet, men vurderes ikke at kunne stå alene.

8.2 ANBEFALINGER FOR FREMTIDIG ANVENDELSE AF METODEN

Samlet vurderes det, at påvisning af forhøjet indhold af thoron ved målepunkter i indeklimaet, kan benyttes som indikator for indtrængning af poreluft fra undergrunden. Metoden vurderes direkte at kunne knyttes til vurderinger omkring en eventuel indtrængning af flygtige forureningsstoffer. Metoden er afhængig af eksterne trykforhold, og det vurderes derfor, at der bør foretages samtidige målinger af trykdifferens mellem indeklima og under gulv i måleperioden.

8.2.1 Måleprogram

Thoronmålinger, som foretaget i dette projekt, har til formål at påvise indholdet af polonium isotoperne ^{216}Po og ^{218}Po i indeklimaet. Til dette formål skal benyttes avanceret måleudstyr, som beskrevet under afsnit 4.2. Disse isotoper er de eneste af relevant betydning for registrering af indtrængende poreluft, idet de er kortlivede og hurtigt henfalder til andre radioisotoper. Henfaldsprodukter senere i radons og thorons henfaldskæde vil spredes langt mere uniformt i indeklimaet, som følge af de længere halveringstider for bly isotoperne ^{212}Pb og ^{214}Pb , se afsnit 3.4.

Thoronmålingerne foretages ved måling i punkter i gulvniveau. Oftest vil der udvælges et antal målepunkter på forhånd. Samtlige indtrængningspunkter til indeklimaet kan sandsynligvis ikke påvises ved en gennemgang, men det vurderes at de væsentligste indtrængningspunkter kan registreres. Det er essentielt at måleprogrammet indeholder almindeligt forekommende utætheder, der oftest opstår i forbindelse med gennembrydende installationer. Det anbefales at programmet indeholder elementerne beskrevet i afsnit 4.

Herudover bør der foretages en byggeteknisk gennemgang til visuel vurdering af forhold omkring spredningsveje/indtrængningspunkter i indeklimaet /4/.

Indholdet af thoron og radon i jorden under bygningen fluktuerer (både tidsligt og rumligt) som følge af den lokale geologi samt temperatur og fugtforhold. Koncentrationen af både thoron og radon i jorden er generelt væsentligt højere end indholdet i indeklimaet. Varierende trykforhold giver anledning til væsentligt varierende indtrængningsmønstre. På baggrund heraf anbefales det at trykdifferensen mellem indeluft og under gulv på måletidspunktet registreres, for at vurdere validiteten af målingerne. Det anbefales at udføre flere samtidige målinger af trykdifferensen, idet denne kan variere over bygningsplanen.

9 Referenceliste

- /1/ Poreluftprojekt – Styrende parametre for tidlige variationer af indholdet af klorerede opløsningsmidler i sand- og lerjorde. Miljøprojekt nr. 1094, 2006.
- /2/ Poreluft og indeklima – Hvordan er de to koblet? ATV's temadag d. 9. marts 2009.
- /3/ Radon som tracer ved indeklimaundersøgelser. Miljøprojekt af NIRAS, Region Midtjylland. Under udarbejdelse 2010.
- /4/ Afværgekatalog – tidlig indsats overfor indeklimapåvirkning. Miljøprojekt nr. 750, 2003.
- /5/ Entry of soil gas and radon into houses. C. Andersen, RISØ, 1992.
- /6/ en.wikipedia.org: "stack effect". December 2010.
- /7/ Metode til risikovurdering af gasproducerende lossepladser. Miljøprojekt nr. 648, 2001.
- /8/ Radon i danske boliger. C. Andersen, RISØ, Sundhedsstyrelsen 2001.
- /9/ Radon and its decay products in indoor air. W. Nazaroff & A. Nero, 1988.
- /10/ Naturally Occuring Radioactivity in the Nordic Countries – Recommendations. De nordiske strålingsmyndigheder i Danmark, Finland, Island, Norge og Sverige, 2000.
- /11/ Radon-222 Exhalation from Danish Building Materials: H+H Industri A/S results. C. Andersen, RISØ, 1999.
- /12/ Radioaktive stoffer i danske byggematerialer. K. Ulbak, Statens Institut for Strålehygiejne, 1980.
- /13/ The Thoron Issue: Monitoring Activities, Measuring Techniques and Dose Conversion Factors. C. Nuccetelli & F. Bochicchio, Italian Institute of Health, 1998.
- /14/ Thoron Daughter Concentrations in UK Homes. K. Cliff et al. National Radiological Protection Board, 1992.
- /15/ Environmental Radon Newsletter; Thoron in houses.

- L. Proctor, UK Health Protection Agency, winter 2004 issue 41.
- /16/ A Study of Indoor ^{220}Rn and ^{222}Rn Decay Product Concentrations in the UK.
L. Proctor. RWE NUKEM ltd. 2006.
- /17/ Indoor Thoron and Radon Progeny Measurements.
K. Tu et al. US Department of Energy, 1992.
- /18/ On the Dose Rate Indoors from Building Materials.
L. Quindos et al. New Mexico Institute of Mining and Technology, 1987.
- /19/ A simple technique for determining the equilibrium equivalent Thoron concentration using a CR-39 detector: Application in mineral treatment industry.
C. Kranrod et al. National Institute of Radiological Sciences, Japan, 2009.
- /20/ Measuring Thoron (^{220}Rn) in Natural Waters.
W. Burnett et al. Royal Society of Chemistry, 1994.
- /21/ Distributions of Thoron Progeny Concentrations in Dwellings.
T. Yamasaki et al. Department of Nuclear Engineering, Nagoya University Japan, 1995.
- /22/ Simulation of the Concentrations and Distributions of Indoor Radon and Thoron.
W. Zhuo et al. Department of Nuclear Engineering, Nagoya University, Japan, 2001.
- /23/ Thoron Exhalation from Building Material and Related Indoor Concentrations.
J. Tschiersch & O. Meisenberg. Institute of Radiation Protection Neuherberg, Germany, 2008.
- /24/ Room Model with Three Modal Distributions of Attached ^{220}Rn Progeny and Dose Conversion Factor.
D. Nikezic & N. Stevanovic. University of Kragujevac, 2006.
- /25/ An Experimental Study on Diffusion and Exhalation of ^{222}Rn and ^{220}Rn from Buildings Materials.
K. Folkerts et al. Institut für Biophysik der Universität des Saarlandes, 1984.
- /26/ Radon Generation, Entry and Accumulation Indoors.
L. Guiteras, Universitat Autònoma de Barcelona, 1997.
- /27/ Handbook of Chemistry and Physics.
C. Hammond, CRC Press, 2004.
- /28/ Tidligere renseri Frederiksbjerg Torv 8-10, Århus.
Supplerende undersøgelser samt afværgeprogram (revideret), NIRAS for Region Midtjylland. 6. februar 2008.

- /29/ Orienterende forureningsundersøgelse, Østergade 5A og 5B, Rødding, Dansk Miljørådgivning A/S for Region Midtjylland. 10. november 2008.
- /30/ Gas Geochemistry and ²²²Rn Migration Processes. G. Martinelli, Servizio Cartografico e Geologico, Bologna, Italy, 1998.
- /31/ Migration of Carrier and Trace Gases in the Geosphere: An Overview. G. Etiope & G. Martinelli. Istituto Nazionale de geofisica e Vulcanologia, Rome, Italy, 2001.
- /32/ Transport af gasformig forurening i umættet zone og i bygninger. COWI, AVJ, Teknik og Administration, nr. 7 2004.
- /33/ Radon i danske boliger: Mekanismer, modellering, reduktion og kortlægning. C. Andersen, RISØ. 2003.
- /34/ Methods of safe disposal of zircon flour assessment of potential radiological exposure from cement aggregates and mixes containing zircon flour. R. Strydom & J. Selby. South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003.
- /35/ Thoron in Swedish Buildings. L. Mjönes et al. Swedish Radiation Protection Institute, 1995.
- /36/ Long-Term Measurements of Indoor Radon and its Progeny in the Presence of Thoron Using Nuclear Track Detectors: A Novel Approach. K. Amgarou, Universitat Autònoma de Barcelona, 2002.
- /37/ Measurements of Thoron and Thoron Progeny Indoors in Sweden. L. Mjönes et al. Swedish Radiation Protection Institute, 1992.
- /38/ Encyclopedias of Environmental Waste Pollution. G. Chhatwal, 2002.
- /39/ Thoron Gas Concentration and Aerosol Characteristics of Thoron Decay Products. A. Reineking et al. Isotopenlaboratorium der Georg-August-Universität, Germany, 1992.
- /40/ EML Thoron Gas Measurements. E. Knutson et al. US Department of Energy, 1994.
- /41/ Radon and Thoron Parallel Measurements in Hungary. N. Kávási et al. Pannon University, Hungary. 2006.
- /42/ Teknisk notat: Spring af indtrængningspunkter for forurenede poreluft fra underside af hus til indeklima. S. Kreilgaard, M. Langeland, Grontmij Carl Bro 17. december 2010.

- /43/ Orienterende forureningsundersøgelse, Frederiksbjerg Torv 10, 8000 Århus.
Carl Bro for daværende Århus Amt. 8. oktober 2004.
- /44/ Supplerende undersøgelser, Århus Amt, Frederiksbjerg Torv 10, Århus.
Carl Bro for daværende Århus Amt. 10. maj 2006.
- /45/ Radonsikring i nybyggeri, dokumentation og teknologiudvikling. NIRAS for Boligfonden Kuben og Miljøstyrelsen. Under udarbejdelse 2010.
- /46/ Karolinegade 1, Skive. Supplerende undersøgelser og projektforslag. NIRAS for Region Midtjylland, juli 2009.
- /47/ Byggeteknisk gennemgang og radonmålinger. Vurdering af mulige afværgeløsninger.
NIRAS for Bornholms Regionskommune. Notat af 21. oktober 2009.
- /48/ Tidligere renseri, Dyrehavegårdsvej 7A-7S, Kolding. Indsats over for jordforurening. Afgrænsende forureningsundersøgelser samt byggeteknisk gennemgang.
NIRAS for Region Syddanmark, februar 2010.
- /49/ Momhøjvej 8, Studsgård. Supplerende forureningsundersøgelser. NIRAS for Region Midtjylland, marts 2009.
- /50/ Lindevej 3, Taulov. Byggeteknisk gennemgang, radon og thoron undersøgelser.
NIRAS for Lotte Pia Uttrup, april 2009.
- /51/ Radonmålinger som tracer.
J. B. Petersen, VIA University College 2008.
- /52/ RAD7 Radon Detector user Manual.
DurrIDGE inc. 2009.
- /53/ Comnet AB Radonsanering v. Thomas Lindhe
www.radonsanering.se.
- /54/ Metoder til sporing af konvektive indtrængningsveje for poreluft til indeklima.
Miljøprojekt af NIRAS, Region Midtjylland. Under udarbejdelse 2011.
- /55/ Is diffusion, thermodiffusion or advection a primary mechanism of indoor radon entry?
L. Minkin, 2002.
- /56/ Radon entry modelling – slab on grade.
K. Nielsen et al, 1991.

- /57/ Increased Indoor Thoron Concentrations and Implication to Inhalation Dosimetry.
J. Tschiersch et al. Institute of Radiation Protection Germany, 2007.
- /58/ Population Exposure to Indoor Radon and Thoron Progeny.
O. Jacob et al. Institute of Public Health Iasi, Romania, 2001.

Resumé

Der er foretaget indledende metodeudvikling og specifik metodeafprøvning på et antal forurenede grunde. Thoron, som er en isotop af radon, har en kort halveringstid. Når der måles thoron ved en potentiel indtrængningsvej, er det derfor et udtryk for, at der sker en indtrængning af poreluft, som er drevet af undertryk i bygningen. Metoden vurderes at være velegnet. Det anbefales, at der udføres differenstrøkmålinger over gulvet sammen med thoronmålingerne.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
DK - 1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

www.mst.dk