

Technical University of Denmark



Radon som sporgas for jordluftindtrængning til hus ved forurennet renserrgrund

Andersen, Claus E.

Publication date:
2001

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Andersen, C. E. (2001). Radon som sporgas for jordluftindtrængning til hus ved forurennet renserrgrund. (Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; No. 1279(DA)).

DTU Library

Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**Radon som sporgas for
jordluftindtrængning
til hus ved forurenede
renserigrund**

Claus E. Andersen

Radon som sporgas for jordluftindtrængning til hus ved forurenede renserigrund

Claus E. Andersen

Resumé I nærværende undersøgelse anvendes radon-222, som er en naturligt forekommende radioaktiv gas, som sporgas for jordluftindtrængning til et hus, der er nabo til en forurenede renserrund. Dette er muligt, da poreluftkoncentrationen af radon i jorden under huset er omkring 1000 gange højere end udeluftens koncentration, og selv en meget lille indtrængning af jordluft til huset kan derfor have stor betydning for dets radonkoncentration. Undersøgelsen bygger bl.a. på kontinuerte målinger af radon, differenstryk, atmosfæretryk, og temperaturer i indeklimaet samt spotmålinger af radon under terrændækket og i jorden omkring og umiddelbart under den undersøgte ejendom. Pga. en konstateret jordforurening med klorerede opløsningsmidler (tetrachlorethylen, PCE) foretages der oprensning af den umættede zone vha. vakuumeekstraktion og dampinjektion. Undersøgelsen påviser, at vakuumeekstraktionen påvirker radonforholdene i og under huset. Når vakuumanlægget er tændt er radonkoncentrationen i huset så lav, at det svarer til det forventede bidrag fra byggematerialer og udeluft. Når vakuumanlægget slukkes, stiger radonkoncentrationen i ejendommen. I gennemsnit ændres koncentrationen fra 10 til 30 Bq/m³. Det formodes, at radonkoncentrationen stiger pga. øget indtrængning fra jorden. En regressionsanalyse viser, at der er sammenhæng mellem ændringen af radonkoncentrationen i huset og trykforholdene. Bl.a. er der en tendens til at radonkoncentrationen stiger, når det atmosfæriske tryk er faldende. Disse forhold tyder på, at der sker en advektiv indtrængning af radon (dvs. at radon trænger ind med en trykdriven luftstrøm) fra jorden under huset, når vakuumanlægget er slukket. Under en række simplificerende antagelser kan det beregnes, at indtrængningen af luft fra det kapillarbrydende lag (dvs. "jordluft") er omkring 1 m³/h, når vakuumanlægget er slukket. Denne vurdering er dog behæftet med stor usikkerhed, og der er formodentlig tale om et overestimat, idet det eksempelvis er forudsat, at der ikke forekommer diffusion igennem betondækket. Rapporten beskriver desuden en ny metode, hvor radonmålinger anvendes til at vurdere influenszonen for et vakuumeekstraktionsanlæg. Det vurderes, at vakuumanlægget ventilerer omkring 10000 m³ jord. Denne del af undersøgelsen understøttes af numeriske modelberegninger foretaget med modellen Rnmod3d.

Claus E. Andersen
Forskningscenter Risø
Afdelingen for Nuklear Sikkerhedsforskning
Bygning NUK-201
DK-4000 Roskilde.
Tlf. (+45) 4677 4912, Fax (+45) 4677 4977.
Internet: www.risoe.dk/nuk
Elektroniske postadresse: claus.andersen@risoe.dk

Denne rapport kan hentes på elektronisk form fra Risø's hjemmeside:
www.risoe.dk

ISBN 87-550-2907-8 (papirudgave)
ISBN 87-550-2908-6 (elektronisk udgave)
ISSN 0106-2840

Print: Pitney Bowes Management Services Danmark A/S, 2001

Indhold

1	Indledning	<i>1</i>
2	Metoder og resultater	<i>2</i>
2.1	Måleperiode	<i>2</i>
2.2	Ejendom	<i>2</i>
2.3	Vakuumelekstraktion og dampinjektion	<i>2</i>
2.4	Geologiske forhold	<i>2</i>
2.5	Spotmålinger af radon i poreluft m.v.	<i>2</i>
2.6	Kontinuerte radonmålinger	<i>7</i>
2.7	Differenstrykmålinger	<i>7</i>
2.8	Temperaturmålinger	<i>8</i>
2.9	Måling af ekstern gammastråling	<i>8</i>
2.10	Flowmåling	<i>9</i>
3	Diskussion	<i>9</i>
3.1	Drivkræfter for luftstrømning	<i>9</i>
3.2	Radon under huset	<i>11</i>
3.3	Radon i huset	<i>13</i>
3.4	Vakuumanlæggets influenszone	<i>17</i>
4	Konklusion	<i>21</i>
	Bidrag til projektet	<i>22</i>
A	Kontinuerte målinger	<i>22</i>
	Litteratur	<i>36</i>

1 Indledning

Radon er en naturligt forekommende radioaktiv luftart, som dannes af radium, der findes overalt i jorden. På grund af utætheder i fundament og gulvkonstruktion kan radon trænge ind i vore boliger. Tidligere undersøgelser af radon i Danmark har primært været motiveret af at radon er radioaktiv, og at høje koncentrationer af radon i indeklimaet således udgør et strålingsmæssigt problem. For Danmark vurderes det, at radon forårsager 300 lungekræfttilfælde om året [S87b], og at 65000 danske enfamiliehuse har radonkoncentrationer over den grænse på 200 Bq/m^3 , hvor bygningsmyndighederne anbefaler, at der foretages enkle og billige tiltag til reduktion af radonkoncentrationen [A01a].

I nærværende undersøgelse er formålet ikke strålingsbeskyttelse, men derimod at anvende radon som sporgas for jordluftindtrængning. I Danmark er poreluftkoncentrationen af radon normalt 1000 til 10000 gange højere end udeluftens koncentration, og selv en meget lille indtrængning af jordluft til et hus kan derfor have stor betydning for dets radonkoncentration. Normalt er bidraget fra byggematerialer (herunder afgang af radon fra beton) og indtrængning af radon pga. radon i udeluften meget ringe, og den primære årsag til forhøjede koncentrationer af radon i danske enfamiliehuse er således, at der trænger radon ind fra jorden umiddelbart under husene. En ny undersøgelse [A01a] baseret på helårsmåling af radonkoncentrationen i mere end 3000 danske enfamiliehuse viser, at der med stor sikkerhed forekommer radon fra jorden i 70% af alle danske enfamiliehuse. Indtrængning af jordluft til danske huse kan således anses for at være et relativt almindeligt fænomen.

Det primære formål med nærværende undersøgelse er:

Primært formål

- at foretage en simpel vurdering af jordluftindtrængningen til en ejendom i Odense på baggrund af målinger af radon i indeklime og poreluft.

Undersøgelsen af den pågældende ejendom er igangsat pga. mulige indeklimeproblemer fra klorerede opløsningsmidler i jorden hidrørende fra naboejendommen, som huser et igangværende renseri. Fyns Amt har i den forbindelse iværksat forskellige afværgetiltag [C00]. Disse tiltag udføres af COWI Rådgivende Ingeniører AS. Bl.a. foretages der vakuumventilation af jorden i området.

Undersøgelsen har desuden følgende sekundære formål:

Sekundært formål

- at tjene som et konkret eksempel på hvordan radonmålinger mere generelt kan finde anvendelse ved vurdering af indeklimeproblemer og afværgetiltag for huse på forurenede grunde.

Dette formål er motiveret af at dette er den første danske undersøgelse, hvor radon anvendes som sporgas for en sag med indeklimeproblemer fra jordforurening¹. Undersøgelsen bidrager således til en afklaring af om det er formålstjenligt at udvikle en generel metode til brug for jordforureningssager (f.eks. vurderinger af effektiviteten af afværgetiltag). Undersøgelsen er derfor gjort mere omfattende end det primære formål betinger.

Rapporten er inddelt i to hoveddele. Først beskrives den undersøgte ejendom, de anvendte instrumenter, og de opnåede (rå) måleresultater. Dernæst foretages en diskussion af resultaterne i relation til de relevante problemstillinger. Rapporten indeholder desuden en litteraturliste (primært med danske arbejder) og et appendiks med figurer, der viser det tidlige forløb af de målte variable.

¹Radon har dog været anvendt som sporgas for jordluftindtrængning i mange sammenhænge. Et af de første tilfælde er fra 1984 [Å84].

2 Metoder og resultater

2.1 Måleperiode

Der blev foretaget målinger i og omkring ejendommen i perioden 23. marts til 9. maj 2001.

2.2 Ejendom

Den undersøgte ejendom er beliggende Vesterbro i indre by i Odense, som vist i figur 1 og 2. Ejendommen har et beboelsesareal på omkring 70 m² fordelt på stue og første sal, som vist i figur 3, og der er omkring 2.3 m fra gulv til loft. Under det skråtstillede tag mod baggård findes et lukket loftsrum med delvist afmonterede rør til aftrækskanaler fra emhætte m.v. fra stueetagen. Huset har et delvis nyt terrændæk med 20 cm beton med et underliggende lag af 5 cm rockwool og 15 cm nøddesten. I baggården er der en svanehal, som giver luft til det kapillarbrydende lag. I det kapillarbrydende lag findes tre horisontale 97 mm PE-drænrør, som ender i en 125 cm-betonbrønd i husets baggård. Under målingerne var drænrørene tillukkede. Rørene kan evt. senere anvendes til aktiv eller passiv ventilation af det kapillarbrydende lag. Der er ovenlysvinduer på første sal. Udluftningsspalterne i disse vinduer blev lukket d. 4. april. Huset var ubeboet igennem hele måleperioden. I forbindelse med besøg i huset foretages der en vis udluftning. Eksempelvis kan det nævnes, at huset blev totalt gennemluftet ved måleperiodens start.

2.3 Vakuumeekstraktion og dampinjektion

COWI [C00] foretager vakuumventilering af den umættede zone via

- to horisontale strenge med i alt otte filtre og
- to vertikale filterrør.

De horisontale rør, som er indtegnet i figur 2, er placeret 4 m under terræn og har en samlet længde på 40–50 m. De to vertikale borer har filtre fra 2 til 5–6 m under terræn. Den samlede vakuumeekstraktion antager en værdi omkring 500 m³/h. Figur A.17(A) side 24 viser, at vakuumanlægget ikke var tændt i hele måleperioden. På enkelte dage i måleperioden blev der foretaget termisk behandling med damp. Drifttiderne er vist i figur A.17(B).

2.4 Geologiske forhold

Iht. COWI kan geologien beskrives som følger: Øverst findes 1–2 m fyld, og herunder er der ca. 8 m sand med indslag af silt. Derunder er der moræneler. Grundvandsspejlet står ca. 6.5 m under terræn (frit grundvandsspejl).

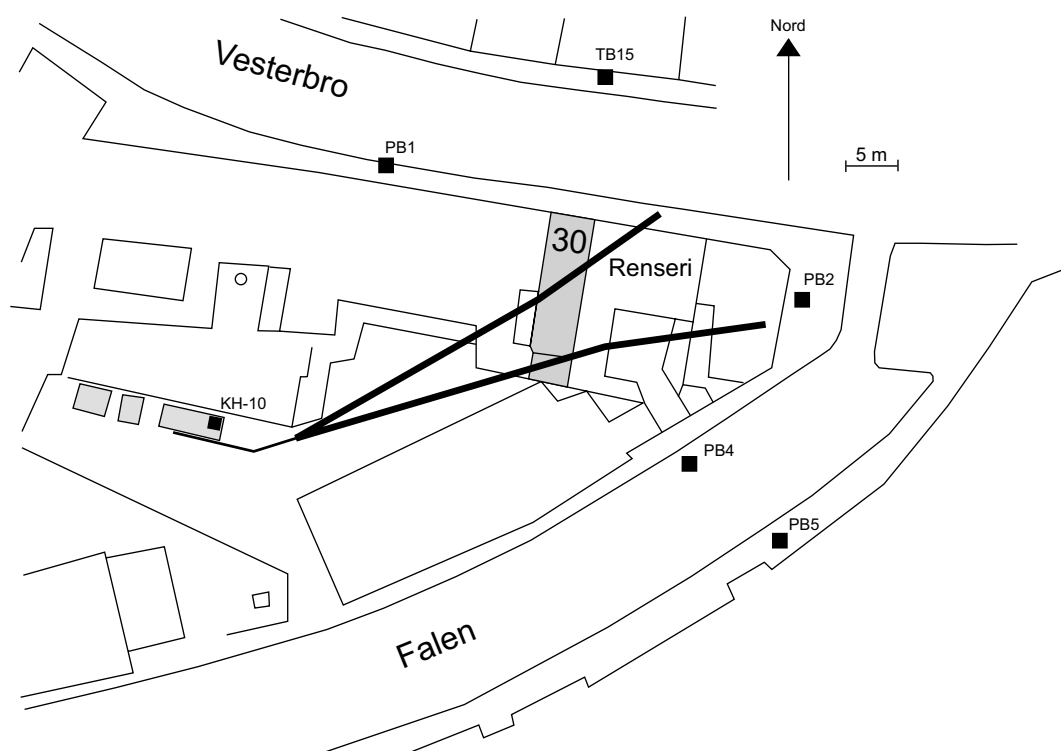
2.5 Spotmålinger af radon i poreluft m.v.

Som vist i figur 4 blev der foretaget spotmålinger af radon under og omkring ejendommen vha. den såkaldte scintillationscellemetode. Metoden kræver, at der tages en luftprøve på 150–200 mL i en beholder, som så senere kan analyseres i laboratoriet på Risø. For at sikre en repræsentativ måling pumpes nogle liter luft fra den givne boring igennem beholderen. Pumpningen foretages med en særlig håndpumpe. Metoden er beskrevet i Radon-95 rapporten [A97a].

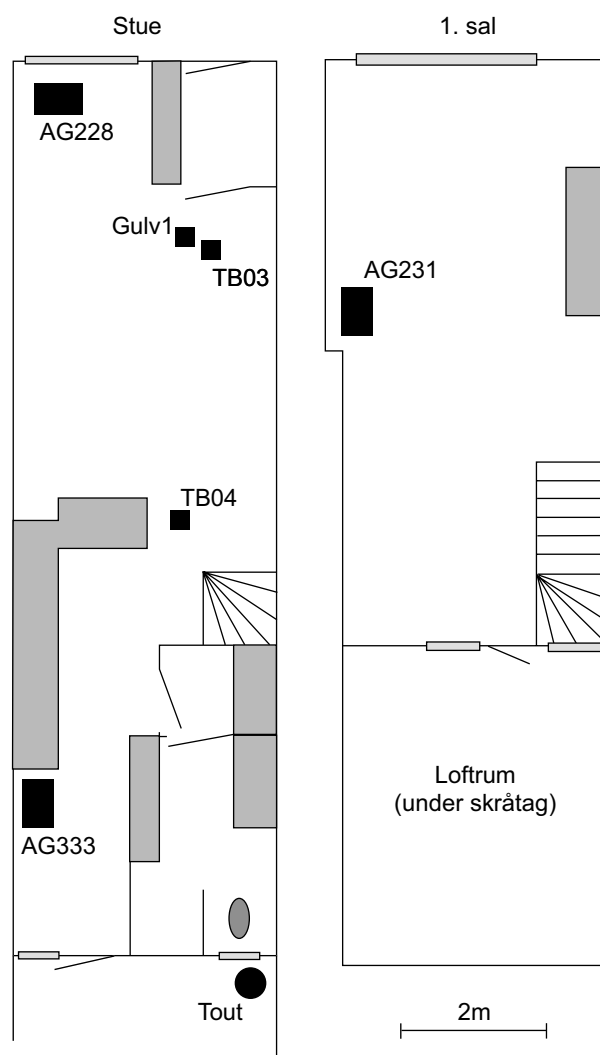
Der blev foretaget poreluftmålinger i borerne: PB1, PB2, PB4 og PB5. Disse borer har en dybde på 3 m under terræn og et filter fra 2.5 til 3 m. Der blev



Figur 1. Foto fra Vesterbro. Den undersøgte ejendom ligger umiddelbart til højre for renseriet. Ejendommen har ovenlysvinduer i taget.



Figur 2. Skitse af området omkring den undersøgte ejendom (gråtonet). De sortmalede firkanter (PB1, PB2 etc.) viser, hvor der er foretaget poreluftmålinger af radon. De horisontale rør til vakuumelektraktion danner et "v". Punktet KH-10 angiver stedet for radonmåling af den opsugede luft før filtret med aktivt kul.



Figur 3. Skitse over den undersøgte ejendom. De kontinuerte radonmonitører var placeret ved positionerne AG228, AG231, og AG333. Det blev foretaget radonmålinger i borerne Gulv1, TB03 og TB04. Gulv1 er blot et boret hul igennem betondækket. Den udendørs temperatursensor var placeret ved Tout i baggården.

desuden foretaget poreluftmålinger i borerne: TB03, TB04 og TB15. Disse borer, der ellers primært anvendes til temperaturmålinger, har en dybde på 6.5 m under terræn og et filter i dybden 2.5 til 3 m. Endelig er der foretaget spotmålinger af radon under terrændækket via et simpelt uforet hul i betonen (kaldet Gulv1, se figur 5), og før kulfiltret ved vakuumanlægget (KH10). Positionerne fremgår af figur 2 og 3. Når der ikke foretages prøvetagning fra TB03 og Gulv1, er disse tilkoblet trykmålerudstyret beskrevet i afsnit 2.7. Alle andre borer er proppet til, når der ikke foretages prøvetagning. Figur 5 viser TB04, der ligesom TB03 også er placeret inde i den undersøgte ejendom.

Spotmålingerne af radon er vist i figur 6 og 7. Forskellen mellem figurerne er, at der anvendes hhv. lineær og logaritmisk skala. Hvert panel svarer til et givet målested. Som angivet på graferne blev der foretaget spotmålinger 23. marts, 4. april, 17. april og 9. maj. Alle borer er dog ikke målt alle fire dage. Hvert punkt



Figur 4. Spotmåling af radon i boring placeret i fortov. Bemærk scintillationscellen af messing og håndpumpen.



(a) Gulv1

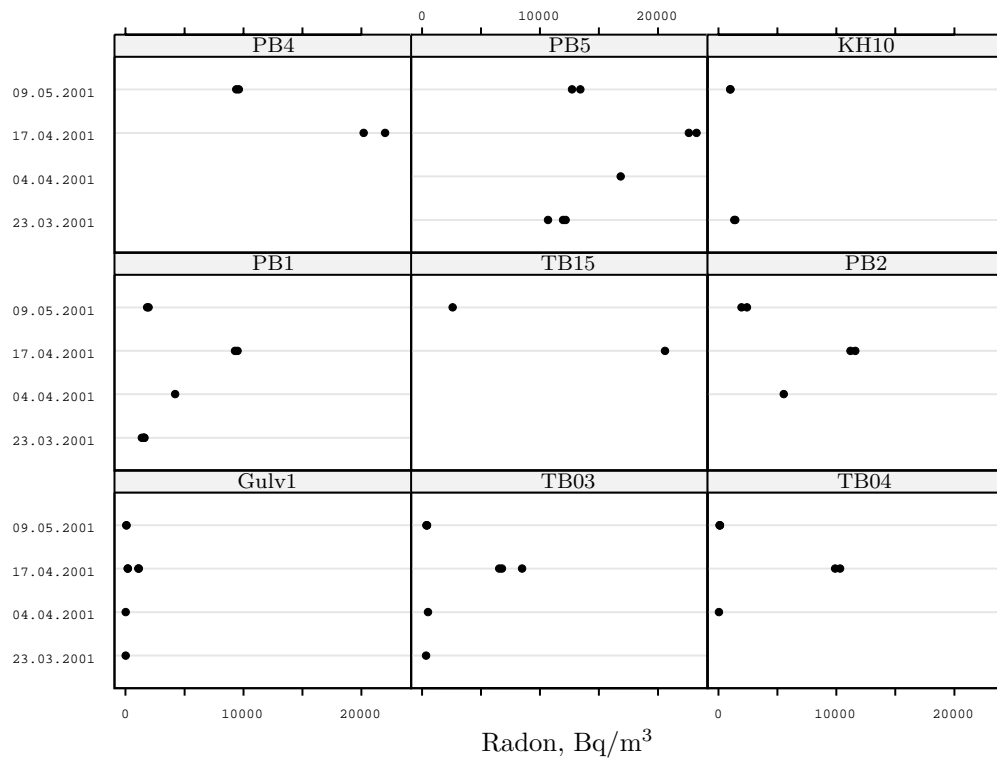


(b) TB04

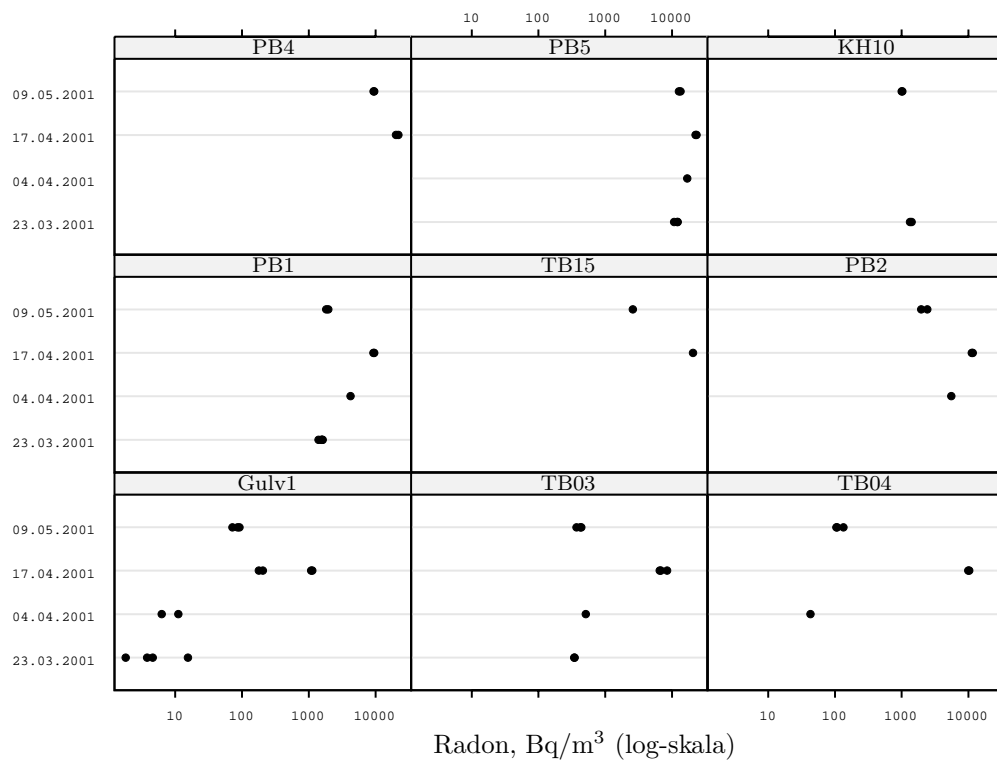
Figur 5. (a) Foto af hullet i terrændækket kaldet Gulv1 med isat prop og pvc-slange til trykmåler (se afsnit 2.7). (b) Foto af boring TB04 i tilproppet tilstand. Boringen er normalt skjult under en aluminiumsplade og et gulvtæppe.

i figur 6 og 7 svarer til en enkelt spotmåling. Eksempelvis ses det, at radonkoncentrationen i PB1 d. 17. april var omkring 10000 Bq/m^3 .

I flere tilfælde er det foretaget dobbelt prøvetagning, hvilket betyder, at der ud for samme dato forekommer to eller flere punkter. Usikkerheden ved spotmålingerne er ikke vist, men den antager typisk en værdi omkring 10 %. I et enkelt tilfælde er der signifikant større variabilitet mellem gentagende spotmålinger end forventet ud fra usikkerheden ved de enkelte målinger. Det drejer sig om målingerne i Gulv1 d. 17. april. Dette tilfælde diskuteres i afsnit 3.2.



Figur 6. Spotmålinger af radon i poreluft (lineær skala). Se forklaring side 4.



Figur 7. Spotmålinger af radon i poreluft (logaritmisk skala). Se forklaring side 4.

2.6 Kontinuerte radonmålinger

Der blev foretaget kontinuerte radonmålinger i indeklimaet i perioden 23. marts til 9. maj ved positionerne AG228 i stuen og AG231 på første sal (se figur 3). Desuden blev der i en kortere periode (fra 23. marts til 14. april) foretaget kontrolmålinger ved position AG333 i stuen. Målingerne er foretaget med AlphaGuard PQ2000 ionkamre fra Genitron, Tyskland. Disse monitorer registrerer udover radon også temperatur, relativ luftfugtighed, og atmosfærisk tryk (barometerstand). Monitorerne har indbyggede dataloggere, og gemmer data for hver hele time.



Figur 8. Foto af radonmonitor AG231 på 1. sal (se figur 3).

De kontinuerte målinger af radon (og andre variable) fremgår af figur A.16–A.22 for den samlede måleperiode. Desuden viser figur A.23–A.28 de tilsvarende resultater for den periode, hvor vakuumanlægget var slukket i mere end 6 dage. Hver figur har en datolinie med aksemærker ved kl. 00:00. Det fremgår af figurerne, at målingerne startede om eftermiddagen den 23. marts, og sluttede om formiddagen den 9. maj. De fleste grafer viser direkte de målte timeværdier, men i enkelte tilfælde er der foretaget en lavpasfiltrering således, at graferne viser løbende 12-timers gennemsnit. Der anvendes et gauss-filter med en vægtfaktor $w_j = v_j / \sum v_j$, hvor $v_j = \exp(-j^2/12)$, og hvor j antager værdierne $-6, -5 \dots 6$. Dette gælder eksempelvis for graf (c) og (d) i figur A.18. Desuden vises i enkelte tilfælde differensværdier. Det gælder eksempelvis for graf (e) i figur A.18, der viser forskellen mellem radon i stuen og på første sal.

Gauss-filter

2.7 Differenstrykmålinger

I hele måleperioden blev der foretaget kontinuerte målinger af to differenstryk:

- P1 angiver trykket i boring TB03 i forhold til husets indre. Dvs. at P1 er negativ når vakuumanlægget er tændt. Målingen foretages med en transducer af mærket FCO-44 fra Furness Controls Limited, England, som dækker området ± 2000 Pa.
- P2 angiver trykket i boringen Gulv1 i forhold til husets indre, og P2 er således direkte differenstrykket over betondækket. Målingen foretages med en FCO-44 transducer med området ± 50 Pa.

De anvendte transducere blev nulpunktsjusteret på Risø umiddelbart forud for målingerne, men der blev ikke foretaget nogen efterjustering eller kontrolmåling ved opsætning i ejendommen. Ved nedtagning af udstyret blev der dog foretaget kontrolmålinger, som viste, at transducerne viste hhv. -0.97 Pa (P1) og -0.22 Pa (P2) i en situation, hvor differenstrykket var eksakt nul. De differenstryk, som anvendes i rapporten, er ikke korrigeret for disse nulpunktsfejl. Det forventes dog

Nulpunktsfejl

ikke, at nulpunktsfejlene har nogen væsentlig betydning for undersøgelsens konklusioner.

I forbindelse med poreluftmålinger af radon fra TB03 og Gulv1 er det nødvendigt at fjerne pvc-slangen mellem boring og trykmåleudstyr (se figur 5). I sådanne (kortvarige) perioder er de målte differenstryk derfor ugyldige. Disse målinger er ikke fjernet fra de differenstryk, som anvendes i rapporten.

Transducerne aflæses af en pc'er via en A/D-konverter og et dataopsamlingsprogram. Aflæsningerne sker med en relativ høj frekvens, men programmet beregner og gemmer kun gennemsnitsværdier over 10 minutters perioder. I alle analyser anvendes dog kun timeværdier. De målte differenstryk fremgår af figur A.19 og A.25.

2.8 Temperaturmålinger

I hele måleperioden blev der foretaget kontinuerte målinger af udetemperaturen i højden 1.7 m med et Pt-100 element placeret i en standard strålingsskærm, som vist i figur 9. Målingerne blev foretaget i ejendommens baggård, som markeret i figur 3. Data blev opsamlet elektronisk med en batteridreven datalogger med en samplingsfrekvens på en måling pr. 10 minutter. I alle analyser anvendes dog kun timeværdier. Den målte udetemperatur fremgår af figur A.21(c) og A.27(c).



Figur 9. Måling af udendørs temperatur i ejendommens baggård. Bemærk svane-halsen, der er koblet til det kapillarbrydende lag under terrændækket.

2.9 Måling af ekstern gammastråling

Der blev foretaget måling af gammastrålingsniveauet forskellige steder i og udenfor ejendommen med et GR-130 miniSpec NaI-spektrometer fra Exploranium, Canada. Det bemærkes, at sådanne målinger bl.a. kan belyse om der findes særlige byggematerialer i ejendommen med en høj radonafgasningsrate. Dosishastigheden

i ejendommen blev målt til 80 nGy/h. Dosishastigheden umiddelbart oven på kul-filtret (KH-10), hvor jordluften filtreres, var den 23. marts omkring tre gange så høj.

2.10 Flowmåling

Den 23. marts blev der foretaget måling af luftstrømningen igennem betondækket (boring Gulv1) med et laminart flowelement (0–200 mL/min, FCO-96B-200cc, Furness Controls, England) og en særlig følsom differenstrykmåler (FCO-510, Furness Controls). En tilsvarende måling blev foretaget ved probe TB03. Denne måling blev dog gennemført med et 2-30 L/min sæbebobleflowmeter (Gilian Instrument Corp., USA). Måleresultaterne gives på side 11.

3 Diskussion

Diskussionen er inddelt i en række underafsnit, som omhandler forskellige aspekter af problemstillingen.

3.1 Drivkræfter for luftstrømning

Indtrængning af jordluft til huse og strømning af luft i jord skyldes trykforskelle, der dannes som følge af forskellige drivkræfter såsom temperaturforskelle, ændringer i det atmosfæriske tryk, vind, drift af mekaniske ventilationsanlæg m.v. I nærværende undersøgelse blev der direkte foretaget differenstrykmålinger mellem hus og jordprobe TB03 (P1) samt over terrændækket ved punktet Gulv1 (P2). I det følgende sættes disse tryk i relation til driften af vakuumanlægget samt målte temperaturforskelle.

Drift af vakuumanlæg

I måleperioden blev vakuumanlægget tændt og slukket flere gange. Dette fremgår af figur A.16(a), som viser COWI's rapporterede drifttider, og figur A.16(b), som viser differenstrykket P1. I hovedparten af perioden fra 23. marts frem til 2. april var anlægget i drift, og P1 var omkring -1200 Pa, hvorimod P1 var omkring 0 Pa ved slukket anlæg. Figurerne viser, at anlægget var ude af drift i tre perioder af en varighed på omkring 2 dage, samt en længerevarende periode af omkring 6 dages varighed. Fra 18. april og frem til måleperiodens afslutning 9. maj kørte anlægget stort set konstant. Ved hjælp af P1-målingerne er tænd- og sluk-tidspunkterne registreret som anført i tabel 1.

Måling af tryk over betondæk (P2)

Figur A.16(c) viser, at også trykdifferensen over betondækket (P2) er under stærk påvirkning af driften af vakuumanlægget. Under drift er P2 omkring -6 Pa, og ved slukket anlæg svinger P2 omkring 0 Pa. Dette fremgår muligvis mere tydeligt af figur A.23(b), der kun omfatter 6-dages perioden med slukket anlæg. Det ses, at trykket varierer mellem -0.9 og 0.4 Pa, og at der er en klar tendens til at trykket er positivt. Medianværdien for P2 er 0.12 Pa², og en nærmere analyse viser, at P2 er positiv i omkring 75 % af tiden i 6-dages perioden. Dette er i overensstemmelse

²Det bemærkes, at dersom man korrigerer for den nulpunktsfejl, som blev registreret ved måleperiodens afslutning (se side 7), da stiger P2 til 0.24 Pa.

Tabel 1. Drift af vakuumanlæg iht. aflæsning af P1. Alle klokkeslæt er dansk vintertid.

Dato	Tidspunkt	Note
2. april	13:40	Anlæg slukkes
4. april	08:20	Anlæg tændes
4. april	16:00	Anlæg slukkes
6. april	08:10	Anlæg tændes
7. april	10:50	Anlæg slukkes
9. april	09:00	Anlæg tændes
11. april	14:20	Anlæg slukkes
18. april	07:40	Anlæg tændes
26. april	02:20	Anlæg slukkes (strømafbrydelse)
26. april	08:00	Anlæg tændes

med den opfattelse, at der normalt er et vist undertryk i danske huse i forhold til udeluften, da der normalt er varmest inde i husene (den såkaldte skorstenseffekt).

Det bemærkes, at P2 angiver trykdifferencen over betondækket, hvilket i det konkrete hus må formodes direkte at svare til den samlede trykforskel mellem hus og udeluft, idet det kapillarbrydende lag er koblet til udeluften via en svanehals (se figur 10). Den målte trykforskel er både et resultat af hvor utæt dækket er (jo flere revner, jo mindre bliver trykforskellen) og de konkrete drivkræfter.

Meteorologiske forhold

Normalt anses temperaturforskelle som den vigtigste drivkraft for indendørs-udendørs trykforskelle, og det er på den baggrund nærliggende at undersøge om det samme gælder for den undersøgte ejendom. For målinger i perioder med slukket vakuumanlæg er der derfor foretaget en lineær regressionsanalyse mellem P2 og følgende variable:

- temperaturforskellen mellem stue og udeluft, $T(\text{stue}) - T(\text{ude})$
- temperaturforskellen mellem 1. sal og udeluft, $T(1. \text{ sal}) - T(\text{ude})$
- temperaturforskellen mellem 1. sal og stue, $T(1. \text{ sal}) - T(\text{stue})$
- det absolutte atmosfæretryk (i hPa)
- ændringshastigheden af det absolutte atmosfæretryk (i hPa/h)

Solindstråling Det bemærkes, at temperaturen på 1. sal udviser større døgnvariation end temperaturen i stuen (se figur A.21), hvilket formodes at skyldes solindstråling via de skråstillede tagvinduer på 1. sal.

Analysen viser, at variationerne i P2 ikke på overbevisende vis kan sættes i forbindelse med de anførte variable. Det skal dog nævnes, at den bedste prædiktor for P2 faktisk er temperaturforskellen mellem udeluften og stuen. P2 stiger i gennemsnit med omkring 0.03 Pa per °C (jo koldere det er udenfor, jo større undertryk kommer der i huset). Regressionsmodellen forklarer imidlertid kun omkring 11 % af P2's variabilitet (R^2), og den forklarede variabilitet stiger ikke væsentligt, hvis modellen udvides med de andre variable (f.eks. ændringshastigheden af atmosfæretrykket). Det formodes, at vindpåvirkninger (evt. via svanehalsen til det kapillarbrydende lag, se figur 10) er årsag til en væsentlig del af den ikke-forklarede del af P2-variationerne. Til sammenligning kan det nævnes, at der i andre studier er fundet en betydeligt bedre sammenhæng mellem indendørs-udendørs trykforskel og indendørs-udendørs temperaturforskelle. Eksempelvis blev der i en undersøgelse

af radonindtrængning til et beboet hollandsk krybekælderhus foretaget en regressionsanalyse mellem tryk- og temperaturforskelle, som havde en R^2 -værdi omkring 90 %, og indendørs-udendørs trykforskellen steg omkring 0.1 Pa per °C [A96]. I den undersøgelse kunne vindens indflydelse dog også observeres.

Flowmålinger

Når vakuumanlægget er tændt, vil der foregå en lille strømning af luft fra boligen via eventuelle revner i betondækket mod det kapillarbrydende lag. Denne strømning styres af differenstrykket over terrændækket. Undersøgelsen viser, at når vakuumanlægget er tændt, er P2 omkring -6 Pa svarende til, at der er undertryk i det kapillarbrydende lag i forhold til boligen. Imidlertid er det uvist, hvor stor en luftstrøm trykdifferensen kan tilvejebringe, da enhver strømning netop vil søge at udligne trykforskellen. Den 23. marts blev der derfor lavet en konkret flowmåling, som belyser dette. Ved at tilkoble et særligt flowmålingsudstyr uden væsentlig gennemstrømningsmodstand til Gulv1 blev der målt en strømning på 0.012 L/min med retning fra bolig mod det kapillarbrydende lag. Det formodet på den baggrund, at der er et tilsvarende flow igennem eksisterende revner og sprækker i betondækket. Det bemærkes, at der faktisk forekommer synlige revner i betondækket, men det er uvist om revnerne er overfladiske eller gennemgående.

Endelig kan det nævnes, at en tilsvarende måling på probe TB03 med et sæbebobleflowmeter viste, at trykket på omkring -1200 Pa kunne tilvejebringe et flow på 11.7 L/min i vid åben tilstand. Dvs. at der med tændt vakuumanlæg vil strømme rumluft ned i boringen med en hastighed på omkring 12 L/min så snart poppen fjernes. Dette giver naturligvis mulighed for fejlmålinger af poreluftniveauet af radon m.v. En tilsvarende fejlmulighed foreligger ikke for Gulv1, hvor strømningen, som nævnt ovenfor, er meget ringe, eller de øvrige borer, hvor der ikke synes at forekomme tilsvarende høje strømninger.

Risiko for fejlmåling

3.2 Radon under huset

Anvendelsen af radon som sporgas for jordluftindtrængning til huset beror på, at der faktisk produceres radon i jorden under huset. Jo højere radonkoncentrationen er i jordens poreluft, jo lettere er det at spore en eventuel jordluftindtrængning til huset.

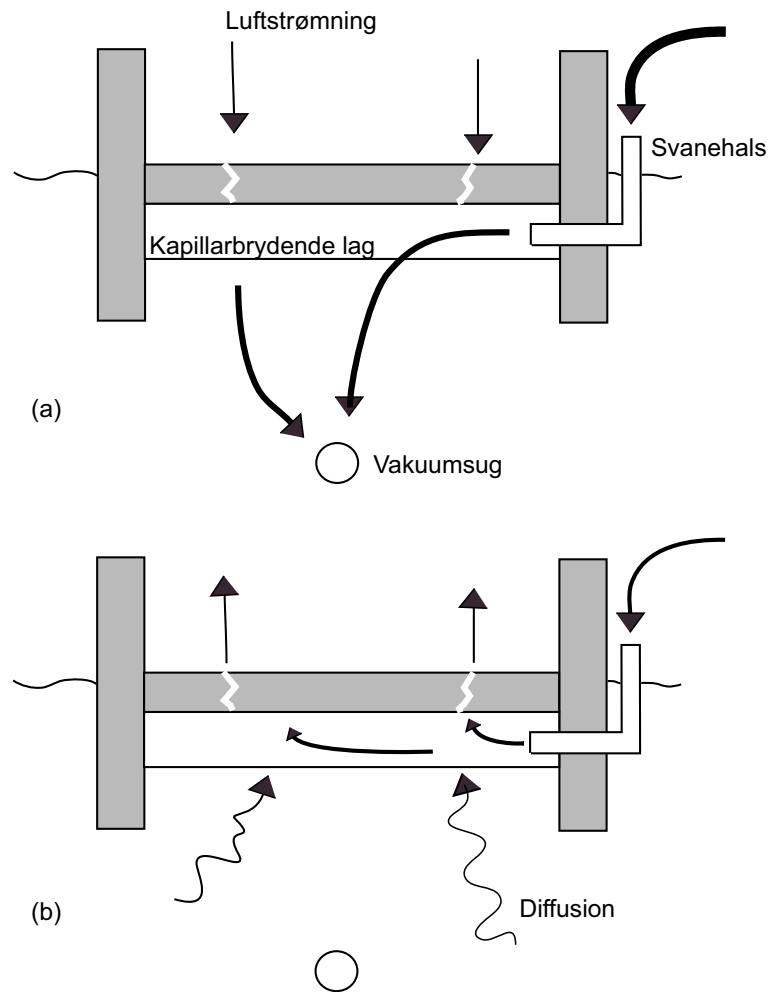
Radon i jorden under huset

Det ses af figur 6, at de to borer TB03 og TB04 under huset har meget lave radonværdier (under 500 Bq/m³), når vakuumanlægget er tændt. Målingen under terrændækket (dvs. Gulv1) er endnu lavere. Den 23. marts var koncentrationen helt nede omkring 10 Bq/m³, dvs. udeluftniveau. Disse lave koncentrationer formodes at skyldes, at det kapillarbrydende lag under ejendommen let kan tilføres radonfattig udeluft via den tilkoblede svanehals og eventuelle revner i terrændækket. Når anlægget er i drift, formodes det således, at der går en luftstrøm fra atmosfæren, via svanehals³ og revner i dækket, igennem det kapillarbrydende lag mod vakuumsuget. Dette er vist skematisk i figur 10(a).

Efter at vakuumanlægget havde været slukket i omkring 6 dage blev der foretaget spotmålinger af radon den 17. april. Det ses af figur 6, at radonkoncentrationen 2.5–3 m under terrændækket (TB03 og TB04) er steget til 7000 – 10000 Bq/m³. Tilsvarende er koncentrationen umiddelbart under terrændækket også vokset, men i dette tilfælde observeres følgende problem: Dobbeltmålinger i boringen Gulv1 d.

Dobbeltmålinger

³Det foreslås, at der foretages en måling af luftstrømmen i svanehalsen.



Figur 10. Sempel skematisk model for luftstrømning og radontransport omkring huset med vakuumanlægget tændt (a) og slukket (b). Det formodes, at svanehalsen spiller en vigtig rolle for lufttilførslen til det kapillarbrydende lag.

17. april kl. 13:20 viste, at koncentrationen var 1100 Bq/m^3 , men ved fornyet dobbeltmåling samme dag kl. 14:15 var koncentrationen faldet til 200 Bq/m^3 . Forskellen mellem de to målinger kan have en række forklaringer, herunder kan det ikke afvises, at selve prøvetagningen har påvirket koncentrationen i det kapillarbrydende lag. I denne sammenhæng er der dog ikke basis for anden konklusion, end at målingerne tyder på, at radonkoncentrationen i det kapillarbrydende lag er mere variabel end f.eks. radonkoncentrationen i jorden under ejendommen.

Der blev også foretaget spotmålinger om eftermiddagen d. 4. april. Disse målinger foregik med tændt anlæg, men kort forinden havde anlægget været slukket i næsten 2 dage. Disse målinger må tolkes under hensyntagen til systemets tidlige respons (se side 20).

På baggrund af ovenstående observationer kan følgende skematiske model opstilles: Når vakuumanlægget slukkes, vil der kunne trænge "jordluft" ind i boligen via eventuelle revner i dækket, såfremt der er undertryk i ejendommen (dvs. når P2 er positiv), eller det atmosfæriske tryk er faldende. Det formodes, at en del af luftstrømmen faktisk kommer fra jorden under huset, og at en anden del i det væsentlige er "udeluft", som tilføres det kapillarbrydende lag via den tilkoblede svanehals. Pga. diffusion fra de dybereliggende radonholdige jordlag kan den sidstnævnte luftstrøm have en radonkoncentration, som er højere end udeluftens. Den

skematiske model er vist i figur 10(b).

3.3 Radon i huset

I det følgende diskuteres de kontinuerte radonmålinger i ejendommen.

Kontrolmåling af radon

I perioden fra 23. marts til 14. april blev der målt radon i ejendommens stue med monitører (se AG333 og AG228 i figur 3). Målingerne ved AG333 er ikke vist eksplicit i denne rapport. Her skal blot nævnes, at der er god overensstemmelse mellem de to sæt målinger ($R^2=93$ % for 12-timers middelværdier) og desuden er middelværdien for målingerne de to steder identisk (11.9 Bq/m³ for AG333 og 11.2 Bq/m³ for AG228). Denne kontrol bekræfter, at målingerne er af god kvalitet.

Fordeling af radon i huset

Figur A.18(e) viser, at radonkoncentrationen i stue og på 1. sal stort set følges ad. I gennemsnit er der ingen forskel mellem radonkoncentrationene de to steder. Dette er et tegn på, at huset kan opfattes som en sammenhængende ventilationszone, hvilket stemmer med at stue og 1. sal er forbundne via en trappe uden aflukningsmuligheder.

Tidslig variation af radon i huset

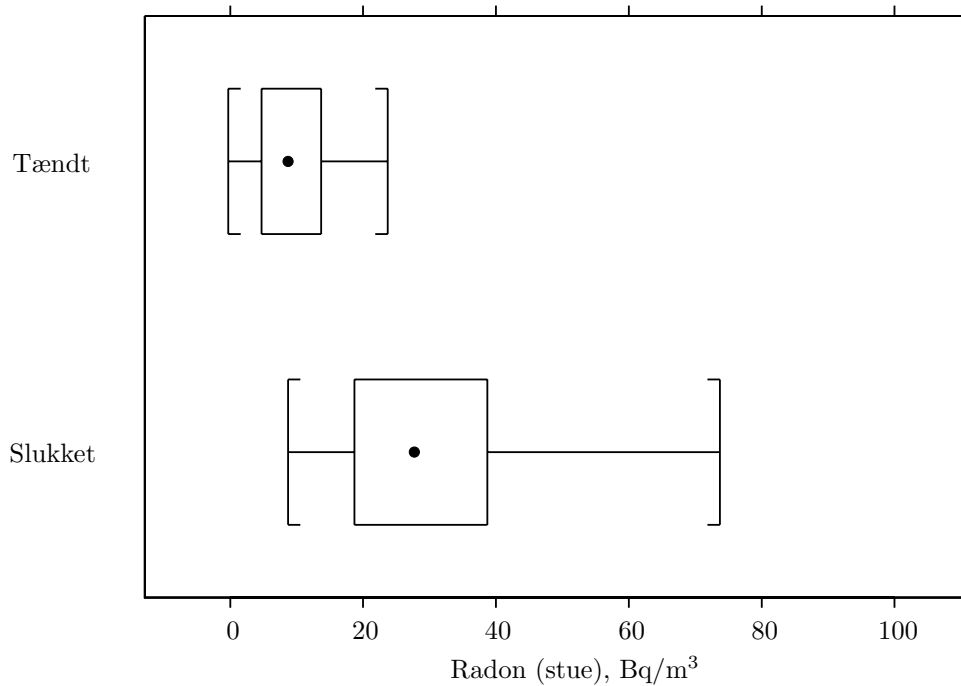
Husets radonkoncentration påvirkes væsentligt af vakuumentileringen i jorden. Dette fremgår af figur 11, hvor alle timeværdier for radon i stuen er opdelt i to grupper svarende til tændt eller slukket vakuumanlæg. Når anlægget er slukket, er radonkoncentrationen højere og mere variabel end når, det er tændt. I gennemsnit er radonkoncentrationen 10 Bq/m³ med tændt vakuumanlæg og 30 Bq/m³ med slukket anlæg. Sammenhængen mellem drift af vakuumanlægget og radon i indeklimaet er så markant, at man umiddelbart ud fra radonmålingerne i figur A.16 kan identificere de 4 perioder, hvor anlægget var lukket ned i 24 timer eller mere. Sammenhængen beror derfor næppe på en tilfældighed. Det bemærkes, at opdelingen i figur 11 mellem tændt og slukket anlæg ikke tager hensyn til, at den radonmæssige overgang mellem tilstandene ikke kan ske momentant: Opbygningen af radon i jorden vil strække sig over adskillige dage efter, at vakuumanlægget er slukket, og når anlægget tændes igen, vil det også tage en vis tid at "tømme" gasreservoir for radon. Det må på den baggrund forventes, at der vil være en mere udpræget forskel mellem tændt og slukket anlæg, dersom man lægger længerevarende tidsserier til grund for en sådan analyse. De tidsmæssige forhold belyses med modelberegninger i afsnit 3.4.

Overgangstider

I tråd med den skematiske model i figur 10 formodes det, at naturlige drivkræfter (indendørs-undendørs trykforskelle og fald i det atmosfæriske tryk) kan trække radon fra jorden ind i huset så snart vakuumanlægget slukkes. Dette forklarer både hvorfor den indendørs radonkoncentration stiger (nemlig pga. øget indtrængning fra jorden) og hvorfor stigningen foregår langsomt (over nogle dage; jf. figur A.24), thi som nævnt ovenfor sker opbygningen af radon i jorden til det naturlige niveau ikke momentant, så snart vakuumanlægget slukkes.

Den skematiske model forudsiger, at radonkoncentrationen stiger og falder i takt med ændringerne i de naturlige drivkræfter, og det er derfor af interesse, at undersøge om variationen af radon i indeklimaet følger de målte trykforhold. For at belyse problemet nærmere er en række statistiske modeller tilpasset målingerne. I den simpleste model sættes ændringshastigheden af radon i ejendommen til at

Regressionsmodel



Figur 11. Fordeling af målte radonkoncentrationer i stuen opdelt efter om vakuumanlægget var tændt eller slukket (boxplot). Der indgår 830 timeværdier i gruppen "tændt" og 293 i gruppen "slukket". For hver af de to grupper er der markeringer ved 5, 25, 50, 75, og 95%-fraktilerne. Paraplyintervallet går fra 5% til 95%-fraktilen, og dette interval omfatter således 90% af de målte værdier i den pågældende gruppe. Boksen afgrænser 25% og 75%-fraktilen, og 50% af målingerne ligger således inden for boksen. Gruppernes medianværdier er angivet med en sort prik.

være proportional med trykket over betondækket og ændringshastigheden af det atmosfæriske tryk:

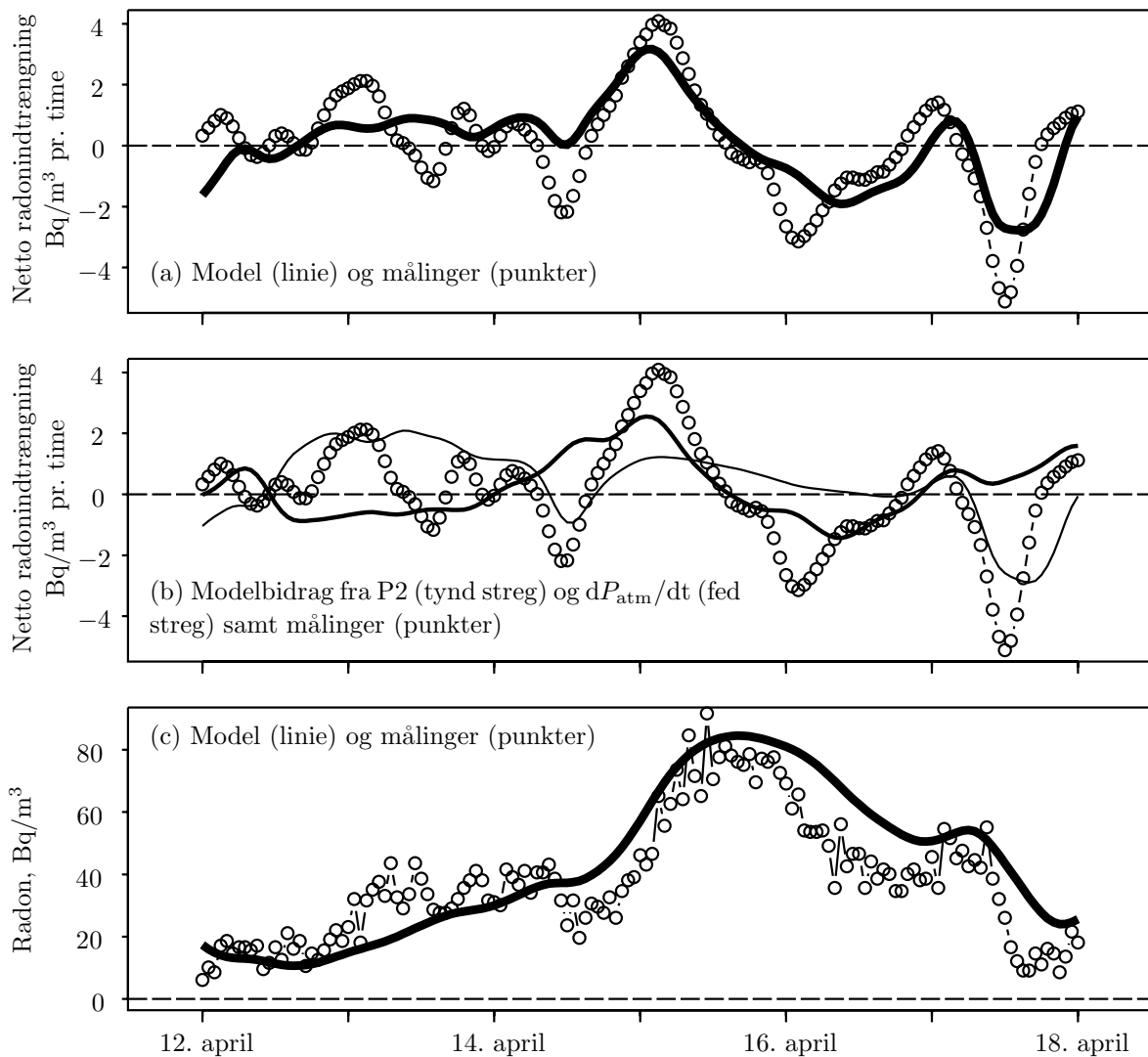
$$\Delta c(i) = \beta_0 + \beta_1 P_2(i) + \beta_2 \Delta P_{\text{atm}}(i) \quad (1)$$

hvor i er tiden målt i timer, $\Delta c(i)$ er netto-stigningen i den indendørs radonkoncentration fra kl. $i - 1$ til i , $P_2(i)$ er trykdifferensen over terrændækket kl. i , $\Delta P_{\text{atm}}(i)$ er stigningen i det atmosfæriske tryk fra kl. $i - 1$ til i , og hvor β_0 , β_1 , og β_2 er regressionskoefficienter. Det bemærkes, at modellen ikke eksplicit tager hensyn til ændringer i luftskiftet, og Δc svarer således til den egentlige indtrængning af radon minus den radon, som fjernes med ventilationen.

Koefficienter

Det fremgår af figur 12(a), at modellen kun i et vist omfang kan tilpasses målingerne. Regressionsmodellen har en R^2 -værdi på 60 % (dvs. at modellen forklarer 60 % af variabiliteten). Koefficienterne er $\beta_0 = -0.6 \pm 0.1 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, $\beta_1 = 5.6 \pm 0.4 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1} \text{ pr. Pa}$ og $\beta_2 = -1.9 \pm 0.2 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1} \text{ pr. hPa}$. Det ses af koefficienternes fortegn, at radonkoncentrationen stiger, når P_2 er positiv (dvs. når der er undertryk i huset i forhold til udeluften), og når det atmosfæriske tryk falder. Omvendt falder radonkoncentrationen, når P_2 er negativ, eller det atmosfæriske tryk stiger. Disse forhold er altså som ventet for advektiv indtrængning af radon [A93, A01b, A01c], og den skematiske model i figur 10(b) kan ikke på det grundlag afvises, som værende en god beskrivelse.

I figur 12(b) er modelestimerne opløst i to dele hidrørende fra hhv. P_2 og faldet i det atmosfæriske tryk. Det ses bl.a., at indtrængningen i perioden fra middag d. 12. april til middag d. 14. april i det væsentlige skyldes, at der er undertryk i ejendommen ($P_2 > 0$). Derimod dominerer faldet i det atmosfæriske



Figur 12. Tilpasning af lineær regressionsmodel til netto indtrængningen af radon til boligen (dvs. den egentlige indtrængning fra alle kilder minus den del, der fjernes pga. ventilation). De viste målinger er midlet over 12 timer.

tryk som indtrængningsmekanisme omkring d. 15. april. Det ses, af figur A.26(c), at trykfaldet er på omkring 100 Pa pr. time ved natten mellem d. 14. og 15. april. Samtidig tyder P1-målingerne på, at der til samme tidspunkt opbygges en vis trykdifferens mellem huset og boringen TB03 (se figur A.25(a)).

I figur 12(c) er modellen integreret således, at der opnås et estimat for ejendommens radonkoncentration.

En række mere komplicerede alternative modeller er også tilpasset målingerne, men ingen af de afprøvede modeller kan forklare alle aspekter af data. Et af problemerne er givetvis, at systemet ikke er i ligevægt, idet der sker en opbygning af radon i jorden i tiden fra det øjeblik, vakuumanlægget slukkes.

Kilder til radon i huset

I Danmark er udeluftens koncentration af radon (årgennemsnit) omkring $8 Bq/m^3$ [M86] og afgangning fra sædvanlige byggematerialer formodes i gennemsnit at bidrage med omkring $5-20 Bq/m^3$ [A99a] svarende til det radonniveau, man finder i danske flerfamiliehuse [A01a]. Vha. disse kilder kan man således umid-

delbart redegøre for radonniveauet på omkring 10 Bq/m^3 , når vakuumanlægget er tændt. Det bemærkes, at ejendommen ser ud til at være opført af sædvanlige danske byggematerialer (teglsten og beton), hvilket bekræftes af målinger af eksternt gammastråling (jf. afsnit 2.9): Niveauet i ejendommen svarer helt til det man sædvanligvis finder i danske huse [S87a, s. 69].

Ukendt luftskifte

Det er mere problematisk at forklare de højere radonkoncentrationer i ejendommen, som forekommer, når anlægget er slukket, vha. radonbidrag fra byggematerialer og udeluft. Dette gælder eksempelvis for episoden den 15. april, hvor radonkoncentrationen konstant er omkring 70 Bq/m^3 over en periode på 15 timer. Det formodes, at en sådan signifikant forhøjet radonkoncentration i ejendommen skyldes indtrængning af radon fra jorden. Årsagen til at dette må forblive ved en formodning er, at der ikke indgår luftskiftemålinger i undersøgelsen. For konstant kildestyrke (såsom afgasning fra byggematerialerne) er der omvendt proportionalitet mellem husets radonkoncentration (efter korrektion for udeluftens radonniveau) og luftskifte [A97b]. Den observerede stigning i husets gennemsnitlige radonkoncentration fra 10 til 30 Bq/m^3 kunne således tilvejebringes, dersom husets luftskifte halveres (eller mere), som følge af at vakuumanlægget slukkes. I det følgende ses der bort fra denne mulighed.

Det er muligt at opstille et simpelt budget for kilderne til radon i huset, når vakuumanlægget er slukket. Det antages, at 10 Bq/m^3 skyldes udeluft og byggematerialer (svarende til gennemsnitsniveauet med tændt anlæg), og at $30 - 10 = 20 \text{ Bq/m}^3$ således skyldes radon fra jorden. Hvis husets luftskifte er omkring 0.3 h^{-1} fås ved ligevægtsforhold, at huset, der har et samlet luftvolumen på omkring $70 \cdot 2.3 \text{ m}^3$, skal tilføres:

$$J = 20 \text{ Bq/m}^3 \cdot 70 \text{ m}^2 \cdot 2.3 \text{ m} \cdot 0.3 \text{ h}^{-1} \approx 1000 \text{ Bq/h} \quad (2)$$

Sammenligning med modelberegninger

fra jorden. Hvis der kan ses bort fra diffusiv indtrængning igennem terrændækket, og hvis den indtrængende jordluft har en radonkoncentration omkring 1000 Bq/m^3 (svarende til maksimalværdien for Gulv1 d. 17. april), ses det, at huset i gennemsnit tilføres en "jordluftstrøm" på omkring $1 \text{ m}^3/\text{h}$, når vakuumanlægget er slukket. Det skal understreges, at denne vurdering er behæftet med stor usikkerhed. Ved sammenligning med modelberegninger [A01c], ses det, at en så stor luftindtrængning er i overkanten af hvad man umiddelbart kan redegøre for teoretisk. Eksempelvis, kan et trykfald på 1.6 hPa h^{-1} kun afstedkomme en indtrængningsrate på omkring $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ til et 100 m^2 hus på homogen jord med 10 m til grundvandsspejlet [A01c, Figur 4]. Tilsvarende forventes det, at en 1 Pa indendørs-udendørs trykdifferens kan bidrage med $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ til samme hus, dersom jorden har en gaspermeabilitet på 10^{-10} m^2 (hvilket er en relativ høj værdi). Samtidig viser beregningerne, at den diffusive indtrængning til modelhuset er ganske høj (nemlig omkring 3600 Bq/h [A01c, Figur 3]), hvilket viser, at diffusion ikke i alle tilfælde kan negligeres. En væsentlig del af den beregnede indtrængning i ligning 2 kunne således skyldes diffusion. Disse forhold tyder på at huset i gennemsnit tilføres en "jordluftstrøm" på mindre end $1 \text{ m}^3/\text{h}$, når vakuumanlægget er slukket. Vurderingen kan forbedres ved:

- at foretage luftskiftemålinger i huset enten vha. integrerende målinger med den såkaldte PFT-teknik [B92, A97b] eller vha. kontinuerte målinger med aktiv sporgasteknik.
- at foretage en mere detaljeret kortlægning af radonkoncentrationen under terrændækket eksempelvis ved at foretage målinger flere steder eller ved at foretage en kontinuert monitoring svarende til den, der blev foretaget i ejendommens indeklime.
- at foretage en længerevarende monitoring af husets radonkoncentration, så der opnås et mere sikkert estimat af husets gennemsnitlige radonkoncentration.

- at foretage direkte målinger af udeluftens radonkoncentration og afgasningsraten af radon fra de anvendte byggematerialer.
- at foretage en nærmere undersøgelse af diffusiviteten for den anvendte beton.

3.4 Vakuumanlæggets influenszone

Det er af en vis interesse at have kendskab til den jordmængde, som vakuumanlægget ventilerer. Dette afsnit beskriver, hvordan radonmålinger kan anvendes til det formål.

Observationer baseret på spotmålinger af radon i jorden

Poreluftmålingerne i figur 6 viser, at radonkoncentrationen i jorden omkring huset påvirkes af vakuumanlægget. Ved målingerne 23. marts og igen 9. maj var anlægget i drift, og alle poreluftmålinger er her ved deres minimum. Eksempelvis er koncentrationen i PB5 omkring 12000 Bq/m^3 , hvilket er væsentligt lavere end de 22000 Bq/m^3 , der blev målt d. 17. april, hvor anlægget havde været slukket i 6 dage. Tilsvarende forhold gælder for de andre borer. Observationerne stemmer med, at der under naturlige forhold er en høj koncentration af radon i poreluften (over 10000 Bq/m^3), og at det tændte anlæg trækker radonfattig luft ned i jorden. Vakuumelekstraktionen giver således anledning til en (radonmæssig) ventilation af jorden under og omkring ejendommen. Det skal understreges, at selve produktionen af radon kan antages at være upåvirket af jordventilationen⁴. Det ses af figur 6, at jorden ventileres i alle de målte positioner. I henhold til figur 2 er borerne beliggende indenfor et areal større end 700 m^2 , og med en filterdybde på 2.5–3 m er det klart, at mere end 2000 m^3 jord er påvirket af vakuumelekstraktionen.

Observationer baseret på spotmålinger af radon før kulfilter

Man kan få et direkte overslag over den samlede mængde af jord, som ventileres af vakuumanlægget, på følgende måde: Både den 23. marts og 9. maj blev der foretaget måling af radonkoncentrationen i den luft, der suges op via vakuumanlægget. Målingerne blev foretaget før filtret med aktiv kul. Resultaterne (se KH-10 i figur 7) var 1300 Bq/m^3 den 23. marts og 1000 Bq/m^3 den 9. maj. Anlægget suger omkring $500 \text{ m}^3/\text{h}$ så radonstrømmen J er omkring:

$$J = \frac{1300 + 1000}{2} \text{ Bq/m}^3 \cdot 500 \text{ m}^3/\text{h} = 160 \text{ Bq/s} \quad (3)$$

For at tilvejebringe en så stor strøm af radon kræves en vis mængde jord. For dansk jord er en typisk radonemanationsrate omkring 5 atomer $\text{kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (dvs. at der pr. sekund afgasser 5 radonatomer fra et kg jord [D85]). Udtrykt som en aktivitet svarer dette til en produktionsrate på $1.05 \cdot 10^{-5} \text{ Bq/s}$ pr. kg jord. Ovennævnte strøm af radon svarer altså til radonemanationen fra:

$$\frac{160 \text{ Bq/s}}{1.05 \cdot 10^{-5} \text{ Bq s}^{-1} \text{ kg}^{-1}} = 1.5 \cdot 10^7 \text{ kg jord} \quad (4)$$

⁴Der skal erindres om, at radon dannes pga. radium i jorden, og at emanationsraten (dvs. den hastighed hvormed radon tilføres poreluften) kan anses for upåvirket af eksterne forhold som f.eks. luftstrømninger og temperaturændringer. Dog kan emanationsraten påvirkes af fugtindholdet, hvis jorden er meget tør. Det bemærkes, at emanationsraten naturligvis afhænger af jordens beskaffenhed (herunder naturligvis jordens radiumindhold), så emanationsraten varierer normalt fra sted til sted (se eksempelvis, profilerne i [A99b]). Under naturlige forhold kan der ses bort fra transport (primært diffusion) nogle meter under overfladen, og radonkoncentrationen vil antage en sådan værdi, at henfaldsrate pga. radioaktivt henfald netop modsvarer emanationsraten. Hvis man foretager en radonmåling i relativ stor dybde, får man derfor umiddelbart kendskab til emanationsraten. Tættere ved jordoverfladen aftager radonkoncentrationen pga. diffusiv afgasning til atmosfæren.

Hvis jorden har en porøsitet på 0.4 og hvis partikeldensiteten kan sættes til $2.7 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, da bliver jordens tørdensitet: $\rho_{\text{ds}} = (1 - 0.4) \cdot 2.7 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3} = 1.62 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, og den førnævnte jordmængde svarer således til omkring 10000 m^3 jord. Eller udtrykt på en anden måde: Den målte radonstrøm på 160 Bq/s svarer til den samlede produktionen af poreluft-radon i 10000 m^3 jord. Hvis jordens emanationsrate sættes til en højere værdi, f.eks. 20 atomer $\text{kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (hvilket er højt under danske forhold), kræves der kun 2500 m^3 jord. Det er relativt let at måle jordens emanationsrate [A99b], men sådanne målinger blev ikke foretaget i undersøgelsen.

Modelberegninger

Der er foretaget numeriske modelberegninger med Rnmod3d, som er en tredimensionel tidsafhængig finite-volume model udviklet på Risø [A00]. Formålet med beregningerne er at undersøge, om den observerede ventilation af jorden kan forklares teoretisk.

Forudsætninger

Der ses bort fra huse og asfalt, og pga. symmetrien kan beregningerne begrænses til et halvplan. Desuden ses der bort fra effekterne ved vakuumsugets begyndelse og slutning således, at der kan gennemføres en todimensional beregning svarende til et uendeligt langt vakuumsug i en uendelig lang jordblok. Alle beregningerne gælder således "per meter løbende rør". Det horisontale vakuumsug er placeret 4 m under terræn i en jordblok med et tværnsnitareal på $6.5 \text{ m} \times 60 \text{ m}$. Jordblokkens dybde svarer til placeringen af det fri grundvandsspejl i undersøgelsen. Det antages, at jorden er tør, isotrop og homogen med følgende parametre: 0.4 totalporøsitet, $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ bulk diffusivitet og 5 atomer $\text{kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ emanationsrate. De valgte parametre kan opfattes som kvalificerede gæt på de faktiske forhold, og det er værd at bemærke, at parametrene svarer til, at den maksimale radonkoncentration i jorden er omkring 20000 Bq/m^3 , hvilket ligger tæt op ad de faktiske målinger i borerne PB4 og PB5 den 17. april. Luftstrømningen i vakuumsugret er sat til $10 \text{ m}^3/\text{h}$ per meter løbende rør således, at der for de i alt omkring 50 m rør opnås et totalt sug på $500 \text{ m}^3/\text{h}$. Det antages, at flowet kan beskrives som såkaldt Darcy flow således, at der er linearitet mellem trykgradient og strømning.

Ligevægtsfelt

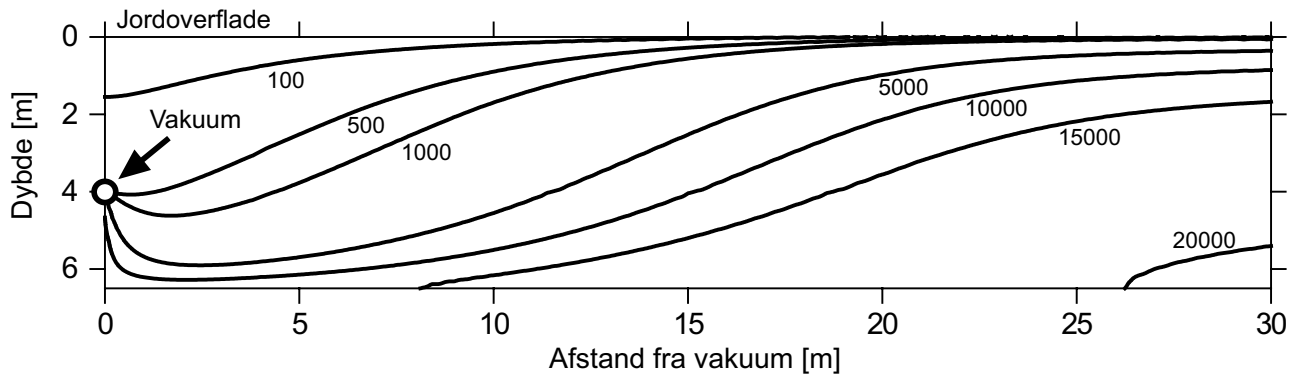
Figur 13 viser radonkoncentrationsfeltet omkring røret, når vakuumanlægget har været tændt i lang tid (f.eks. 30 dage). Det ses, at koncentrationen omkring vakuumsugret er meget lav i sammenligning med situationen længere væk. 30 m fra vakuumsugret er isokoncentrationslinierne næsten horisontale. Med tændt vakuumanlæg er koncentrationen i jorden umiddelbart over vakuumsugret kun nogle få hundrede Bq/m^3 . Dette svarer til målingerne i TB03 og TB04 d. 23. marts, 4. april og 9. maj (se figur 7).

Dybdeprofiler

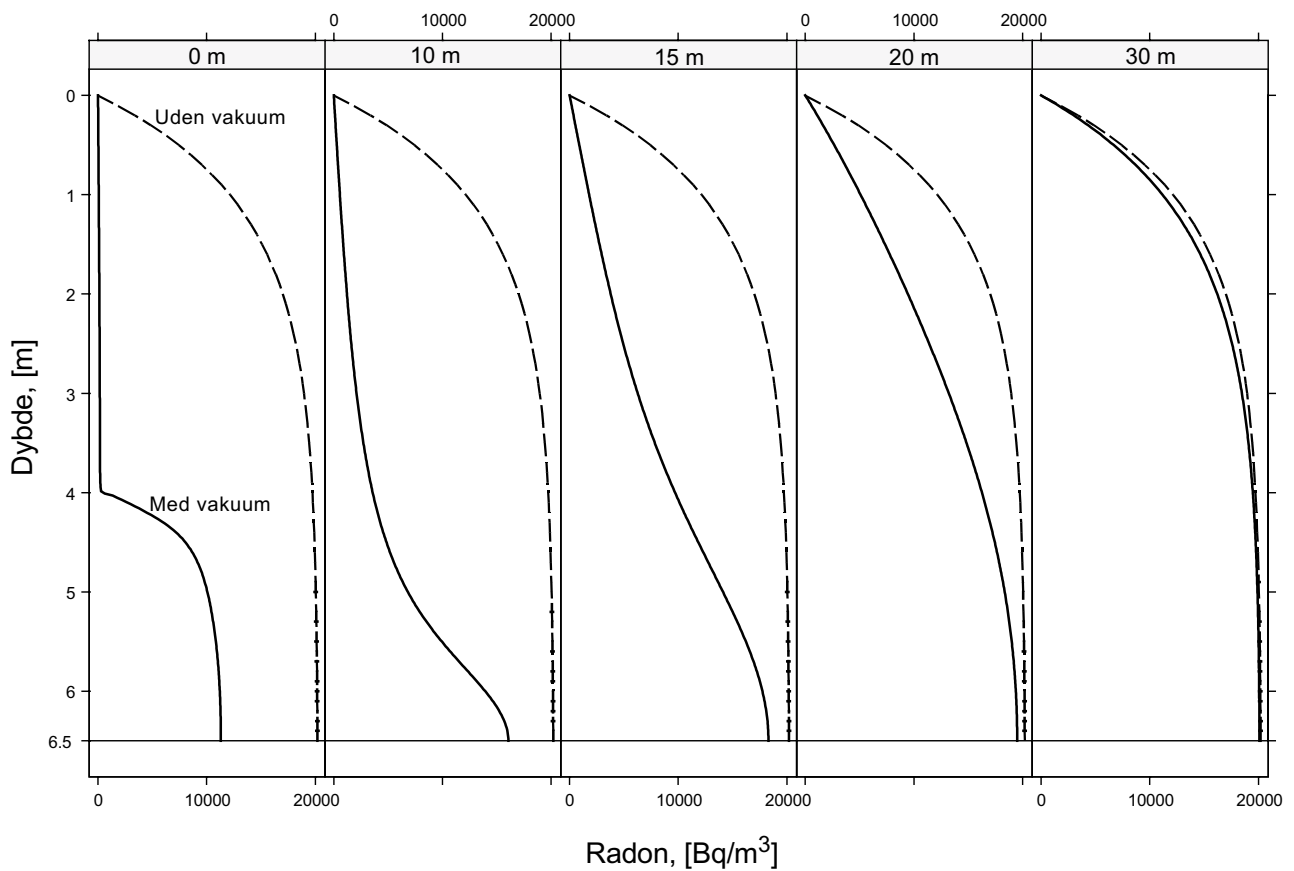
Figur 14 viser sammenhængen mellem dybde og poreluftkoncentration af radon i udvalgte afstande fra vakuumsugret: 0, 10, 15, 20 og 30 m. For at tydeliggøre vakuumanlæggets indflydelse indeholder hvert panel både koncentrationsprofilen med og uden vakuumsug. For den sidstnævnte situation styres transporten alene af diffusion, og det ses af figurerne, at der foregår en afgasning af radon til udeluften. Når vakuumsuget tændes, foretages en kraftig ventilation, idet radonfattig udeluft trækkes ned i jorden. Ventilationen er naturligvis størst umiddelbart omkring vakuumsugret, men selv i en afstand af 20 m falder radonkoncentrationen i poreluften, når vakuumanlægget tændes. 2-3 m under terræn ændres koncentrationen fra omkring 18000 til 12000 Bq/m^3 .

Tidsafhængighed

De processer, som styrer radonkoncentrationen i poreluften (bl.a. produktionen af radon og diffusion), foregår med en endelig hastighed, og det tager derfor tid før end virkningen af at tænde (eller slukke) vakuumanlægget indstiller sig. Dette er vist i figur 15 for dybden 2.75 m under terræn (svarende til dybden for borerne i undersøgelsen) i forskellige afstande fra vakuumsugret. Som udgangspunkt antages

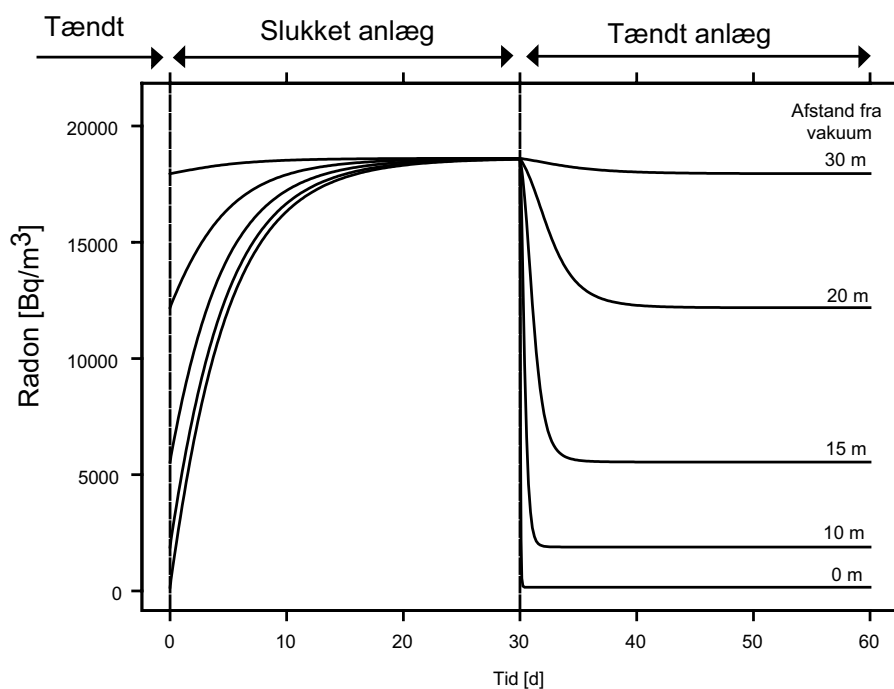


Figur 13. Modelberegning af radonkoncentrationen i jorden omkring vakuumrør efter at vakuumanlægget har været tændt i en lang periode (f.eks. 30 dage). Der er angivet isokoncentrationslinier for intervallet fra 100 til 20000 Bq/m³.



Figur 14. Modelberegning af radonkoncentrationen i poreluften i forskellige afstande fra vakuumrøret. De stiplede linier angiver situationen, hvor vakuumanlægget har været slukket i lang tid (f.eks. 30 dage). De fuldt optrukne linier angiver situationen, hvor vakuumanlægget har været tændt i lang tid.

det, at vakuumanlægget har været tændt i lang tid, og at det slukkes dag 0. Det ses, at koncentrationen vokser op mod en ny ligevægtssituation, hvor koncentrationen i dybden 2.75 m overalt ender med at være omkring 18000 Bq/m³. Efter 20 dage er ligevægten reelt etableret. I den eksperimentelle undersøgelse gik der kun omkring 6 dage fra anlægget blev slukket, til der blev foretaget poreluftmålinger



Figur 15. Modelberegning af hvordan radonkoncentrationen i poreluften ændres i tid når vakuumanlægget tændes og slukkes. Beregningerne gælder for dybden 2.75 m (svarende til dybden af de borer, som blev anvendt i undersøgelsen) i forskellige afstande fra vakuumsøbet.

m.v. d. 17. april. Figur 15 viser således, at jorden ikke har været i radonmæssig ligevægt på det tidspunkt. På dag 30 tændes vakuumanlægget igen, og det ses, at radonkoncentrationen tæt på vakuumsøbet ændres i løbet af nogle timer, mens der går omkring en uge førend ligevægten er etableret andre steder.

4. april

Disse beregninger hjælper til at forstå spotmålingerne d. 4. april. Disse målinger foregik med tændt anlæg, men nogle timer forinden havde anlægget været slukket i næsten 2 dage (målingerne blev foretaget kl. 14 og driften af vakuumanlægget fremgår af tabel 1). Figur 6 viser, at for spotmålingerne i TB03 og TB04 (altså borerne under huset) er der ingen væsentlig forskel mellem målingerne d. 4. april og målingerne, når vakuumanlægget har været tændt i en længere periode (jf. målingerne d. 23. marts og 9. maj). Dette svarer til, at den fulde indvirkning af vakuumentilationen på måletidspunktet allerede er indtruffet for området umiddelbart under huset. For borer længere væk (PB1, PB2, og PB5) går der imidlertid længere tid førend ventilationen sætter ind. Disse borer har således alle en forhøjet radonkoncentration på måletidspunktet d. 4. april, og det formodes, at disse resultater primært afspejler, at anlægget har været slukket i to dage, snarere end at det efterfølgende har været tændt i omkring 5 timer.

Total radonstrøm

Med de valgte parametre strømmer der 180 Bq/s (dvs. 3.6 Bq/s pr. meter) ind i modellens vakuumsøbet. Dette viser sig at være i overordentlig god overensstemmelse med den faktiske måling på 160 Bq/s (jf. ligning 3). Hvis man gennemførte en beregning af hvor meget "modeljord", der kræves for at tilvejebringe denne strøm af radon, får man igen omkring 10000 m³. Det svaret til al den radon, der produceres i en jordblok, der er 50 m lang, 5 m dyb og 40 m (dvs. 2 × 20 m) bred. Jævnfør figur 14 vil forskellige dele af jorden imidlertid ikke ventileres i samme grad.

4 Konklusion

Undersøgelsen viser, at radonkoncentrationen i ejendommen er meget lav (omkring 10 Bq/m^3), når vakuumanlægget er tændt. Koncentrationen svarer til det forventede bidrag fra byggematerialer og udeluft, og undersøgelsen viser således, at der ikke trænger væsentlige mængder radon ind i huset fra jorden, når vakuumanlægget er tændt. Denne konklusion støttes desuden af følgende observationer:

- Spotmålingerne i poreluften demonstrerer, at vakuumanlægget giver anledning til en markant ventilation af jorden under og omkring ejendommen således, at jordens radonkoncentration er væsentligt lavere end hvad der naturligt forekommer i området.
- Trykmålingerne viser, at vakuumanlægget giver anledning til, at der er et lille overtryk i huset i sammenligning med trykket i det kapillarbrydende lag under terrændækket. Trykdifferensen betyder, at der går en vis luftstrøm i retning fra ejendommen mod det kapillarbrydende lag under huset.

Når vakuumanlægget slukkes, stiger radonkoncentrationen i ejendommen. I gennemsnit ændres koncentrationen fra 10 til 30 Bq/m^3 , men i en 15 timers periode er koncentrationen omkring 70 Bq/m^3 . Det formodes, at radonkoncentrationen stiger pga. øget indtrængning fra jorden, hvilket underbygges af, at der er en tendens til, at radonkoncentrationen stiger, når der er undertryk i ejendommen, og at den falder, når der er overtryk. Tilsvarende gælder det, at der er tendens til, at radonkoncentrationen stiger, når det atmosfæriske tryk falder, og at den falder, når det atmosfæriske tryk stiger. Disse forhold tyder direkte på, at der sker en advektiv indtrængning af radon (dvs. at radon trænger ind med en trykdreven luftstrøm) fra jorden under huset, når vakuumanlægget er slukket. Under en række simplificerende antagelser (at der ikke sker diffusiv indtrængning, at luften i det kapillarbrydende lag har en radonkoncentration på 1000 Bq/m^3 , at luftskiftet konstant er 0.3 h^{-1} uafhængig af om vakuumanlægget er tændt eller ej m.v.) kan det beregnes, at indtrængningen af luft fra det kapillarbrydende lag (dvs. "jordluft") er omkring $1 \text{ m}^3/\text{h}$, når vakuumanlægget er slukket. Det skal understreges, at denne vurdering er behæftet med stor usikkerhed, og at der formodentlig er tale om et overestimat.

Det formodes, at den direkte kobling mellem det kapillarbrydende lag og udeluften (via den tilkoblede svane Hals) spiller en vigtig rolle for ejendommens radonforhold.

Ved måling af radonkoncentrationen i den opsugede luft kan det vurderes, at vakuumanlægget ventilerer omkring 10000 m^3 jord. Denne del af undersøgelsen understøttes af numeriske modelberegninger foretaget med modellen `Rnmod3d`.

Undersøgelsen demonstrerer, at radon kan anvendes som sporgas for jordluftindtrængning til huse på forurenede renserriggrunde, og til vurdering af influenszonen for vakuumanlæg. Anvendelsen af kontinuerede målinger forekommer at være særligt egnede til undersøgelser, hvor der allerede er installeret afværgetiltag (dvs. hvor der kan laves "tænd-og-sluk"-målinger).

Det skal afslutningsvis bemærkes, at der intet usædvanligt er ved det målte radonniveau i ejendommen. I gennemsnit har danske enfamiliehuse en årsmidlet radonkoncentration på 77 Bq/m^3 , og omkring 4.6% har en årsmiddelværdi over 200 Bq/m^3 [A01a].

Bidrag til projektet

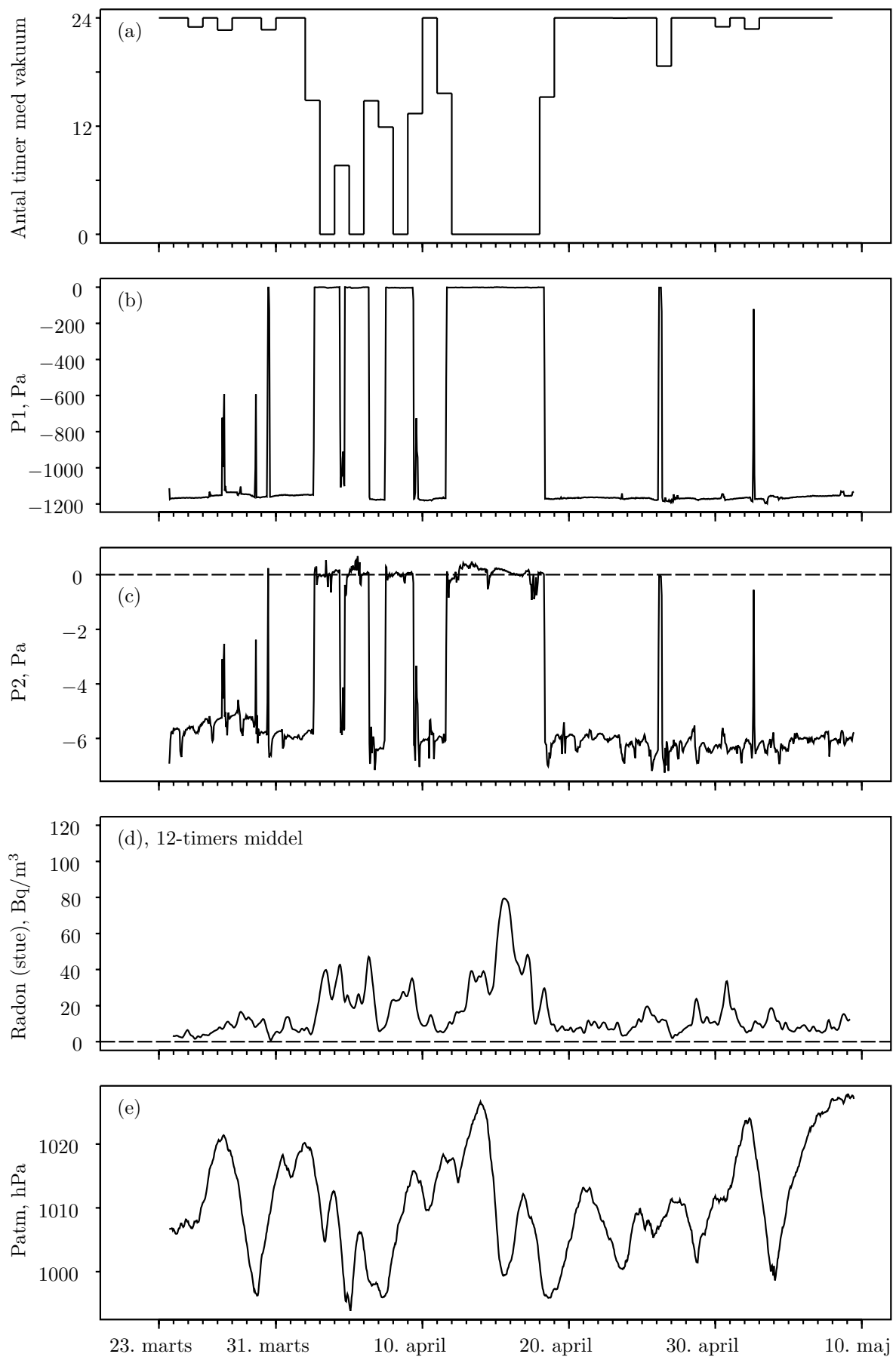
Projektet er finansielt støttet af Fyns Amt, Jordforureningskontoret (Hans Skou). Anne Evers Nikolajsen og Torben Højbjerg Jørgensen fra COWI Rådgivende Ingeniører AS, Odense takkes for velvillig assistance ved besøg i ejendommen.

A Kontinuerte målinger

Dette bilag indeholder en samling grafer over målte tidsserier af radon og andre parametre i ejendommen. Hver figur har en datolinie med aksemarkeringer ved kl. 00:00. Det fremgår af figurerne, at målingerne startede om eftermiddagen den 23. marts, og sluttede om formiddagen den 9. maj. De fleste grafer viser direkte de målte timeværdier, men i enkelte tilfælde er der foretaget en lavpasfiltrering således, at graferne viser løbende 12-timers gennemsnit. Dette er forklaret nærmere side 7. Figurerne er inddelt i to dele:

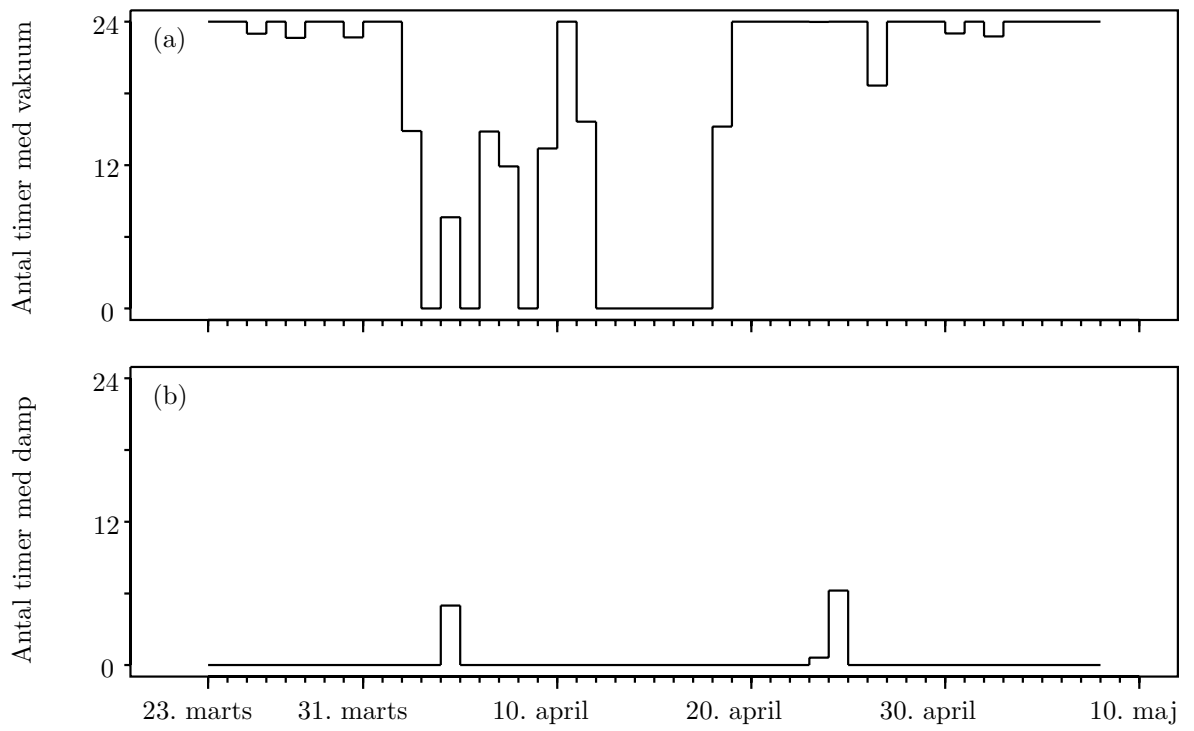
- Figur A.16 til A.22 omfatter hele måleperioden, og
- Figur A.23 til A.28 omfatter kun perioden fra 12. til 18. april, hvor vakuumanlægget var slukket.

Figurerne er anbragt emnevis. Eksempelvis indeholde figur A.18 alle radonmålinger, mens figur A.22 indeholder alle fugtmålinger. Dog er de vigtigste variable sammenstillet i figur A.16 (hele perioden) og figur A.23 (kun perioden fra 12. til 18. april).

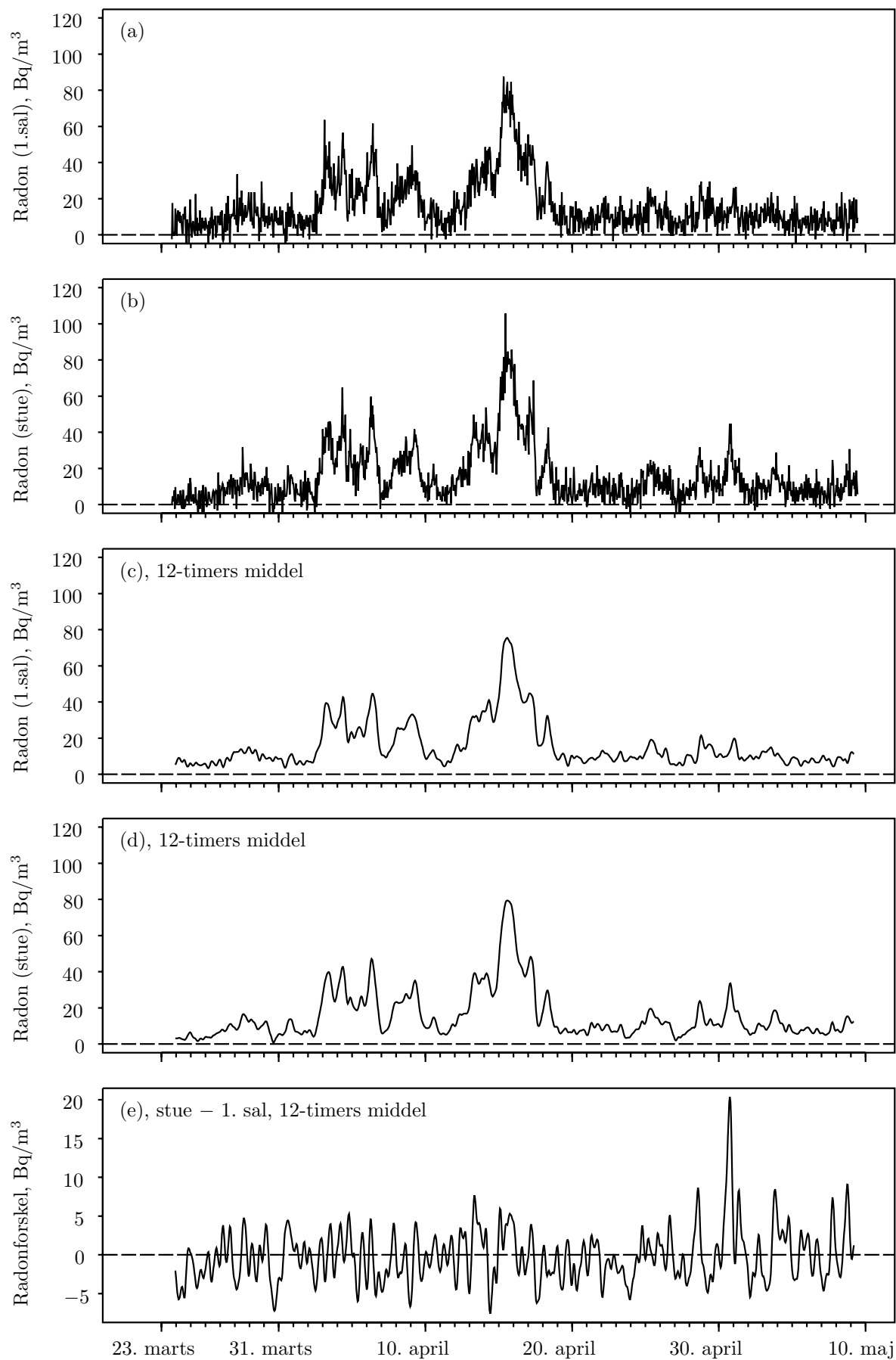


Figur A.16. Oversigt: (a) Drifttid for vakuumanlæg, (b) trykforskel mellem TB03 og hus, (c) do. mellem Gulv1 og hus, (d) radon i stuen, og (e) atmosfærisk tryk.

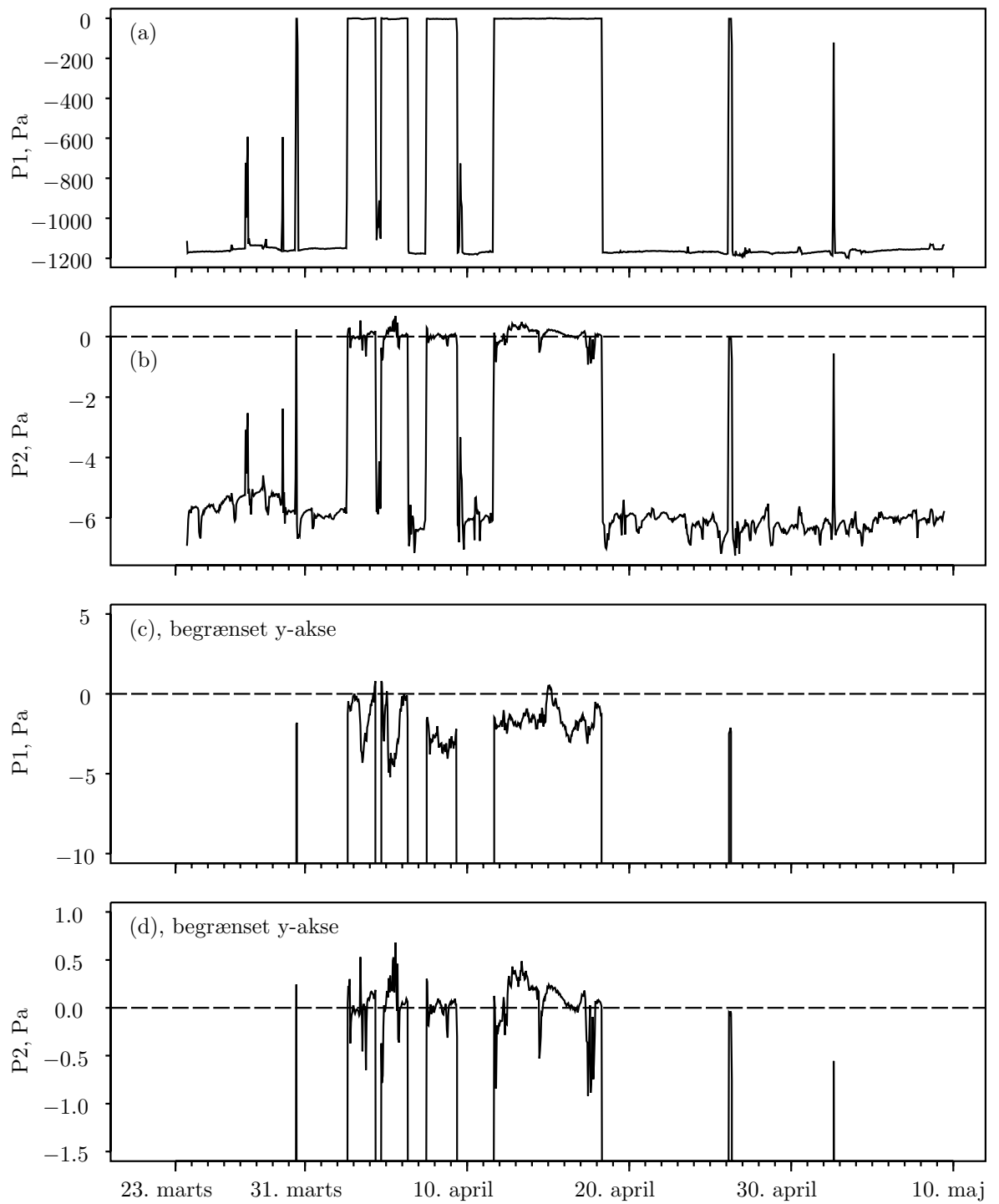
Risø-R-1279(DA)



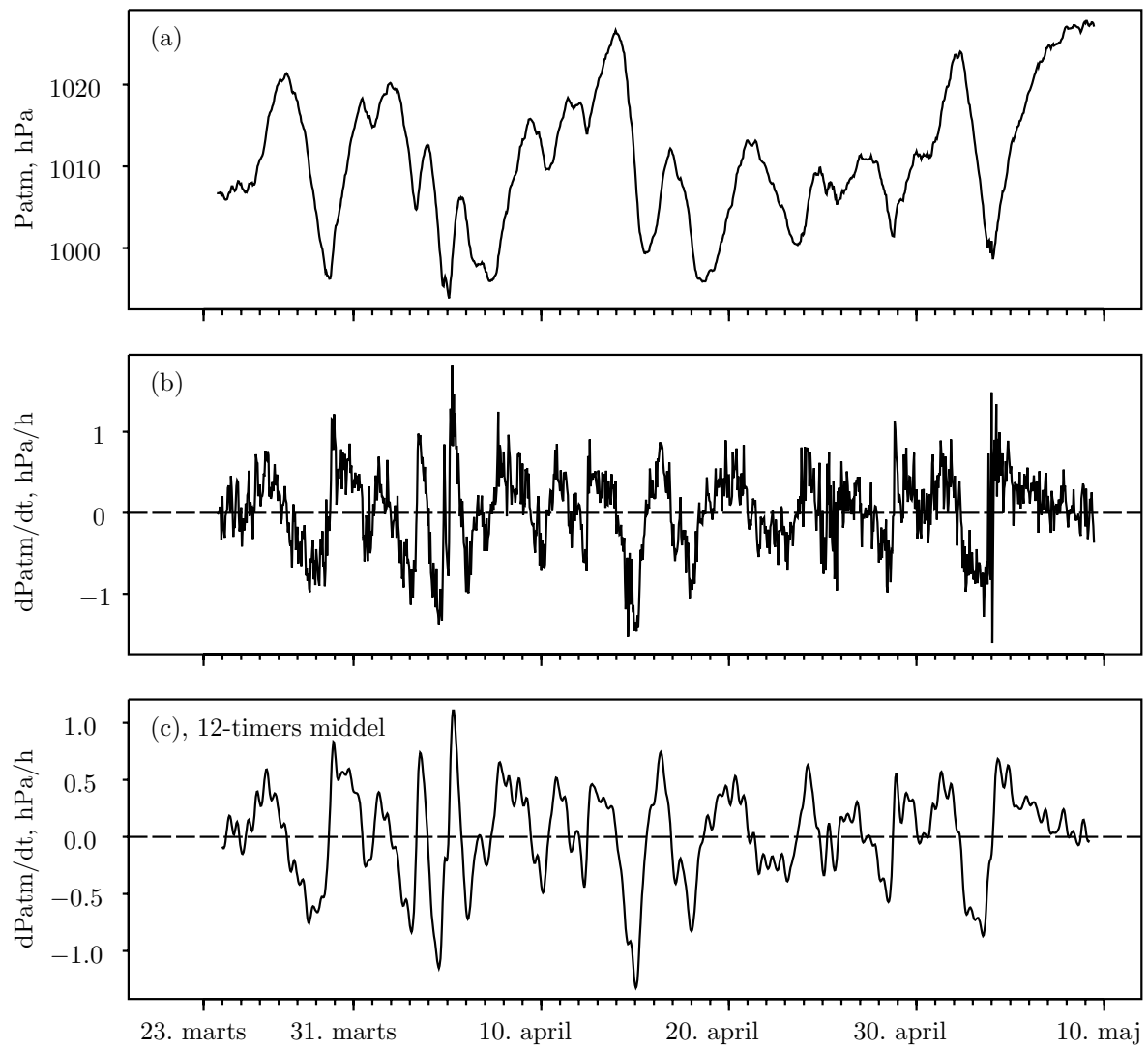
Figur A.17. Drifttider for vakuume ekstraktion og damp iht. oplysninger fra COWI (se afsnit 2.3 og afsnit 3.1). For hver dag er antallet af drifttimer angivet. Eksempelvis ses det, at dampanlægget var tændt omkring 5 timer d. 4. april.



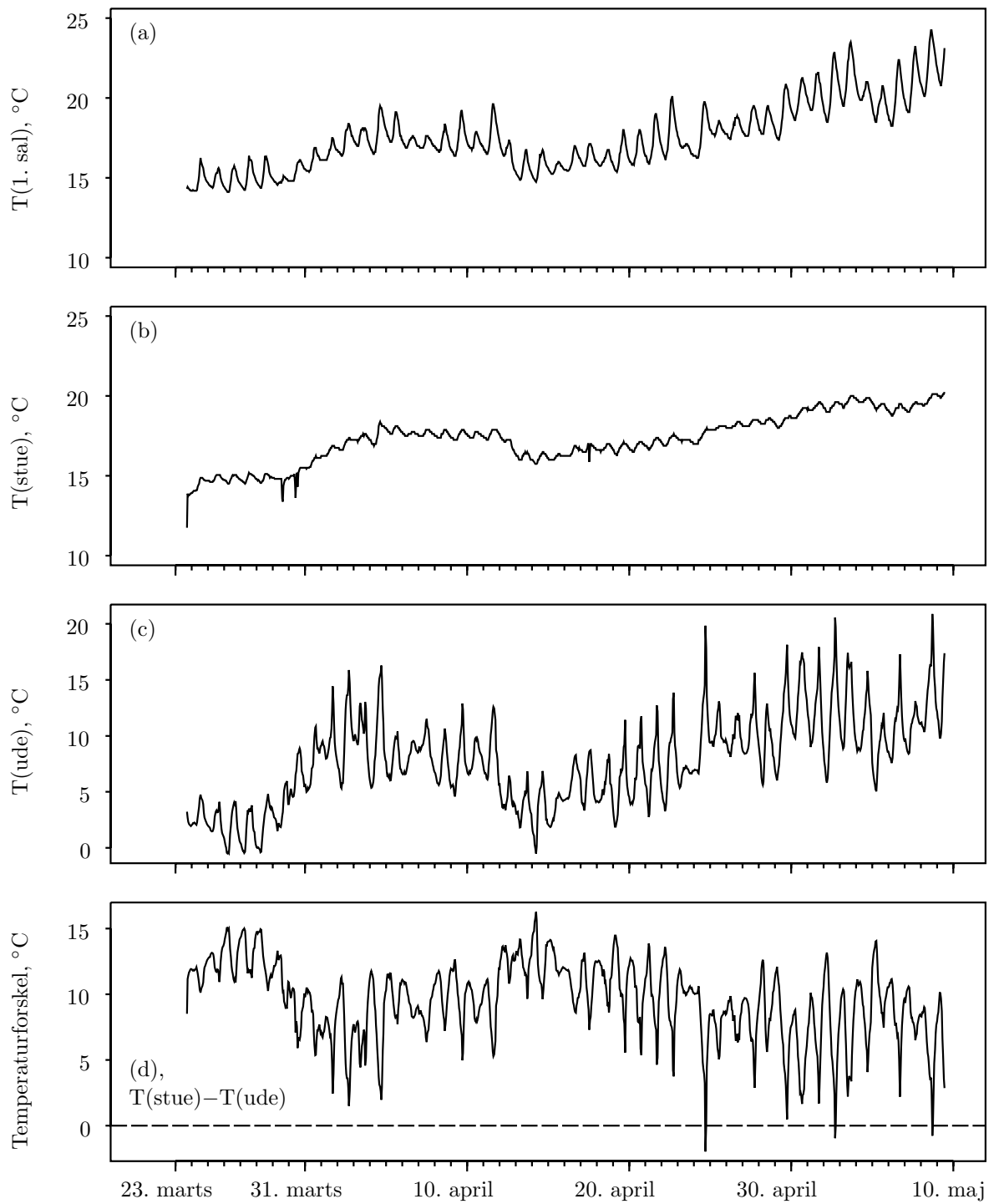
Figur A.18. Kontinerte radonmålinger i stue og på første sal.



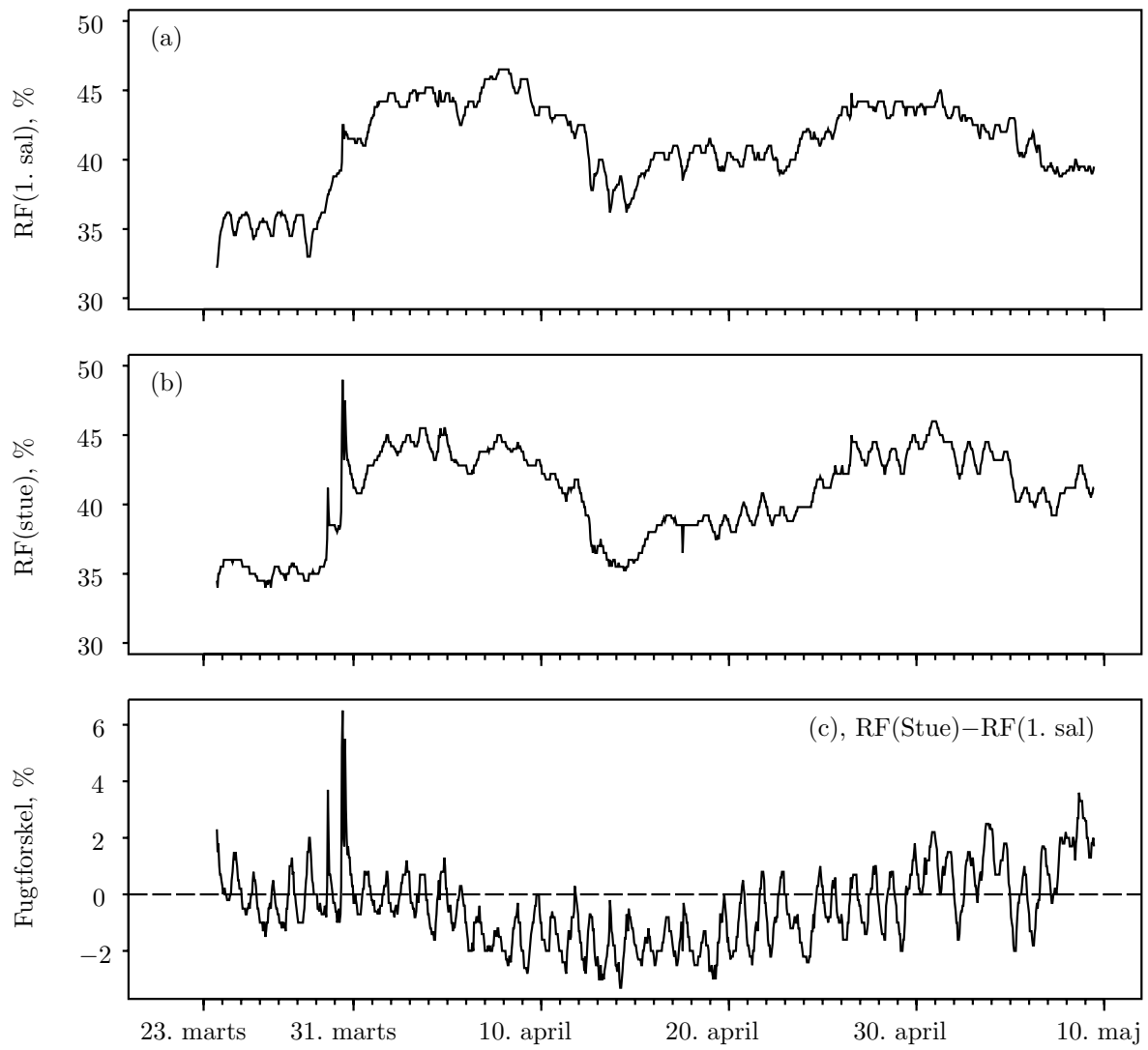
Figur A.19. Kontinerte målinger af differenstrykkene $P1$ (mellem probe TB03 og hus) samt $P2$ (mellem det kapillarbrydende lag og hus).



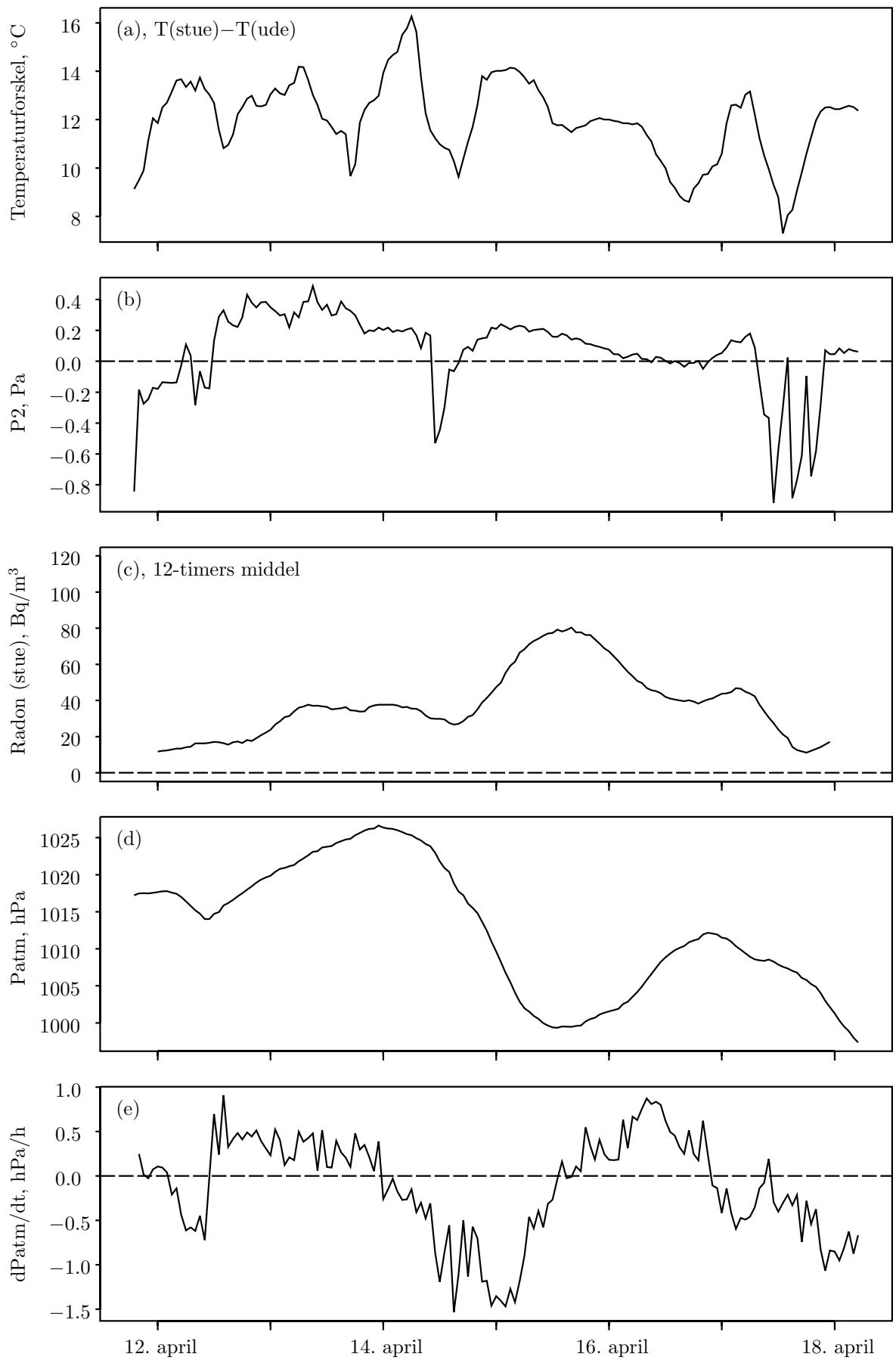
Figur A.20. Atmosfæretrykmålinger. (b) og (c) viser ændringshastigheden fra time til time.



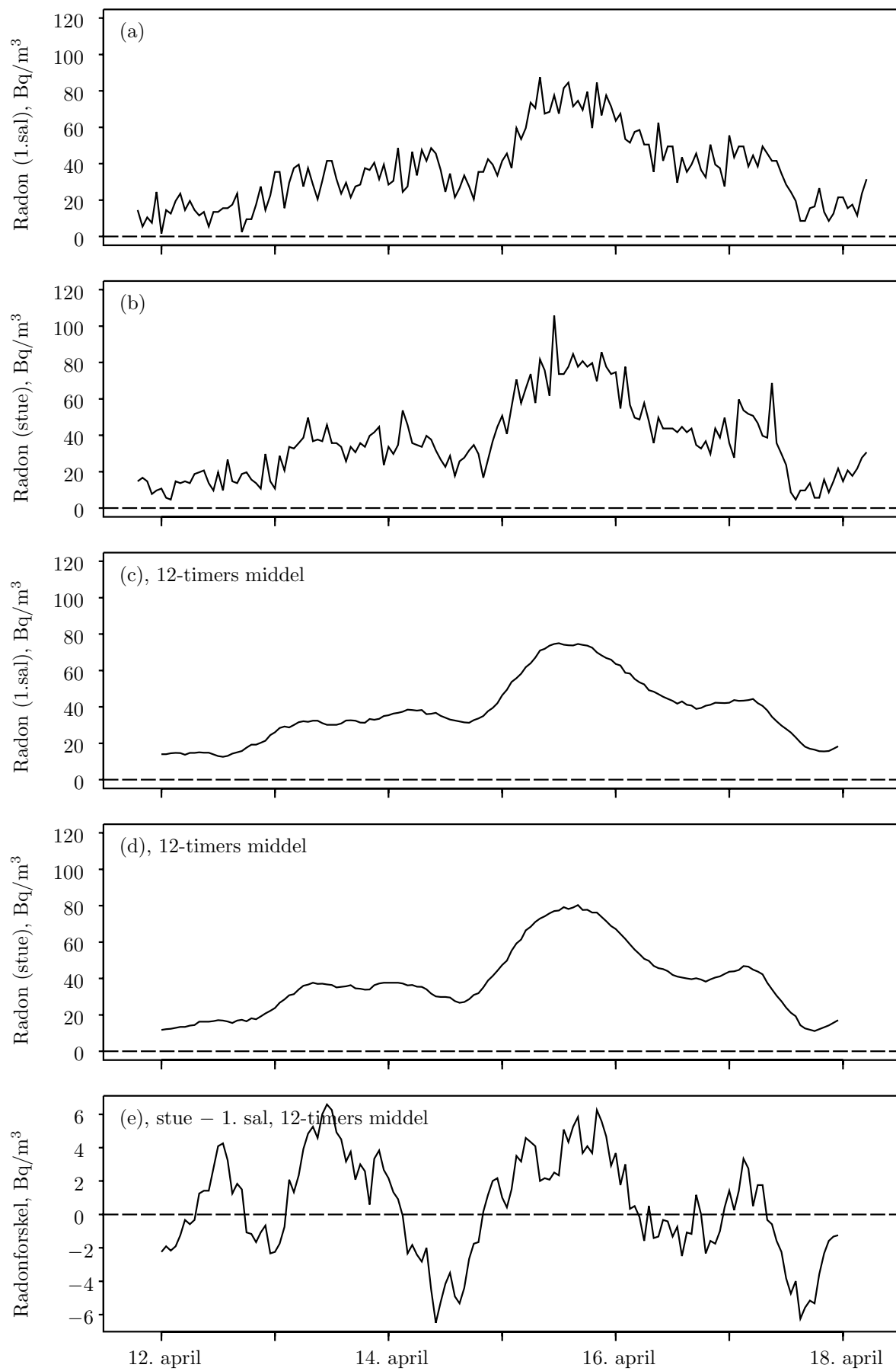
Figur A.21. Temperaturmålinger. (d) angiver temperaturforskellen mellem stue og udeluft.



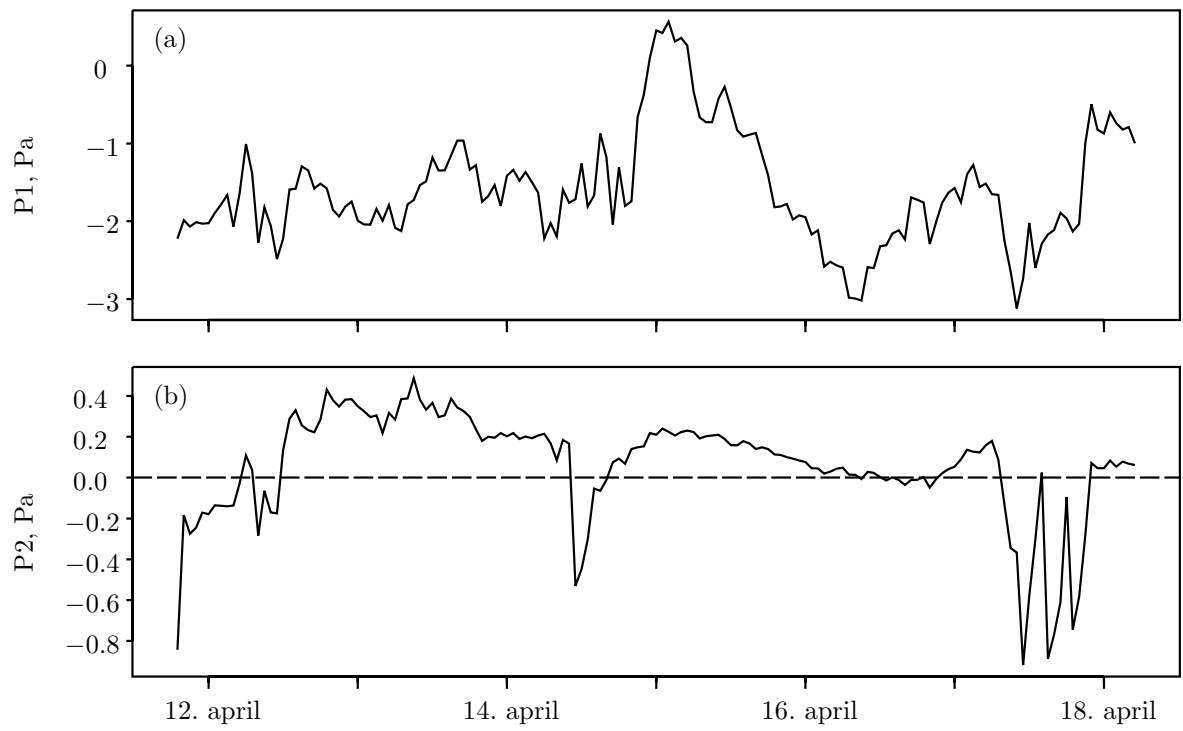
Figur A.22. Målinger af relativ luftfugtighed.



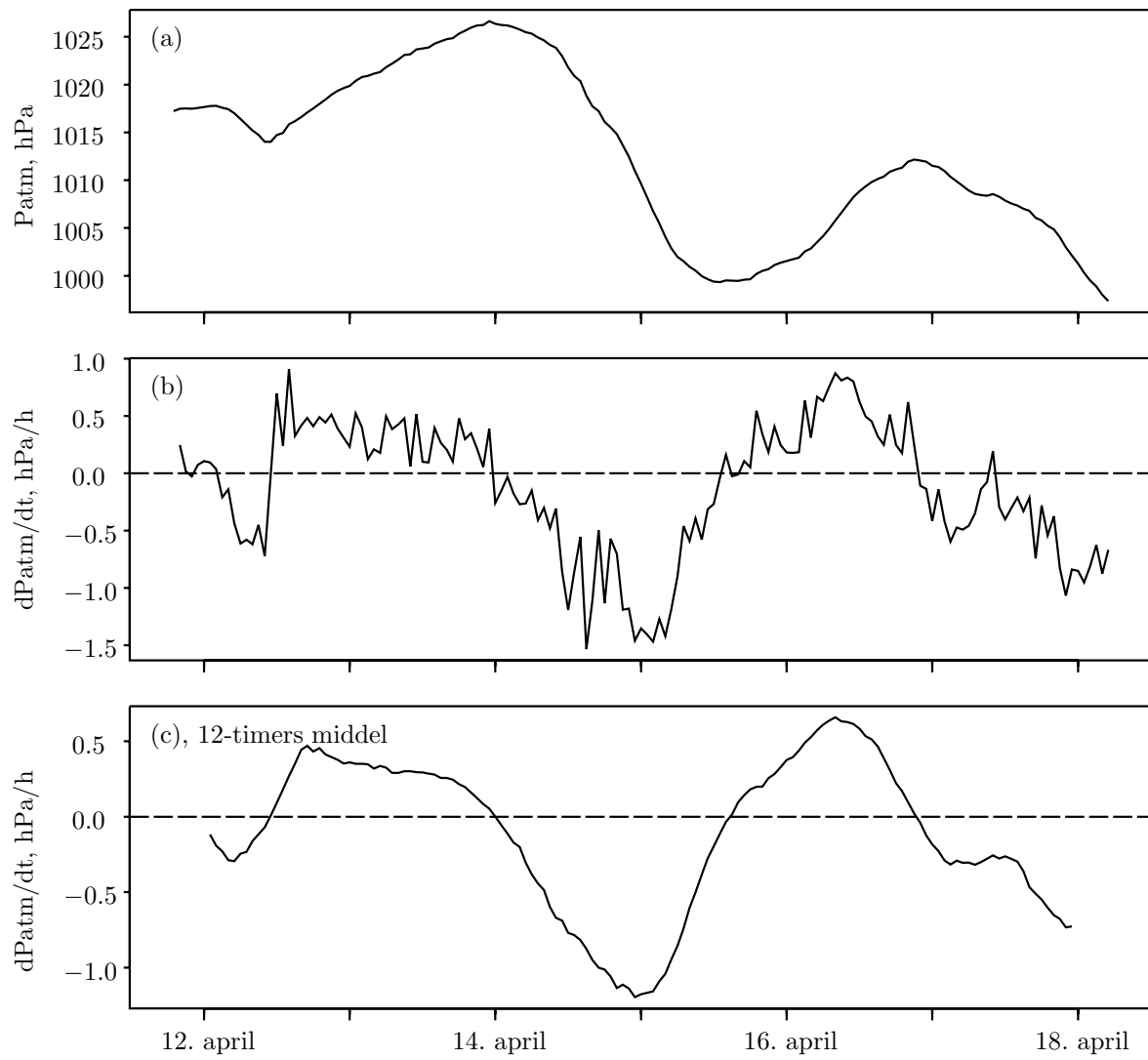
Figur A.23. Oversigt: (a) Temperaturdiff., (b) trykdiff. mellem Gulv1 og hus, (c) radon i stuen, (d) atm. tryk, og (e) ændringshastighed af atm. tryk.



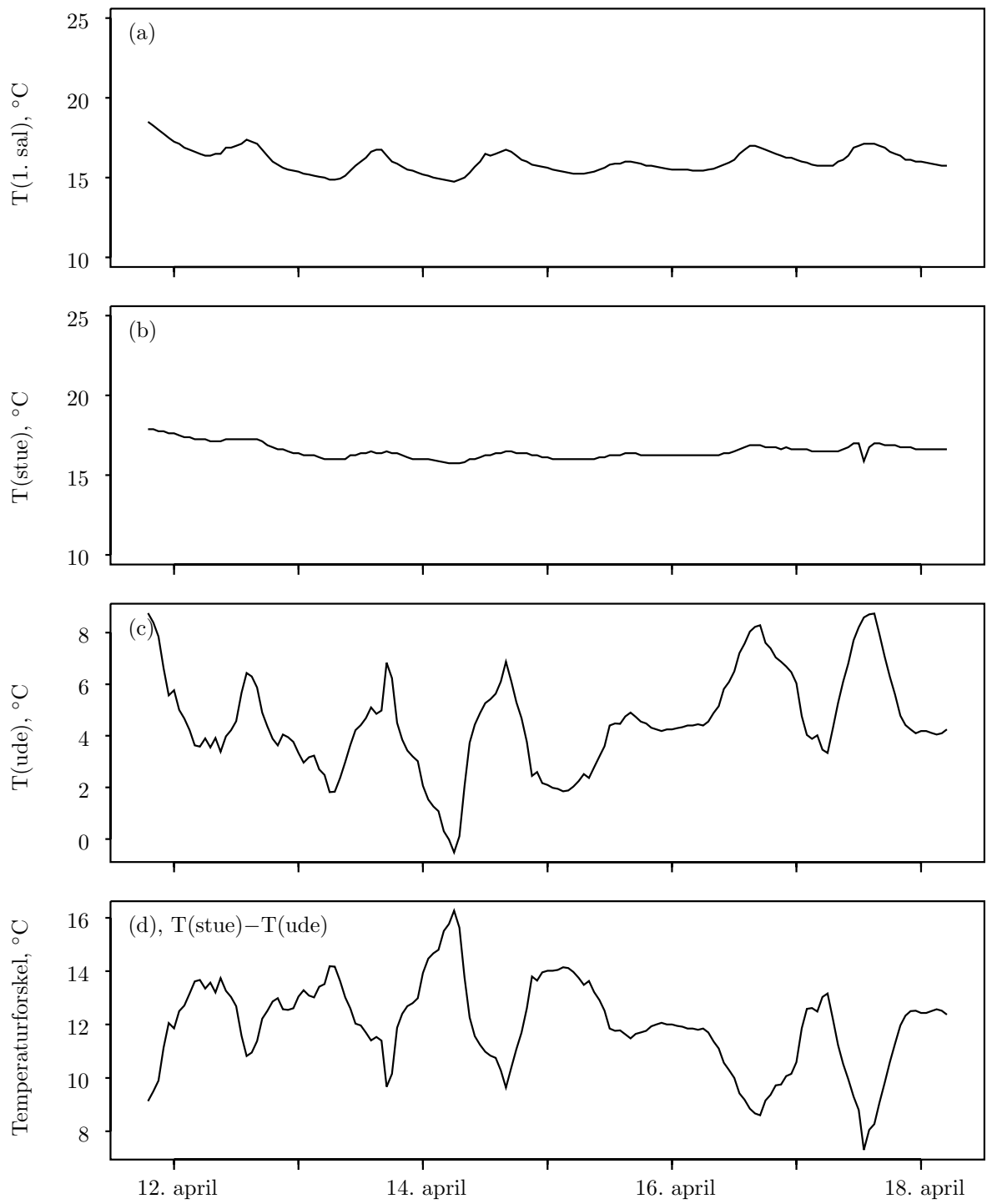
Figur A.24. Kontinerte radonmålinger i stue og på første sal.



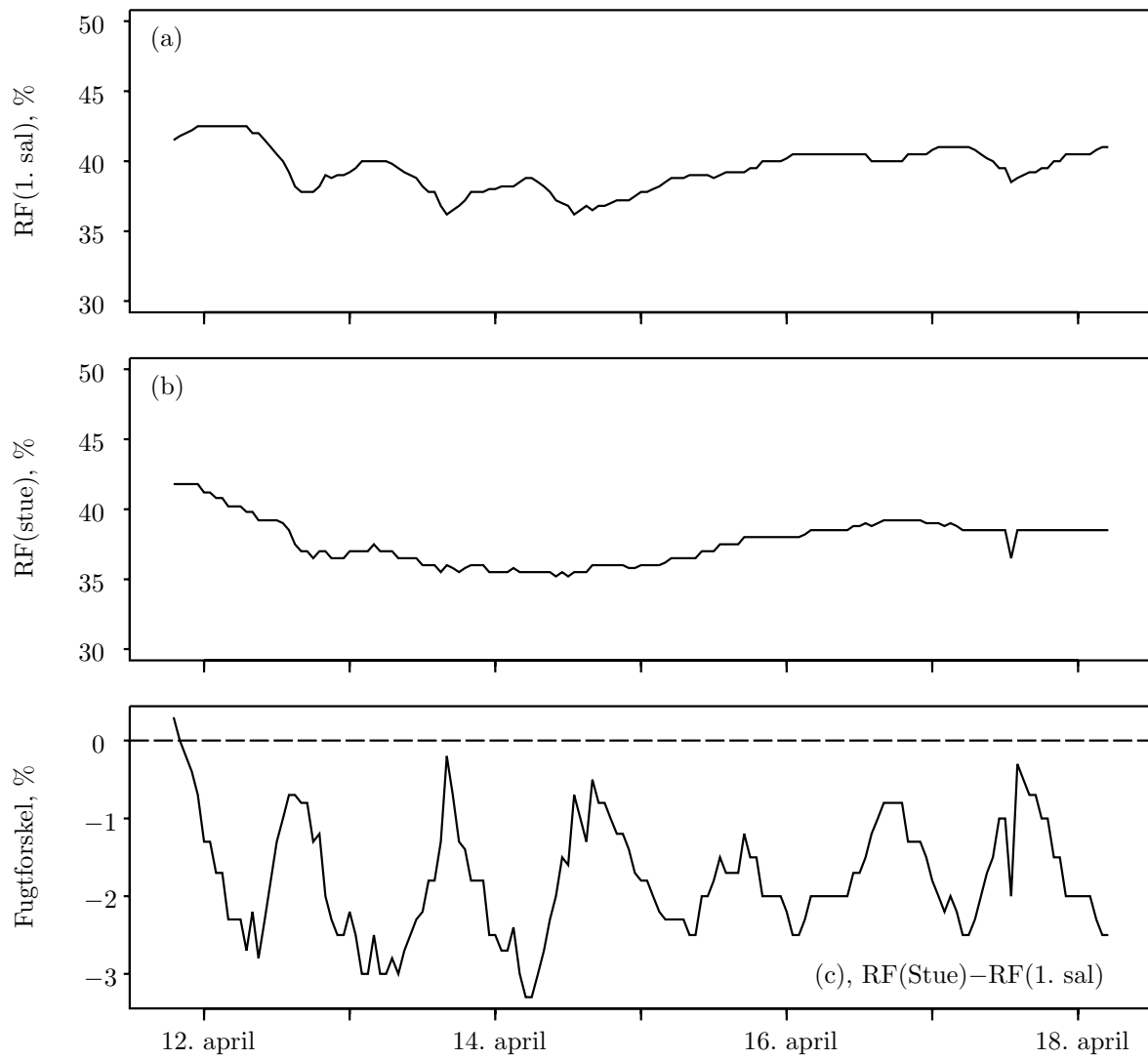
Figur A.25. Kontinerte målinger af differenstrykkene $P1$ (mellem probe TB03 og hus) samt $P2$ (mellem det kapillarbrydende lag og hus).



Figur A.26. Atmosfæretrykmålinger. (b) og (c) viser ændringshastigheden fra time til time.



Figur A.27. Temperaturmålinger. (d) angiver temperaturforskellen mellem stue og udeluft.



Figur A.28. Målinger af relativ luftfugtighed.

Litteratur

- [A93] Andersen, C.E.; Søgaard-Hansen, J.; Damkjær, A.; Majborn, B.: Modellering og måling af radons indtrængning i bygninger - analogier til indtrængning af andre gasser. I: Vurdering af inde- og udeklima på grunde forurenede med flygtige organiske kemikalier. ATV møde, København (DK), 4 Nov 1993. (ATV-komiteen vedrørende grundvandsforurening. Institutet for Geologi og Geoteknik, Lyngby, 1993) p. 133–150.
- [A96] Andersen, C.E., Koopmans, M. og de Meijer, R.J.: Identification of soil-gas radon into a crawl-space covered with sheets of polyethylene foil. Forskningscenter Risø, Risø-R-876(En)/KVI-R58. 126 sider, 1996.
- [A97a] Andersen, C.E., Bergsøe, N.C., Brendstrup, J., Damkjær, A., Gravesen, P. og Ulbak, K.: Radon-95: En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse. Forskningscenter Risø, Risø-R-979(DA), 108 sider, 1997. Rapporten kan downloades fra adressen: <http://www.risoe.dk/rispubl/nuk/ris-r-979.htm>.
- [A97b] Andersen, C.E., Bergsøe, N.C., Majborn, B. og Ulbak, K.: Radon and natural ventilation in newer Danish single-family houses. *Indoor Air*, 7, 278-286, 1997.
- [A99a] Andersen, C.E.: Radon-222 exhalation from Danish building materials: H+H Industri A/S results. Forskningscenter Risø, Risø-R-1135(EN), 1999. Rapporten kan downloades fra adressen: <http://www.risoe.dk/rispubl/nuk/ris-r-1135.htm>.
- [A99b] Andersen, C.E.: Radon-222 in soil, water and building materials: Presentation of laboratory measurement methods in use at Risø. Proceedings XII ordinary general meeting of the Nordic Society for Radiation Protection, Skagen, Denmark, August 23–27, 1999. Dokumentet kan downloades fra adressen: <http://www.risoe.dk/rispubl/nuk/nukartikler/radon.htm>.
- [A00] Andersen, C.E.: Radon transport modelling: User's guide to RnMod3d. Risø rapport: Risø-R-1201(EN), 116 sider, 2000. Rapporten kan downloades fra adressen: <http://www.risoe.dk/rispubl/nuk/ris-r-1201.htm>.
- [A01a] Andersen, C.E., Ulbak, K., Damkjær, A. og Gravesen, P.: Radon i danske boliger. Kortlægning af lands-, amts- og kommuneværdier. Rapport udgivet af Sundhedsstyrelsen, Statens Institut for Strålehygiejne, 132 sider, 2001. Rapporten kan downloades fra adressen: www.radon.dk.
- [A01b] Andersen, C.E.: Numerical modelling of radon-222 entry into houses: An outline of techniques and results. *Science of the Total Environment*, vol. 272(1–3), 33–42, 2001.
- [A01c] Andersen, C.E.: Numerisk modellering af radonindtrængning til enfamiliehuse. I: Truslen mod indeklimaet fra jordforureninger. ATV-møde, Gentofte (DK), 3 May 2001. (ATV-Fonden for Jord og Grundvand, Lyngby, 2001) p. 45–54. Dokumentet kan

downloades fra adressen: <http://www.risoe.dk/rispubl/nuk/nukartikler/radonatv.htm>.

- [B92] Bergsøe, N.C.: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser. Beskrivelse og analyse af PFT-metoden. Dansk Byggeforskningsinstitut, SBI-report 227, 1992.
- [C00] COWI Rådgivende Ingeniører AS: Forslag til aktiviteter under Miljøstyrelsens Teknologipulje i forbindelse med oprensning på Vesterbro 28–30, Odense. Notat dateret 29. juni 2000.
- [D85] Damkjær, A. og Korsbech, U.: Measurement of the emanation of radon-222 from Danish soils. *The Science of the Total Environment*, 45, 343–350, 1985.
- [M86] Majborn, B. Upublicerede resultater. Forskningscenter Risø, 1986.
- [S87a] Statens Insitut for Strålehygiejne og Forskningscenter Risø: Naturlig stråling i danske boliger. Sundhedsstyrelsen, 122 sider, 1987. Rapporten kan downloades fra adressen: www.radon.dk.
- [S87b] Statens Insitut for Strålehygiejne: Radon–boliger–strålingsdosis–lungekræftirisiko. Sundhedsstyrelsen, 14 sider, 1987.
- [Å84] Åkerblom, G, Andersson, P., og Clavensjö, B.: Soil gas radon – A source for indoor radon daughters. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 7(1–4), 49–54, 1984.

Title and author(s)

Radon as a tracer for soil-gas entry into a house located next to a contaminated dry-cleaning property (in Danish)

Claus E. Andersen

ISBN

87-550-2907-8 (paper)

87-550-2908-6 (electronic version)

ISSN

0106-2840

Dept. or group

Nuclear Safety Research Department

Date

July 2001

Sponsorship

Fyns Amt

Pages

38

Tables

1

Illustrations

28

References

17

Abstract (Max. 2000 char.)

This study applies the naturally occurring radioactive gas radon-222 as a tracer for soil-gas entry into a house located next to a dry-cleaners shop. This is possible because the concentration of radon in the soil below the house is about 1000 times higher than the concentration in outdoor air. The study is based on continuous indoor measurements of radon, differential pressures, barometric pressure and temperatures and grab samples of radon below the slab and in the soil in the vicinity of the house. During the investigation, vacuum extraction were used to remove chlorinated solvents (perchloroethylene, PCE) from the unsaturated zone. The study shows that the vacuum extraction influences the radon concentration in and below the house. When the vacuum pump is on, the indoor radon concentration is only 10 Bq/m³ corresponding to the contribution from radon in outdoor air and exhalation from building materials. When the vacuum pump is set off, the average indoor radon concentration increases to 30 Bq/m³. It is believed that the increase is caused by radon entry from the soil. Regression analysis demonstrates that changes in the indoor radon concentration can be explained by changes in indoor-outdoor pressure differences and changes in the atmospheric pressure. This suggests that advection is the primary mode of entry. Under some highly simplifying assumptions the soil-gas entry is found to be around 1 m³/h. This, however, is most likely an overestimate. Based on the measured radon concentration in the exhaust air from the vacuum system and a typical radon emanation rate for Danish soil, it is estimated that the soil vapor extraction system ventilates about 10000 m³ of soil. The investigation is supported by numerical model calculations with the finite-volume model **Rnmod3d**.

Descriptors INIS/EDB

ADVECTION; AIR INFILTRATION; DIFFUSION; ENVIRONMENTAL TRANSPORT; FINITE DIFFERENCE METHOD; GAS FLOW; HOUSES; PERFORMANCE TESTING; RADON 222; REMEDIAL ACTION; SOILS; SOLVENT EXTRACTION; VACUUM SYSTEMS

Available on request from: Information Service Department, Risø National Laboratory (Afdelingen for Informationsservice, Forskningscenter Risø) P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark. Phone (+45) 46 77 40 04, Telefax (+45) 46 77 40 13



Forskningscenter Risø udfører naturvidenskabelig og teknisk-videnskabelig forskning, der tilfører det danske samfund nye teknologiske udviklingsmuligheder, styrker erhvervslivets konkurrenceevne og bidrager til at industri-, energi- og jordbrugssektoren kan reducere deres miljøbelastninger.

Risø rådgiver myndighederne om nukleare forhold.

Forskningen indgår i nationale og internationale forskningsprogrammer og lignende samarbejder. Tyngden ligger på grundlæggende forskning, strategisk forskningssamarbejde og markedsstyrede opgaver.

Forskningen sker inden for programområderne:

- Industrielle materialer
- Nye funktionelle materialer
- Optik og sensorsystemer
- Planteproduktion og stofkredsløb
- Systemanalyse
- Vindenergi og atmosfæriske processer
- Nuklear sikkerhed

Universiteter, forskningsinstitutioner, teknologiske institutter og erhvervsvirksomheder er vigtige samarbejdspartnere for Risø.

Ph.d.-uddannelse af unge forskere og post doc-programmer er en central del af Risøs virksomhed.

ISBN 87-550-2907-8

ISBN 87-550-2908-6 (Internet)

ISSN 0106-2840

Rekvireres fra

Forskningscenter Risø

Afdelingen for Informationservice

Postboks 49

4000 Roskilde

Telefon 4677 4004

risoe@risoe.dk

Fax 4677 4013

Website risoe.dk