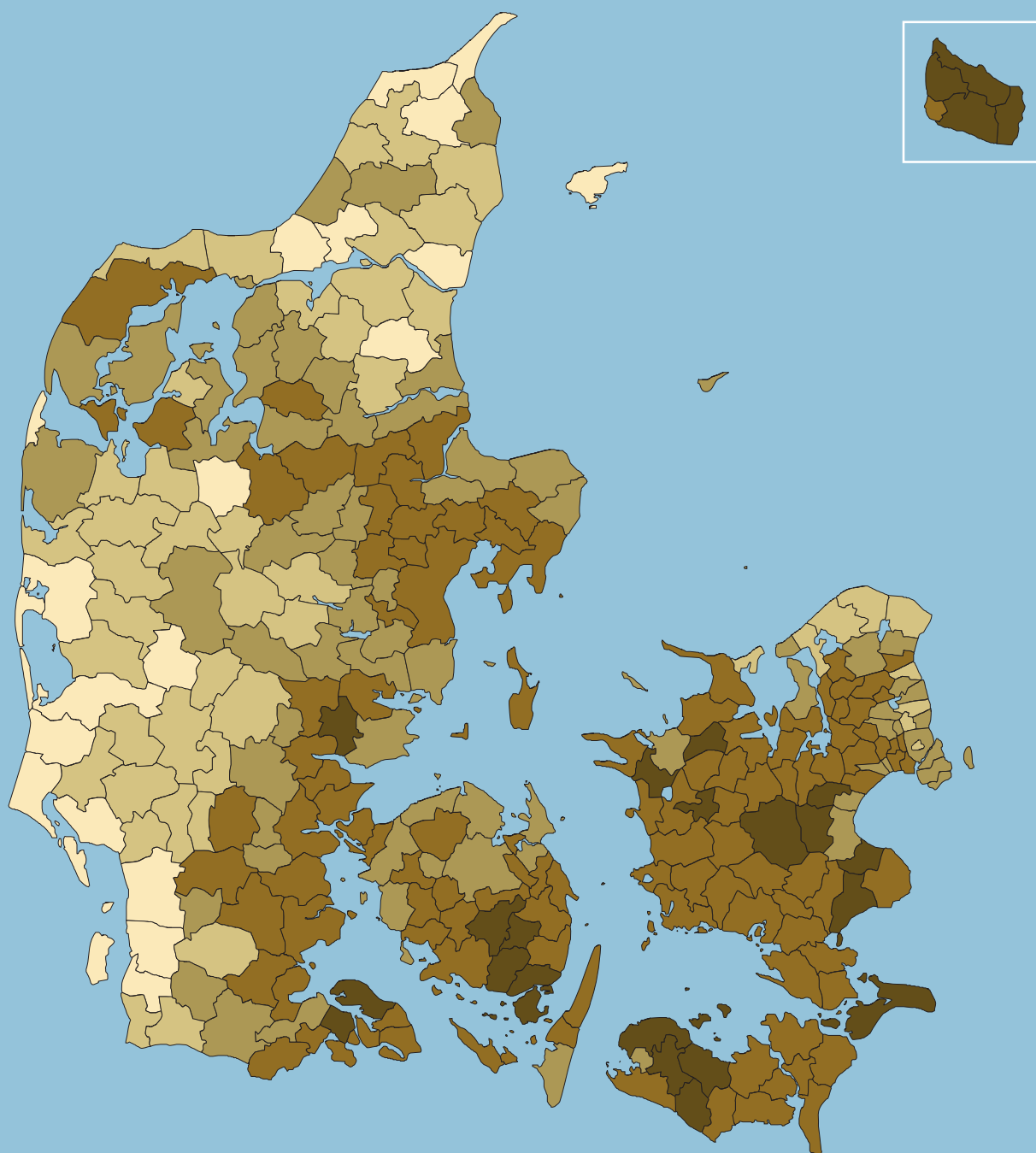


Radon i danske boliger

Kortlægning af lands-,
amts- og kommuneværdier



Radon i danske boliger

Kortlægning af lands-, amts- og kommuneværdier

Claus E. Andersen¹

Kaare Ulbak²

Anders Damkjær¹

Peter Gravesen³

¹**Forskningscenter Risø**

²**Statens Institut for Strålehygiejne**

³**Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse**

Sundhedsstyrelsen

Statens Institut for Strålehygiejne

Januar 2001

Resumé Der er gennemført en kortlægning af radonforholdene i danske boliger. Koncentrationen af radon-222 er målt i 3019 enfamiliehuse og 101 flerfamiliehuse (etageboliger) vha. den såkaldte sporfoliemetode. Der er på den baggrund fremstillet et kort, som kommune for kommune angiver andelen af enfamiliehuse med værdier over det niveau på 200 Bq/m³, hvor bygningsmyndighederne anbefaler, at der bør gennemføres simple tiltag mod radon. For landet som helhed har 4.6 % af enfamiliehusene værdier over 200 Bq/m³. Det svarer til 65 000 huse. I visse egne (f.eks. Nordjylland) er mindre end 1 % over 200 Bq/m³. I andre egne (f.eks. visse steder på Fyn og Bornholm) er værdien større end 10 %. 15 huse i undersøgelsen havde værdier over 400 Bq/m³. Sammenhængen mellem radon og forskellige faktorer er undersøgt vha. regressionsanalyse. De tre vigtigste faktorer er kælderforhold, landsdel og jordart. Analysen bekræfter, at jorden under huset er den vigtigste kilde til radon i danske enfamiliehuse. Undersøgelsen bidrager desuden med et mere nuanceret billede af sammenhængen mellem geologi og indendørs radon. Eksempelvis kan det påvises, at der er en radonmæssig forskel på moræneler fra landsdel til landsdel. Undersøgelsen giver ikke anledning til at tro, at en væsentlig del af nyere danske enfamiliehuse har en lufttæt konstruktion mod jord.

Abstract in English A survey of radon in Danish dwellings has been carried out. The concentration of radon-222 has been measured in 3019 single-family houses and 101 multi-family houses (apartment complexes) with the so-called alpha-track technique (CR-39). On this basis, a map has been established. This map shows the percentage of single-family houses in each of the 275 municipalities with levels above 200 Bq/m³ (i.e. the action level recommended by the Danish building authorities for simple radon remediation). For Denmark as a whole, 4.6 % of the single-family houses are above 200 Bq/m³. That corresponds to 65 000 houses. In certain parts of the country (e.g. northern Jutland) less than 1 % are above 200 Bq/m³. In other places (e.g. certain parts of Funen and Bornholm) the value is above 10 %. In the survey, 15 houses had levels above 400 Bq/m³. The relationship between radon and various factors has been investigated with regression analysis. The three most important factors are type of basement, province, and soil type. The analysis confirms that the soil below the houses is the most important source of radon in Danish single-family houses. The study also provides a more detailed picture of the relation between geology and indoor radon. For example, it is shown that clayey till generates different indoor radon levels in the different parts of the country. The study does not indicate that a substantial part of newer Danish houses have an airtight house-soil interface. The report includes a summary in English.

Claus E. Andersen^{1,a}, Kaare Ulbak^{2,b}, Anders Damkjær^{1,c} og Peter Gravesen^{3,d}

¹Forskningscenter Risø, Afdelingen for Nuklear Sikkerhedsforskning, Bygn. NUK-125, DK-4000 Roskilde. Tlf. 4677 4677. Fax 4677 4959. Internet: www.risoe.dk/nuk

²Statens Institut for Strålehygiejne, Knapholm 7, 2730 Herlev, Tlf. 4454 3454. Fax 4454 3450. Internet: www.sis.dk

³GEUS, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Thoravej 8, DK-2400 København NV. Tlf. 3814 2000. Fax 3814 2050. Internet: www.geus.dk

Elektroniske postadresser:

^aclaus.andersen@risoe.dk, ^bkaare.ulbak@sis.dk,

^ca.damkjaer@risoe.dk og ^dpg@geus.dk.

ISBN 87-90951-70-0 (papirudgave)

ISBN 87-90951-71-9 (elektronisk udgave)

ISSN 1395-3974

Sundhedsstyrelsen • Statens Institut for Strålehygiejne • Januar 2001

Indhold

1	Indledning	1
1.1	Baggrund	1
1.2	Formål	2
1.3	Organisering af rapporten	2
2	Måleprogram	3
2.1	Valg af boliger	3
2.2	Radonmålinger	5
2.3	UTM-koordinater	7
2.4	Overfladegeologi	8
2.5	BBR oplysninger	9
2.6	Spørgeskemaundersøgelse	10
3	Enfamiliehuse	10
3.1	Landsværdier	10
3.2	Amtsværdier	13
3.3	Kommuneværdier	15
4	Faktoranalyse (enfamiliehuse)	20
4.1	Amt	22
4.2	Landsdel	23
4.3	Jordart	24
4.4	Jordart (beboeroplysning)	31
4.5	Grundvand	31
4.6	Kælderforhold	33
4.7	Byggemateriale	37
4.8	Byggemateriale (beboeroplysninger)	37
4.9	Tagkonstruktion	38
4.10	Bebygget areal	39
4.11	Boligareal	40
4.12	Antal etager	40
4.13	Antal etager (beboeroplysning)	41
4.14	Etage for dosimeter	41
4.15	Ventilationssystem	42
4.16	Udluftning (soveværelse)	43
4.17	Udluftning (stue)	43
4.18	Hustype	43
4.19	Hustype (beboeroplysninger)	44
4.20	Byggeår	45
4.21	Regressionsmodel	48
5	Flerfamiliehuse	53
5.1	Landsværdier	53
5.2	Faktoranalyse	54
6	Diskussion	60
6.1	Danske radonniveauer	60
6.2	Sammenligning mellem ny og gammel radonundersøgelse	61
6.3	Områder med og uden radonproblemer	65
6.4	Forudsigelser for specifikke huse	66
6.5	Mekanismer	67

6.6	Geologiske forhold	69
6.7	Måletekniske forhold	70
7	Konklusion	73
	Bidrag til undersøgelsens gennemførelse	74
	 Bilag	
A	Sammenfatning	75
B	Summary	78
C	Geologisk redegørelse	87
D	Spørgeskemaer	94
E	Kalibrering og baggrundsbestemmelse	97
F	Beregning af husværdier	100
G	Beregning af repræsentative værdier	102
H	Kommunemodel	104
I	Monte-Carlo beregninger	109
J	Datablade	111
K	Ordliste vedr. radon og statistik	127
	Litteratur	129

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. Meget tyder på, at radon i indendørsluften forøger risikoen for lungekræft. Derfor er der både i Danmark og udlandet udført undersøgelser for at kortlægge problemets omfang. I denne rapport præsenteres resultaterne af radonmålinger i mere end 3000 danske boliger. Hovedresultatet er et kort over Danmark, som viser forekomsten af huse med høje radonniveauer i de enkelte kommuner.

1.1 Baggrund

Statens Institut for Strålehygiejne og Forskningscenter Risø offentliggjorde i 1987 resultaterne af en landsomfattende repræsentativ undersøgelse af naturlig stråling i danske boliger [St87a, U88]. Undersøgelsen omfattede målinger i 498 boliger. Radonkoncentrationerne lå i intervallet fra 5 til 600 Bq/m³ med en gennemsnitsværdi omkring 50 Bq/m³ (ordlisten bag i rapporten redegør nærmere for enheden Bq/m³). En risikoanalyse gav som resultat, at radon i danske boliger formodes at forårsage omkring 300 ekstra lungekræfttilfælde pr. år [St87b]. Det svarer til en livstidsrisiko på 0.4 %. Radon formodes næst efter rygning at være den vigtigste årsag til lungekræft.

Danske krav og anbefalinger

Efter gennemførelsen af den landsdækkende undersøgelse udgav Byggestyrelsen under Boligministeriet i 1987–88 to pjecer: *Radon i boliger* [B87] og *Vejledning om radon og nybyggeri* [B88], der bl.a. sigtede mod at hindre indtrængning af radon i nye boliger. Omkring 1995 blev der igangsat en dansk undersøgelse, der havde til formål at afprøve forskellige metoder til at reducere radonkoncentrationen i eksisterende huse. Det var det såkaldte *Radon-95* projekt [A97a]. På grundlag af resultaterne herfra udgav Bygge- og Boligstyrelsen pjecen: *Radon i enfamiliehuse* [B97]. I 1998 blev følgende krav indført i bygningsreglementet for småhuse [Bo98]:

Bygningskonstruktioner mod undergrunden skal udføres lufttætte.

Samtidig blev det anbefalet [Bo98]:

[...] at der iværksættes enkle og billige forbedringer, når radonindholdet [i eksisterende boliger] er mellem 200 og 400 Bq/m³, og at der iværksættes mere effektive forbedringer, når radonindholdet overstiger 400 Bq/m³. For nybyggeri anbefales det, at radonindholdet ikke overstiger 200 Bq/m³.

Bygningsmyndighederne nævner, at det er muligt at måle radon, men der foreligger ingen klar anbefaling til husejere om, at dette bør gøres [B87, B97].

Behov for ny undersøgelse

Risikovurderingen i tilknytning til den landsomfattende undersøgelse fra 1987 var primært baseret på oplysninger om sammenhængen mellem minearbejderes udsættelse for radon og deres risiko for lungekræft. Overførelsen af disse risikofaktorer til radon-eksponering i boliger er naturligvis forbundet med betydelig usikkerhed. På daværende tidspunkt forelå der imidlertid ikke tilsvarende undersøgelser for boligmiljøet. Det gør der nu. Eksempelvis blev der i marts 1993 i Sverige offentliggjort den hidtil største og bedst gennemførte undersøgelse af risikoen i forbindelse med radon i boligmiljøet [Per94]. Denne undersøgelse bekræfter i det væsentlige risikovurderingen baseret på data for minearbejdere og dermed også grundlaget for den danske risikovurdering fra 1987.

På baggrund af den forbedrede viden om sundhedsrisikoen ved radon vurderede Statens Institut for Strålehygiejne og Forskningscenter Risø i 1995, at radon i danske boliger fortsat udgør et væsentligt strålebeskyttelses- og indeklimaproblem. Samtidig blev det vurderet, at der var behov for et forbedret videngrundlag for myndighedernes håndtering af radonproblemet. Dvs. rådgivning og vejledning af befolkning og byggebranche om forhøjede radonniveauer i danske boliger, opfordring til måling m.v.

På denne baggrund udarbejdede Statens Institut for Strålehygiejne og Forskningscenter Risø i maj 1995 en projektbeskrivelse for gennemførelse af en ny landsomfattende radonundersøgelse. Ansøgningen blev sendt til Sundhedsministeriet, som iht. brev af 29. juni 1995 gav tilsagn om økonomisk støtte til undersøgelsen.

Radonundersøgelsen er gennemført som et samarbejde mellem Statens Institut for Strålehygiejne, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (Afdelingen for Kvartær og Marinegeologi) og Forskningscenter Risø (Afdelingen for Nuklear Sikkerhedsforskning). Nærværende rapport er undersøgelsens hovedresultat.

1.2 Formål

Formålet med den nye radonundersøgelse er:

- at bestemme den nuværende repræsentative fordeling af radonkoncentrationer i danske boliger, herunder at bestemme den "høje ende" af fordelingen med betydelig større sikkerhed end den tidligere landsdækkende radonundersøgelse fra 1985–86 [St87a, U88],
- at klarlægge geografiske forskelle i fordelingen af radonkoncentrationen og om muligt sammenholde disse med viden om den lokale geologi, samt
- at undersøge om der er sket ændringer i radonniveauet i danske boliger siden den forrige landsomfattende undersøgelse, f.eks. som følge af bygningsforbedringer, forbedret nybyggeri eller oplysning til befolkningen om radonproblemet.

1.3 Organisering af rapporten

Rapporten er inddelt i en række kapitler, som vist i indholdsfortegnelsen. Først gennemgås forskellige forhold vedr. udvælgelsen af boliger, radonmåleteknik, og supplerende dataindsamling. Dernæst præsenteres resultaterne for enfamiliehuse. Kapitel 3 giver resultaterne på lands-, amts-, og kommuneniveau. Dette er således den del af rapporten, som primært omhandler kortlægning. En statistisk model anvendes til at vurdere antallet af enfamiliehuse med koncentrationer over 200 og 400 Bq/m³ i landets 275 kommuner. I Kapitel 4 sammenkædes radonmålingerne med informationer om en række bygningstekniske og geologiske faktorer. Informationerne er bl.a. tilvejebragt vha. spørgeskemaer, som blev udfyldt af beboerne i forbindelse med radonmålingerne. Desuden indgår der bygningstekniske informationer fra Bygnings- og Boligregistret (BBR) og geologiske informationer fra Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS). I kapitlet gennemgås hver faktor for sig i separate afsnit. Centralt for behandlingen er en såkaldt regressionsmodel. Modellen anvendes til at kvantificere betydningen af de enkelte faktorer for radonkoncentrationen. Kapitel 5 omhandler resultaterne for flerfamiliehuse. I Kapitel 6 uddrages hovedessensen af undersøgelsen, og der foretages en diskussion og perspektivering af resultaterne. Bagerst i rapporten er der placeret en liste over den anvendte litteratur samt en forklaring af diverse fagudtryk med relation til radon og statistik. Rapporten indeholder desuden en række bilag med beregningstekniske detaljer og sammenfatninger på dansk og engelsk. Der er også et bilag, som giver en uddybende forklaring af Danmarks geologi, samt et, der giver de radonmæssige vurderinger for alle landets amter og kommuner.

Sammenfatning

2 Måleprogram

I det følgende redegøres der bl.a. for, hvordan husene i undersøgelsen blev valgt ud og hvordan, der blev målt radon. De vigtigste informationer kan resumeres på følgende måde:

- Der blev målt radon i 3019 enfamiliehuse. For hver dansk kommune foreligger der en tilfældigt udtrukket stikprøve med 3–23 huse.
- Der blev målt radon i 101 flerfamiliehuse. For hvert amt foreligger der en tilfældigt udtrukket stikprøve med 4–11 huse.
- For hver bolig er der kun foretaget én måling (nemlig en måling i stuen). Disse stuemålinger omregnes til såkaldte husværdier under hensyntagen til, at der erfaringsmæssigt er mindre radon i soveværelset end i stuen. Rapporten bygger næsten udelukkende på disse beregnede husværdier.
- For hovedparten af boligerne foregik radonmålingerne fra den 28. november 1995 og et år frem. Målingerne er således årsmiddelværdier.
- Der blev indsamlet supplerende information om huskonstruktion og geologi. Disse oplysninger danner grundlag for undersøgelsen af hvilke faktorer, som har betydning for, om der er meget eller lidt radon i et hus.

Det bemærkes, at der er væsentlige forskelle mellem undersøgelsen fra 1987 [St87a] og nærværende undersøgelse mht. proceduren for udvælgelsen af husene såvel som den anvendte protokol for radonmålingerne. Disse forskelle diskuteres nærmere i Kapitel 6.

2.1 Valg af boliger

Den danske boligmasse

Ifølge boligtællingen 1. januar 1994 [Da95] er der 2.412 mill. egentlige boliger i Danmark. Heraf udgør enfamiliehuse 58.7 % og flerfamiliehuse 41.3 %. Den danske befolkning omfatter 5.20 mill. personer fordelt med 69.0 % i enfamiliehuse og 31.0 % i flerfamiliehuse. Ved enfamiliehuse forstås i undersøgelsen:

- Fritliggende enfamiliehuse, parcelhuse (970 347)
- Række-, kæde- og dobbelthuse (295 721)
- Stuehuse til landbrugsejendomme (146 388)

Tallene i parentes angiver antallet af boliger. Det bemærkes, at stuehuse er medregnet som enfamiliehuse i landkommuner men ikke i bykommuner. Det samlede antal stuehuse angives af Danmarks Statistik til 150 732. Ved flerfamiliehuse forstås i undersøgelsen:

- Etageboliger (943 288)

Udtrækning af boliger

Som det vil fremgå af det følgende, lægges landets 275 kommuner og 15 “amter” til grund for udtrækningen af boliger. De 15 “amter” udgøres af de sædvanlige 14 amter samt et undersøgelsesamt bestående af Københavns og Frederiksbergs kommuner.

Hovedparten af målingerne er foretaget i enfamiliehuse. Dette skyldes, at radonkoncentrationen i flerfamiliehuse normalt er lav og uden stor variation fra bolig til bolig [St87a]. Ud fra undersøgelsens ressourcemæssige begrænsninger blev der sigtet mod at opnå brugbare måleresultater for 2 850 enfamiliehuse og 150 flerfamiliehuse. Erfaringerne fra den

*Københavns og
Frederiksbergs kommuner*

Tabel 1. Antal af udtrukne enfamiliehuse pr. kommune.

Kommuner	Antal udtrukne enfamiliehuse pr. kommune	Total
Allinge-Gudhjem, Hasle, Nexø, Rønne, Aakirkeby, Odense, Århus, Aalborg	33	264
København, Esbjerg	27	54
Horsens, Kolding	22	44
Herning, Silkeborg	20	40
Greve	18	18
Resterende 260 kommuner	17	4420
Sum		4840

første landsdækkende undersøgelse [St87a] viste, at man kan forvente at få brugbare resultater fra ca. 60 % af de adresser, som man i første omgang anmoder om at deltage. Med dette udgangspunkt ville det være nødvendigt, at rette henvendelse til beboerne i omkring 4800 enfamiliehuse og 250 flerfamiliehuse.

Tilfældige adresser

Tabel 1 viser det antal tilfældige adresser for enfamiliehuse, som Bygnings- og Boligregistret (BBR) under Bolig- og Byministeriet blev anmodet om at udtrække. For at sikre en god geografisk fordeling, blev adresserne valgt kommunevis. I hver kommune er der mindst udtrukket 17 tilfældige adresser. I de større kommuner er der udtrukket flere huse. Det samme gælder for kommunerne på Bornholm. Antallet af adresser pr. kommune afspejler således kun delvist antallet af enfamiliehuse i kommunen, og der er på ingen måde proportionalitet mellem antal udtrukne adresser og kommunestørrelse. Dette har betydning ved beregning af repræsentative værdier for landet som helhed og for de enkelte amter.

For flerfamiliehusene blev det besluttet, at der for hvert amt skulle udvælges det samme antal tilfældige adresser af BBR. Dette ville sikre en nogenlunde ens geografisk fordeling af flerfamiliehusene og ville sikre sammenlignelighed med den tidligere undersøgelse. BBR blev således anmodet om at udtrække adresser for 17 tilfældige flerfamiliehuse i hver amt (i alt 255 boliger).

Korrespondance

Den 4. oktober 1995 udsendtes breve til de 5 095 udvalgte adresser med anmodning om deltagelse i den landsomfattende radonundersøgelse. Brevet, der var vedlagt svarseddel og en frankeret svarkuvert, gav en kort beskrivelse af baggrunden for undersøgelsen, og af hvorledes målingen af radonkoncentrationen ville blive foretaget. Da antallet af positive tilbagemeldinger om deltagelse i undersøgelsen i de 2 første uger af oktober var mindre end forventet, blev det besluttet at udsende en ekstra anmodning om deltagelse i undersøgelsen til de adresser, hvorfra man ikke havde fået nogen tilbagemelding. Den 19. oktober 1995 fremsendtes supplerende brev til i alt 2 616 adresser. Det endelige resultat blev, at i alt 3 332 tilkendegav, at de ville deltage i undersøgelsen. Dette svarer til 65 % af de udvalgte adresser.

Den 28. november 1995 blev de 3 332 klargjorte radondosimetre (se afsnit 2.2) taget ud af de radontætte poser og placeret i forsendelsesklare kuverter, som herefter blev afleveret til postvæsenet.

Den 28. november 1996, præcis ét år efter udsendelsen af radondosimetrene, udsendtes følgebrev, spørgeskema og en frankeret returkuvert til de deltagende boliger med anmodning om at udfylde spørgeskemaet og returnere dette sammen med radondosimetret. Spørgeskemaets indhold behandles i afsnit 2.6. I alt blev der returneret 3 129 radondosimetre. Af disse måtte 6 dosimetre frasorteres som ubrugelige, f.eks. som følge af, at dosimetret havde været flyttet til anden adresse under målingen eller lignende.

Brugbare resultater

Samlet blev der opnået brugbare måleresultater for 3 019 enfamiliehuse og 101 flerfamiliehuse. Dette svarer til henholdsvis 62 % og 40 % af de oprindeligt udtrukne adresser fra BBR. Tabel 2 viser andelen af brugbare resultater fordelt på de enkelte amter. Bemærk, at der er væsentlige forskelle fra amt til amt. For enfamiliehuse er andelen af brugbare resultater pr. henvendelse over 70 % i amterne nær København. Dette er den største tilslutning i landet. For Nordjylland, Viborg, og Ringkøbing amter er andelen af brugbare resultater pr. henvendelse kun 55 % eller mindre.

3019 enfamiliehuse
101 flerfamiliehuse

Tabel 2. Oversigt over antallet af beboere, som blev anmodet om at deltage, antallet af udsendte dosimetre, og antallet af brugbare resultater.

Amt	Enfamiliehuse				Flerfamiliehuse			
	Antal henvendelser	Udsendte dosimetre	Brugbare resultater	Brugbare pr. henv. (%)	Antal henvendelser	Udsendte dosimetre	Brugbare resultater	Brugbare pr. henv. (%)
Kbh. og Frb. kom.	44	27	26	59	17	8	8	47
Københavns Amt	306	245	229	75	17	10	9	53
Frederiksborg Amt	323	254	242	75	17	12	10	59
Roskilde Amt	188	141	134	71	17	10	9	53
Vestsjællands Amt	391	263	248	63	17	9	9	53
Storstrøms Amt	408	264	248	61	17	11	11	65
Bornholms Amt	165	108	97	58	17	6	6	35
Fyns Amt	560	367	349	62	17	7	6	35
Sønderjyllands Amt	391	257	239	61	17	5	4	24
Ribe Amt	248	173	164	66	17	7	6	35
Vejle Amt	282	191	181	64	17	7	5	29
Ringkøbing Amt	309	179	164	53	17	4	4	24
Århus Amt	461	301	286	62	17	8	6	35
Viborg Amt	289	167	151	52	17	7	4	24
Nordjyllands Amt	475	286	261	55	17	6	4	24
Hele landet	4 840	3 223	3 019	62	255	117	101	40

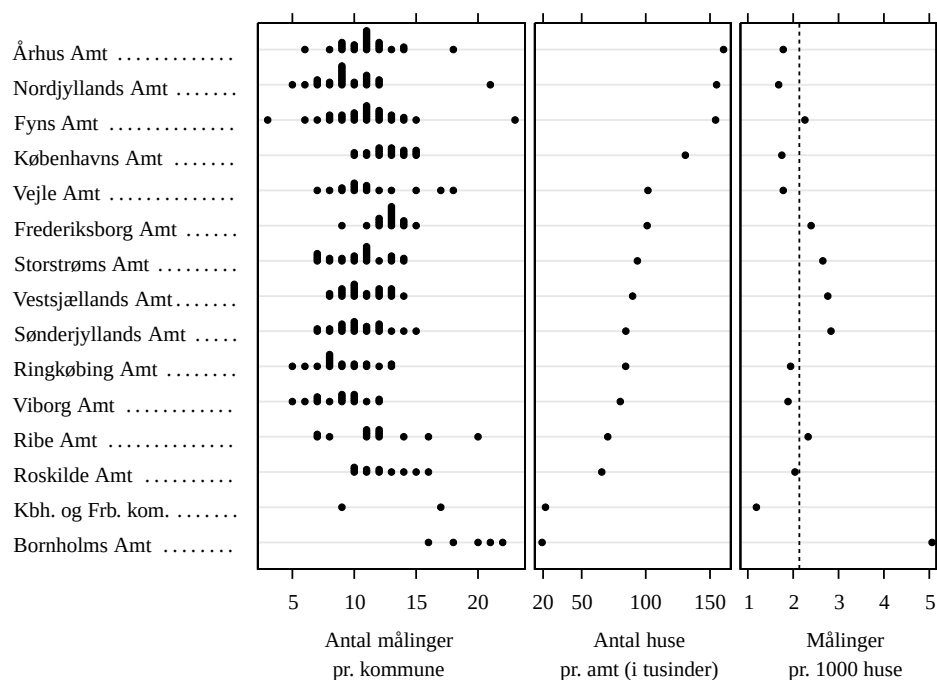
Målingerne er fordelt på kommuner og amter som vist i Figur 1. Det ses, at der er gennemført fra 3 til 23 målinger pr. kommune, og at det typiske antal er omkring 11. Det fremgår desuden, at målehyppigheden i de bornholmske kommuner (som tilsigtet) er større end i resten af landet. I gennemsnit er der på Bornholm foretaget 5 målinger pr. 1000 huse. Dette er mere end dobbelt så mange som landsgennemsnittet på 2.1 målinger pr. 1000 huse. Dårligst repræsenteret i undersøgelsen er Københavns og Frederiksbergs kommuner, hvor der kun er foretaget lidt mere end en måling pr. 1000 huse.

2.2 Radonmålinger

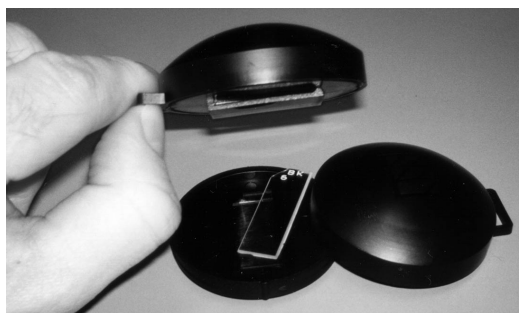
Det radioaktive henfald af radonisotopen radon-222 og radondøtrene polonium-214 og bly-214 sker under udsendelse af alfapartikler (se Figur K.1 i ordlisten bagerst i rapporten), og målingen af radon er derfor baseret på en måling af alfaradioaktivitet i luften. Målingerne er foretaget med den såkaldte sporfoliemetode. Det benyttede sporfolie er en 1 mm tyk plade af plastmaterialet CR-39 (polyallyl diglykol karbonat) leveret af firmaet TASL, Bristol, England. Alfastrålingen registreres via de strålingsskader, som induceres i foliet når en alfapartikel rammer plastmaterialet. Den energi, der afsættes langs alfapartiklens spor, medfører, at polymerkæder i plastmaterialet brydes. Disse områder er mere kemisk reaktive end omgivelserne, og en efterfølgende ætsning i NaOH opløser derfor fortrinsvis plastmaterialet omkring alfasporene, som derved gøres synlige i mikroskop.

Alfasporene optælles ved hjælp af en computerstyret automatisk billedanalyse, som er i stand til at skelne alfasporene fra urenheder og evt. ridser i sporfoliet. For hvert sporfolie er resultatet af optællingen en sportæthed (antal spor pr. cm²), som efter korrektion for

Sportælling



Figur 1. Fordeling af målinger i enfamiliehuse i kommuner og amter. Til venstre ses antallet af målinger i de enkelte kommuner. Hvert punkt svarer til en kommune. Hvis flere kommuner indenfor et amt har samme antal målinger er punkterne forskudt en anelse opad. Grafen i midten viser antallet af enfamiliehuse i hvert amt. Til højre ses antallet af målinger pr. enfamiliehuse i hvert amt. Den stiplede linie indikerer landsgennemsnittet på 2.1 målinger pr. 1000 huse.



Figur 2. Dosimeter til måling af radonkoncentrationen i en bolig vist i lukket (øverst) og åben tilstand. Det klare plaststykke i midten af billedet er et stykke CR-39 sporfolie. Den sorte plastkapsel har bl.a. til formål at beskytte sporfoliet. Dosimetret anvendes derfor altid i lukket tilstand.

baggrundsbidrag, omsættes til en radoneksponering via en kalibrering af målesystemet.

Selve radondosimetret er vist i Figur 2. Det består af et sporfolie, som er anbragt i en cirkulær plastkapsel, med en diameter på 5.8 cm og en højde på 2 cm. Plastkapslen beskytter sporfoliet, men tillader samtidigt, at radon diffunderer ind i kapslen og påvirker sporfoliet. Hver bolig har med postvæsnet fået tilsendt et radondosimeter, som beboerne er blevet anmodet om at placere i opholdsstuen. Efter måleperiodens ophør er dosimetrene med postvæsnet returneret til Statens Institut for Strålehygiejne (SIS), som har registreret dosimetrene og videresendt dem til Risø, hvor udmålingen af sporfolierne har fundet

sted. De måletekniske detaljer vedr. kalibrering og baggrundsbestemmelse er beskrevet i Bilag E.

Eksponerings tid

Deltagerne i radonundersøgelsen var instruerede om at returnere dosimetrene efter ét års måling, således at målingerne direkte (dvs. uden korrektion) ville give en årsmiddelværdi. Eksponeringsperioden startede den 29. november 1995, og hovedparten af dosimetrene blev modtaget på SIS i løbet af december måned 1996. Flere dosimetre ankom dog først i løbet af januar og februar 1997. Afsnit 6.7 (side 70) omfatter en mere detaljeret redegørelse for fordelingen af eksponeringstider. Efter registreringen hos SIS, blev dosimetrene sendt til Risø, hvor de blev pakket i lufttætte lagerposer indtil ætsningen, der fandt sted i perioden 2. april til 12. juni 1997.

Beregning af husværdier

Fra et strålingsmæssigt synspunkt er det af betydning at kende radonkoncentrationen i alle de rum, hvor husets beboere opholder sig. I praksis er det dog kun nødvendigt at kende radonkoncentrationen i stue og soveværelse, hvor opholdstiden er størst. Fra tidligere undersøgelser vides det, at der normalt forekommer en stærk korrelation mellem radonkoncentrationen i stue og soveværelse: Huse med en høj stueværdi har normalt også en høj værdi i soveværelset etc. [St87a, A97a]. Det betyder dog ikke, at radonkoncentrationen de to steder er ens. Normalt vil værdien i soveværelset faktisk være lidt lavere end i stuen. Dette skyldes forskelle i udluftning i de to rum. Desuden er soveværelset i enfamiliehuse ofte placeret på første sal, mens stuen ofte er placeret i husets grundplan.

I denne undersøgelse antages det, at forholdet mellem koncentrationen i stuen og i huset som helhed følger samme mønster, som i den tidligere landsdækkende undersøgelse fra 1987 [St87a]. På den baggrund er der lavet en korrektionsformel, som kan omsætte en stuemåling til en vurderet husværdi. Som eksempel kan det nævnes, at en stuemåling på 400 Bq/m³ omsættes til en husværdi på 315 Bq/m³. For lave koncentrationer er korrektionen mindre. Med mindre andet udtrykkeligt fremgår, omhandler alt i rapporten disse vurderede husværdier. Omsætningsproceduren er beskrevet i Bilag F. Heraf fremgår det også, at omsætningen er forbundet med betydelig usikkerhed.

Korrektionsformel

2.3 UTM-koordinater

Geografisk stedfastelse af de deltagende boliger giver mulighed for, at GEUS kan karakterisere de geologiske forhold under de undersøgte boliger, og er tillige et værdifuldt hjælpemiddel til geografisk præsentation af undersøgelsens resultater. På tidspunktet for målingernes gennemførelse i 1996 var der ikke umiddelbart adgang til geografiske koordinater for adresserne i de offentlig registre, f.eks. BBR. Kort & Matrikelstyrelsen (KMS) havde på samme tidspunkt gennemført et par pilotprojekter som led i en overordnet plan om at etablere en landsdækkende samling af geografisk stedfæstede adresser. KMS tilbød på denne baggrund at indgå i den landsomfattende radonundersøgelse og benytte denne som et pilotprojekt på sundhedsområdet for fremskaffelse og brug af geografisk stedfæstede koordinater.

For de udvalgte boliger modtog KMS på digital form administrative oplysninger fra BBR: amtsnummer, kommunenummer, ejendomsnr., bygningsnr., vejkode, husnr., postnummer, vejnavn, og postdistrikt. Som udgangspunkt blev det besluttet, at en nøjagtighed på ±10–20 meter svarende til KMS' 4 cm-kort (målestok 1:25 000) ville være tilstrækkeligt.

De fleste boliger kunne KMS med dette udgangspunkt stedfæste på basis af BBR-adressen og et teknisk digitalt kort, idet der bl.a. blev indhentet adressekoordinater fra eksisterende, delvis komplette regionale databaser fra Naturgas Midt-Nord, Naturgas Syd

Tabel 3. Fordeling af stedfæstede boligadresser på datakilder. Det bemærkes, at kun $3019 + 101 = 3120$ boliger indgår i undersøgelsen.

Datakilde	Antal boliger
Teknisk kortdatabase	2524
Digitale matrikelkort [§]	306
Digitaliseret ud fra oplysninger fra kommunen	493
Sum	3323

[§]Ophængningspunkt for matrikelnr. < 900 m²

og Grundkort Fyn. Øst for Storebælt blev en række adresser (primært på villaboliger) stedfæstet ved hjælp af KMS's digitale matrikelkort, som på undersøgelsestidspunktet dækkede omkring halvdelen af landets kommuner.

For de resterende boliger blev de tekniske forvaltninger i den enkelte kommune anmodet om hjælp til at udpege disse med et kryds på et egnet kort, hvorefter KMS fandt frem til de geografiske koordinater på et digitalt 4 cm-kort. I alt måtte KMS på denne måde involvere omkring halvdelen af landets kommuner.

Den endelige resultat af den geografiske stedfæstelse af de deltagende boliger blev, at det for samtlige boliger lykkedes KMS at tildele disse UTM-koordinater på basis af de "bedste" datakilder. En fordeling på disse datakilder er vist i Tabel 3.

2.4 Overfladegeologi

De geologiske forhold indenfor de øverste 5–10 m af jordlagene kendes fra geologiske kort, profiler og udgravninger og borer samt stedvis ud fra geofysiske opmålinger. Sammensætningen af jordarterne indenfor den øverste meter er baseret på Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelses (GEUS) systematiske kvartærgeologiske kortlægning. Bilag C indeholder en nærmere redegørelse for dette grundlag.

Fremstilling af de geologiske data

Til den indledende karakterisering af de geologiske forhold under de undersøgte huse har arbejdsgangen været følgende: Der blev modtaget disketter fra SIS med oplysninger om 3323 boligers beliggenhed bl.a. identificeret ved et nummer og UTM-koordinater.

Data fra disketterne blev indlæst i en Excel-fil samt indlagt som søgeparameter i den digitale jordartsdatabase, hvor der er data på 328 kort i 1:25 000 ud af de 405, som dækker hele landet. Hvert af disse kort er blevet brugt i en geografisk "overlay"-operation (GIS-operation), der finder jordarten til de boliger, som bliver målt ved undersøgelsen. I alt 2732 af de 3323 boliger (82 %) er fundet på denne måde. Dog er der en del boliger, hvor den jordartspolygon de rammer, har fået tildelt koden X (ukendt) eller BY. Hvis der ses bort fra disse, er der 2498 (75 %) tilbage.

Derefter er anvendt den digitale udgave af jordartskortet i 1:200 000. Den samme operation er kørt på dette kort, hvorved 1898 målinger (57 %) blev matchet med en jordart. Som det fremgår af tallene, er nogle boliger fundet i begge operationer. I disse tilfælde er det den geologiske kode, som er fundet på kortet i 1:25 000, som er den endelige kode. Et udtryk for pålideligheden af data fra kortet i 1:200 000 er, at der blandt de 1344 boliger, som fandtes i begge operationer, var 1118 (83 %), der havde samme jordart og 226 (17 %), der ikke fik. Dette skyldes, at kortet i 1:200 000 er en kraftig forenkling af kortene i 1:25 000.

Resultatet af den automatiske søgning i de to kortdatabaser blev, at 2498 geologiske koder/bogstavssymboler blev fundet fra kortene i 1:25 000 og 553 koder blev fundet fra kortet i 1:200 000. Disse data blev automatisk overført til den oprindelige Excel-fil. Der

var således 272 boliger tilbage som ikke have fået tildelt geologisk kode, heraf alene de 102 på Bornholm.

For at karakterisere de sidste lokaliteter blev der fremstillet tre kort i 1:200 000 visende boligplacering, kystlinie og byomrids for landet (excl. Bornholm) og et kort med samme indhold i 1:50 000 over Bornholm. Herefter er kortene sammenholdt manuelt med de eksisterende geologiske kort (både trykte og forlæg til kort fra GEUS arkiver), og de geologiske koder er blevet bestemt. Derefter er de fundne koder indtastet manuelt i Excel-filen.

Klassifikation af jordarter

Den geologiske beskrivelse af prøver fra kortlægningen indeholder oplysninger om sammensætning, dannelse og alder samt et klassifikationssystem og kodesystem baseret på disse data. De geologiske koder består af to bogstavsymboler (f.eks. FT), hvor det første bogstav viser jordartens alder og dannelse (F: Postglacial, ferskvand), mens det andet bogstav viser jordartstypen (T: tørv). En fortegnelse over koderne findes i Tabel 8, side 25. I langt de fleste tilfælde er den geologiske kode ved boligen bestemt entydigt (en kode med to bogstaver). Det kan dog ske, at der for en lokalitet er to koder, eller at det ved den manuelle bestemmelse har været vanskeligt at fastsætte koden. Er der flere alternativer, er der valgt én kode. Det er også tilfældet, hvor der kun er et enkelt bogstav, som viser jordartstypen (S: sand), og her er der sket en tolkning af alder og dannelse. En undtagelse herfra er de tilfælde, hvor underlaget er byfyld. Her anvendes symbolet O.

Geologiske koder

Geologisk klassifikation af kommunerne

Til brug for modellen i afsnit 3.3 er det nødvendigt at kende forekomsten af *sand-og-grus* og *ler* på kommuneniveau. Forekomsten udtrykkes som den procentdel af en kommunes areal, som domineres af "sand og grus". Vurderingen blev udført visuelt uden hensyn til arealernes anvendelse (bebygningsgrad). Til "sand-og-grus"-gruppen blev henført alle jordarter i Tabel 8, side 25 med S og G som sidste bogstav i bogstavkoderne. Til lergruppen blev henført alle jordarter med L som sidste bogstav i bogstavkoderne, samt gytje (P), tørv (T) og vekslende lag (V). For hele landet er den skønsmæssige fordeling 43 % ler og 56 % sand-og-grus. Dertil kommer 1 % andet, som dækker de specielle bornholmske forhold.

2.5 BBR oplysninger

Udtrækket fra Bygnings- og Boligregisteret omfattede følgende byggetekniske oplysninger (BBR's identifikationskoder angives i parentes):

1. Bygningens anvendelse (nr. 203)
2. Opførelsesår (nr. 207)
3. Ydervæggens materiale (nr. 211)
4. Tagdækningsmateriale (nr. 212, kun for enfamiliehuse)
5. Boligareal (nr. 217, kun for enfamiliehuse)
6. Bebygget areal (nr. 219, kun for enfamiliehuse)
7. Antal etager (nr. 220, kun for enfamiliehuse). Antallet angives incl. selve stueetagen og eventuel mansardetage, men excl. tagetage og kælder.
8. Kælderareal (nr. 223, kun for enfamiliehuse)
9. Varmeinstallation (nr. 229, kun for enfamiliehuse)
10. Opvarmningsmiddel (nr. 230, kun for enfamiliehuse)

2.6 Spørgeskemaundersøgelse

I forbindelse med hjemkaldelsen af radondosimetrene (se side 4) blev beboerne bedt om at udfylde et skema med spørgsmål om dosimeterplacering, byggemateriale o.lign. Der blev anvendt særskilte skemaer for hhv. en- og flerfamiliehuse. Disse er gengivet i Bilag D.

3 Enfamiliehuse

Resultaterne for de 3019 radonmålinger i danske enfamiliehuse gennemgås i det følgende. Kapitlet er inddelt i tre afsnit svarende til landsværdier, amtsværdier, og kommuneværdier. Centralt for behandlingen er bestemmelsen af andelen af huse med radonkoncentrationer over 200 Bq/m^3 (de såkaldte f_{200} -værdier). På lands- og amtsniveau foreligger der så mange målinger, at bestemmelsen umiddelbart kan foretages. På kommuneniveau er der imidlertid typisk kun 10 målinger til rådighed, så der må en statistisk model anvendes. Et af rapportens hovedresultater er fremstillingen af kommunekortet for f_{200} -værdierne. En del beregningstekniske detaljer vedr. repræsentative statistikker, husværdier, kommunemodellen og usikkerhedsberegning er henlagt til bilagene bagerst i rapporten.

3.1 Landsværdier

Stueværdier

Vægtede og uvægtede værdier

Hver af undersøgelsens målinger giver direkte den årsmidlede radonkoncentration i husets stue. Resultaterne for disse stuemålinger er sammenfattet i de to første talrækker i Tabel 4. Den første række angiver de uvægtede resultater. I dette tilfælde er de 3019 resultater behandlet som én samlet gruppe. Eksempelvis er den aritmetiske middelværdi på 93.8 Bq/m^3 beregnet som summen af alle målinger divideret med 3019. Række to angiver de vægtede stueværdier. Her er der taget hensyn til, at stikprøvestørrelsen i de enkelte kommuner ikke er proportional med antallet af enfamiliehuse (se side 4). Disse resultater er således repræsentative for danske enfamiliehuse. De beregningstekniske detaljer findes i Bilag G. Det ses af tabellen, at der trods alt forekommer relativt små forskelle mellem uvægtede og vægtede værdier. Eksempelvis er forskellen mellem hhv. uvægtet og vægtet aritmetiske middelværdi for stueradonkoncentrationen mindre end 5 Bq/m^3 . Den lille forskel skyldes, at udvælgelsen af husene ikke i sig selv er langt fra at være repræsentativ (jf. Figur 1). Desuden spiller det en rolle, at forskellen mellem radonniveauerne i de forskellige dele af Danmark er begrænset.

Husværdier

Der er foretaget beregninger af såkaldte husværdier på baggrund af stuemålingerne. Som omtalt side 7 beror beregningerne på den erfaring, at der normalt er mindre radon i soveværelset end i stuen. Som det fremgår af Tabel 4, er husværdierne for radonkoncentrationen således en del lavere end de rå stuemålinger. Eksempelvis er den geometriske middelværdi for husværdierne lig 57.5 Bq/m^3 , hvilket er omkring 9 % lavere end den tilsvarende stueværdi.

Som anført i den fjerde talrække i Tabel 4 er andelen af huse med værdier over 200 Bq/m^3 lig 4.6 % og det forventes, at der er omkring 65 000 huse med husværdier over 200 Bq/m^3 . Andelen af huse med husværdier over 400 Bq/m^3 anslås til at være 0.38 % (ca. 5300 huse). Den højeste radonkoncentration (husværdi), som blev målt i undersøgelsen, er 590 Bq/m^3 .

Det skal understreges, at alt det følgende (med mindre andet udtrykkeligt fremgår) bygger på husværdier.

Tabel 4. Landsresultater for danske enfamiliehuse. De uvægtede (rå) resultater tager ikke hensyn til at antallet af målinger i de enkelte kommune ikke afspejler kommunestørrelsen. Det gør de vægtede værdier derimod. Disse er således repræsentative for Danmarks samlede bestand af enfamiliehuse. Tallene i kantede parenteser angiver estimerede 68 % konfidensintervaller.

	AM	ASD	GM	GSD	f_{200}	f_{400}	Min	Max
Stueværdier, uvægtede	93.8 [91.6 – 94.4]	83.6 [79.1 – 85.5]	66.9 [65.8 – 67.7]	2.36 [2.33 – 2.40]	9.0 [8.5 – 9.5]	1.19 [1.02 – 1.39]	2	790
Stueværdier, vægtede	89.5 [87.5 – 90.9]	83.2 [78.0 – 84.9]	63.6 [63.2 – 65.5]	2.44 [2.37 – 2.46]	8.4 [7.9 – 9.0]	0.88 [0.69 – 1.08]	2	790
Husværdier, uvægtede	80.8 [79.0 – 81.3]	65.5 [62.3 – 66.6]	60.5 [59.6 – 61.2]	2.21 [2.18 – 2.24]	4.9 [4.5 – 5.3]	0.50 [0.39 – 0.59]	2	590
Husværdier, vægtede	77.3 [75.9 – 78.5]	65.4 [61.6 – 66.4]	57.7 [57.4 – 59.3]	2.28 [2.22 – 2.30]	4.6 [4.2 – 5.1]	0.38 [0.27 – 0.48]	2	590
AM : Aritmetisk middelværdi, Bq/m ³ ASD : Aritmetisk standardafvigelse, Bq/m ³ GM : Geometrisk middelværdi, Bq/m ³ GSD : Geometrisk standardafvigelse								
			f_{200} : Observeret %-del med værdier > 200 Bq/m ³ f_{400} : Observeret %-del med værdier > 400 Bq/m ³ Min : Minimumsværdi, Bq/m ³ Max : Maksimumsværdi, Bq/m ³					

Fordelingsfunktioner

Fordelingen af de 3019 husværdier er vist i Figur 3. Ved at vægte målingerne i de enkelte kommuner kan den repræsentative fordeling for danske enfamiliehuse beregnes. Resultatet er vist i Figur 4.

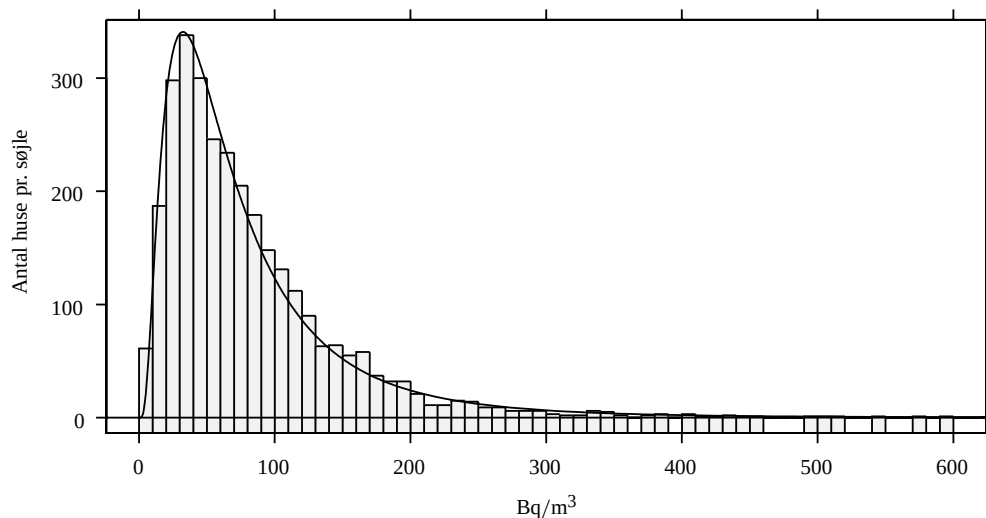
I tråd med tidligere undersøgelser [St87a, A97b] er det nærliggende at beskrive målingerne som logaritmiske normalfordelinger med geometriske middelværdier og standardafvigelser som anført i Tabel 4. Sådanne fordelingsfunktioner er overlejret histogrammerne i Figur 3 og 4. En formel undersøgelse viser dog, at lognormalitet kan afvises: En Lilliefors test [L67, S95] af lognormalitet for den uvægtede fordeling af husværdier kan statistisk afvises ($P \leq 0.01$). Selvom målingerne således ikke perfekt lader sig beskrive ved en logaritmisk normalfordeling, er dette dog en væsentlig bedre tilnærmelse end mange andre fordelingsfunktioner. Bilag H indeholder yderligere detaljer angående disse forhold.

Lognormaliteten har en række konsekvenser. For det første er det normalt mere retvisende at angive et områdets geometriske middelværdi og standardafvigelse (GM og GSD) fremfor de tilsvarende aritmetiske værdier (AM og ASD). Dette beror på, at de geometriske værdier er mere robuste overfor ekstreme radonkoncentrationer. En anden konsekvens vedrører statistiske tests, såsom variansanalyserne i Kapitel 4, idet disse forudsætter normalitet. Sådanne tests gennemføres derfor for logaritmen til radonkoncentrationen.

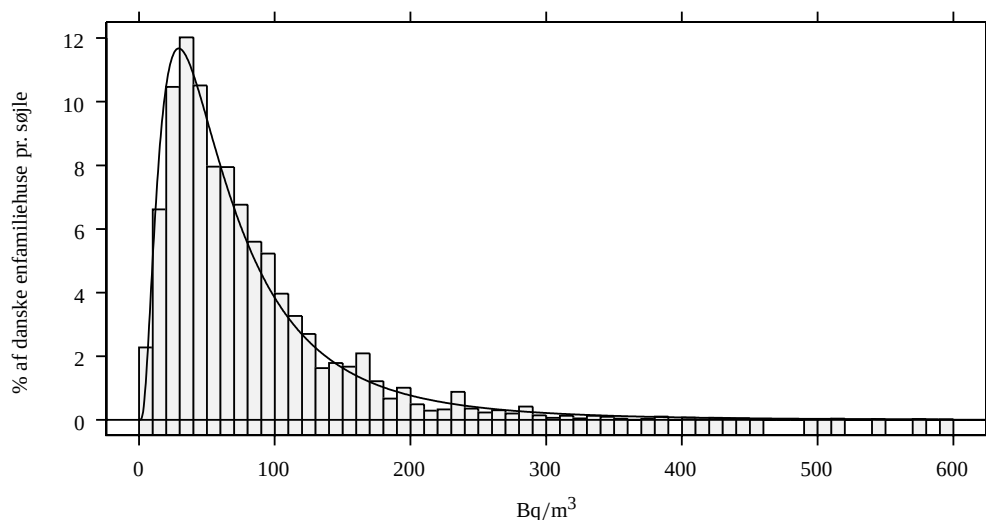
*Log-normalfordeling
(se ordlisten)*

Geografisk fordeling

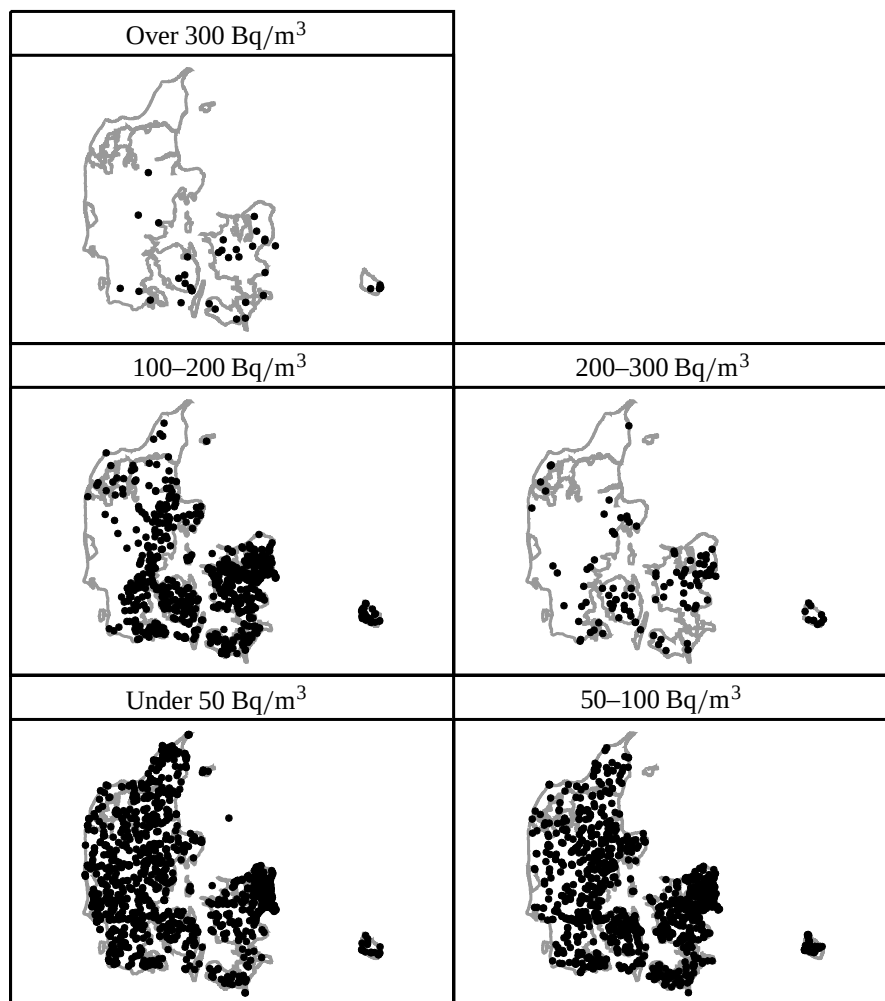
Figur 5 viser, hvorledes målingerne fordeler sig i landet, idet hvert punkt svarer til en husmåling. Det ses, at huse med koncentrationer under 50 Bq/m³ kan findes overalt. Figuren viser dog ikke, om andelen af huse varierer fra område til område. Huse med højere koncentrationer (f.eks. højere end 100 Bq/m³) forekommer ikke tilsvarende over hele landet. Eksempelvis findes huse med niveauer over 100 Bq/m³ primært i det østlige Jylland og på Øerne. Denne sammenhæng mellem geografi og radon viser, at det giver mening at forsøge at kortlægge radon.



Figur 3. Fordeling af radonkoncentrationer i undersøgelsens 3019 enfamiliehuse (husværdier uden vægtning). For at synliggøre at der også forekommer enkelte målinger i den høje ende af fordelingen, er hver søjle med målinger forsat under nullinien. Kurven på figuren angiver en logaritmisk normalfordeling med geometrisk middelværdi 60.5 Bq/m^3 og geometrisk standardafvigelse 2.21.



Figur 4. Repræsentativ fordeling af radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse. For at synliggøre at der også er bidrag i den høje ende af fordelingen, er hver søjle med målinger forsat under nullinien. Den søjle, som dækker intervallet fra 30 til 40 Bq/m^3 , indeholder omkring 12 % af alle 1.4 mill. enfamiliehuse (dvs. omkring 168 000 huse). Kurven på figuren angiver en logaritmisk normalfordeling med geometrisk middelværdi 57.7 Bq/m^3 og geometrisk standardafvigelse 2.28.



Figur 5. Fordeling af de målte radonkoncentrationer (husværdier). Plottet nederst til venstre angiver placeringen af de huse, hvor der blev målt værdier under 50 Bq/m³. Plottet ved siden af viser de huse, hvor der blev målt værdier mellem 50 og 100 Bq/m³ etc..

3.2 Amtsværdier

De repræsentative resultater for amterne fremgår af Tabel 5. For på en enkelt måde at forklare tabellen betragtes først resultaterne for Storstrøms Amt.

I Storstrøms Amt er der i alt omkring 93 000 enfamiliehuse. Heraf er der foretaget målinger i 248 huse. Målingerne er fordelt på 24 kommuner. Dette fremgår ikke af tabellen, men det kan anes på Figur 1. De repræsentative værdier for aritmetisk middelværdi og standardafvigelse mv. er beregnet som anført i Bilag G. Af tabellens f_{200} -kolonne fremgår det, at 5.9 % af husene i amtet ligger over 200 Bq/m³. Ved simpel forholdsregning svarer det til, at der i amtet findes omkring 5500 huse med værdier over 200 Bq/m³. Dette fremgår af kolonnen benævnt N_{200} . De bagvedliggende data viser, at der konkret blev fundet 15 huse i amtet med værdier over 200 Bq/m³. I amtet blev der desuden fundet et enkelt hus over 400 Bq/m³. Det svarer til, at den repræsentative andel af huse over 400 Bq/m³ er omkring 0.4 % (eller omkring 380 huse, jf. kolonnen N_{400}). Usikkerheden ved bestemmelsen af antallet af huse over hhv. 200 og 400 Bq/m³ er anført i tabellen som 68 % konfidensintervaller. For N_{200} forventes det, at den sande værdi ligger i intervallet fra 3700 til 7300 huse. For N_{400} går intervallet fra 0 til 1100 huse. Den primære årsag til usikkerheden er, at stikprøven på 248 huse er ganske lille. Usikkerheden er beregnet vha. en Monte-Carlo teknik (se Bilag I).

Storstrøms Amt som eksempel

Tabel 5. Repræsentative resultater for radon i enfamiliehusene i landets amter. Resultaterne er sorteret efter kolonnen N_{200} (det totale antal af huse, som anslås at have et radonniveau over 200 Bq/m³). Tallene i kantede parenteser angiver 68 % konfidensintervaller.

Amtsnavn	N_{tot}	N	AM	ASD	GM	GSD	f_{200}	f_{400}	N_{200}	N_{400}
Ribe Amt	70362	164	41	29	34	1.9	0.9	0	620 [70 – 1100]	0
Nordjyllands Amt	155161	261	49	38	38	2.2	0.6	0	1000 [0 – 2800]	0
Ringkøbing Amt	84342	164	49	37	40	2.0	1.2	0	1000 [100 – 1900]	0
Københavns og Frederiksb. kom.	21846	26	67	68	45	2.6	5.5	0	1200 [680 – 1900]	0
Frederiksborg Amt	101004	242	72	57	55	2.2	2.5	0.2	2500 [1400 – 3600]	150 [0 – 400]
Viborg Amt	80095	151	73	64	57	2.1	3.5	0.5	2800 [1400 – 4200]	370 [200 – 600]
Bornholms Amt	19166	97	123	108	89	2.3	16.5	4.0	3200 [2500 – 3800]	770 [500 – 1000]
Roskilde Amt	65682	134	91	65	70	2.2	6.1	0	4000 [2500 – 5500]	0 [0 – 700]
Sønderjyllands Amt	84363	239	88	70	66	2.3	5.4	0.7	4600 [3300 – 5800]	620 [300 – 900]
Vejle Amt	101566	181	82	62	64	2.1	5.1	0.4	5200 [3300 – 7000]	430 [100 – 1000]
Storstrøms Amt	93456	248	101	72	82	2.0	5.9	0.4	5500 [3700 – 7300]	380 [0 – 1100]
Vestsjællands Amt	89740	248	103	77	82	2.1	7.0	1.4	6300 [4600 – 7900]	1200 [700 – 1700]
Københavns Amt	130845	229	75	65	54	2.4	5.4	0	7100 [5200 – 8900]	0 [0 – 800]
Århus Amt	160483	286	81	58	64	2.1	5.1	0	8200 [4800 – 12000]	0 [0 – 800]
Fyns Amt	154345	349	95	78	70	2.4	8.1	0.9	12500 [10000 – 15000]	1400 [800 – 2000]
Danmark	1412456	3019	77.3	65.4	57.5	2.28	4.6	0.38	65500 [59000 – 72000]	5300 [3800 – 6800]

N_{tot} : Antal enfamiliehuse (i alt)	f_{200} : Observeret %-del med værdier > 200 Bq/m ³
N : Antallet af måleværdier	f_{400} : Observeret %-del med værdier > 400 Bq/m ³
AM : Aritmetisk middelværdi, Bq/m ³	N_{200} : Anslået antal huse med værdier > 200 Bq/m ³
ASD : Aritmetisk standardafvigelse, Bq/m ³	N_{400} : Anslået antal huse med værdier > 400 Bq/m ³
GM : Geometrisk middelværdi, Bq/m ³	
GSD : Geometrisk standardafvigelse	

N_{200} Tabel 5 viser, at Fyns Amt er det amt, som har flest huse over 200 Bq/m³. I alt vurderes det, at der findes omkring 12 500 sådanne huse. Ribe Amt befinder sig i den anden ende af skalaen. Her findes der kun omkring 600 huse over 200 Bq/m³. Det skal understreges, at disse tal ikke kun afspejler forskelle i radonniveauer, idet det naturligtvis også har betydning, at det totale antal af enfamiliehuse varierer fra amt til amt. Eksempelvis ligger Fyns Amt i toppen pga. kombinationen mellem et stort antal enfamiliehuse og et højt radonniveau.

f_{200} Ved at betragte kolonnen benævnt f_{200} ses det, at 16.5 % af husene i Bornholms Amt ligger over 200 Bq/m³. Det er den højste værdi for amterne. Det amt med den laveste andel over 200 Bq/m³ er Nordjyllands Amt. Der er værdien kun 0.6 %. Afsnit 4.1 indeholder yderligere oplysninger om de radonmæssige forskelle fra amt til amt.

3.3 Kommuneværdier

For Danmark som helhed gælder det, at omkring 4.6 % af alle huse, har radonniveauer over 200 Bq/m³. For den typiske kommune med 10 husmålinger (se Figur 1) svarer dette således til mindre end et halvt hus pr. stikprøve. Hvis alle kommuner var som landsgennemsnittet, ville man således forvente, at der ikke blev fundet huse med værdier over 200 Bq/m³ i den ene halvdel af kommunerne (dvs. at man ville foretage observationen f_{200} lig nul), mens man i den anden halvdel ville observere et eller flere huse over 200 Bq/m³ (svarende til observationen f_{200} lig 10 %, 20 %, 30 % etc.). I ingen tilfælde ville man blot tilnærmelsesvis ramme det rigtige resultat på 4.6 %. Når stikprøvestørrelsen kun er omkring 10 huse pr. kommune, er der derfor behov for en statistisk model, hvis man vil vurdere andelen af huse over 200 eller 400 Bq/m³.

Model til bestemmelse af andelen af huse over 200 og 400 Bq/m³

Den metode, som her benyttes, er beskrevet i detaljer i Bilag H. Hovedtrækkene kan resumeres som følger:

- Først indføres en transformeret radonkoncentration $x = \log(c + 8 \text{ Bq/m}^3)$, hvor c er radonkoncentrationen i huset.
- Det antages, at indenfor hver enkelt kommune k følger x en normalfordeling $N(\mu_k, \sigma_k)$ med fordelingsparametre μ_k (middelværdi) og σ_k (standardafvigelse).
- I modellen tillades det, at μ_k kan variere fra kommune til kommune. Derimod kræves det, at σ_k er den samme for alle landets kommuner: $\sigma_k \equiv \sigma$.
- I hver kommune estimeres μ_k som et vægtet gennemsnit af den observerede middelværdi $\bar{x}$ af de transformerede radonkoncentrationer i kommunen og en overordnet middelværdi θ , som beror på målinger alle steder i landet. Vægtningen af de to bidrag afhænger af antallet af målinger i kommunen. Hvis der er mange målinger i kommunen, sættes $\mu_k \approx \bar{x}$. Hvis der derimod er meget få målinger i kommunen, sættes $\mu_k \approx \theta$. Denne procedure er med til at stabilisere modellen. Metoden bygger på bayesiansk statistik. I en kommune med 10 målinger svarer θ -korrektionen til omkring 4 ekstra målinger.
- Værdien af θ antages at være afhængig af, hvor stor en del af overfladearealet i kommunen, der domineres af sand og grus (se side 9). Hvis en kommune er helt domineret af sand og grus, sættes θ til en værdi, der svarer til en radonkoncentration på 39 Bq/m³. I en kommune, som domineres af ler, svarer θ til 89 Bq/m³. På den måde er der en vis geologisk information i θ -korrektionen. Værdierne for θ er ansat på baggrund af en regressionsanalyse.
- På grund af de særlige geologiske forhold anvendes θ -korrektionen ikke på Bornholm.

Modellen har været udsat for en række tests [A99b]. Bl.a. kan det nævnes, at dersom man summerer alle kommuneestimerne for antallet af huse over 200 Bq/m³, da opnås et estimat, der er i overensstemmelse med det resultat, som faktisk blev observeret for Danmark som helhed. Det samme gælder, dersom man foretager den samme test på amtsniveau.

Resultater

Modellen er anvendt til at give vurderinger af andelen af enfamiliehuse med radonkoncentrationer over 200 (f_{200}) og 400 Bq/m³ (f_{400}). Det er bekvemt, at anvende f_{200} -vurderingerne til at klassificere kommunerne. Følgende klassifikation anvendes:

Klasseinddeling

Klasse 0 : 0–0.3 % (særlig lille tæthed af huse med niveauer over 200 Bq/m³)

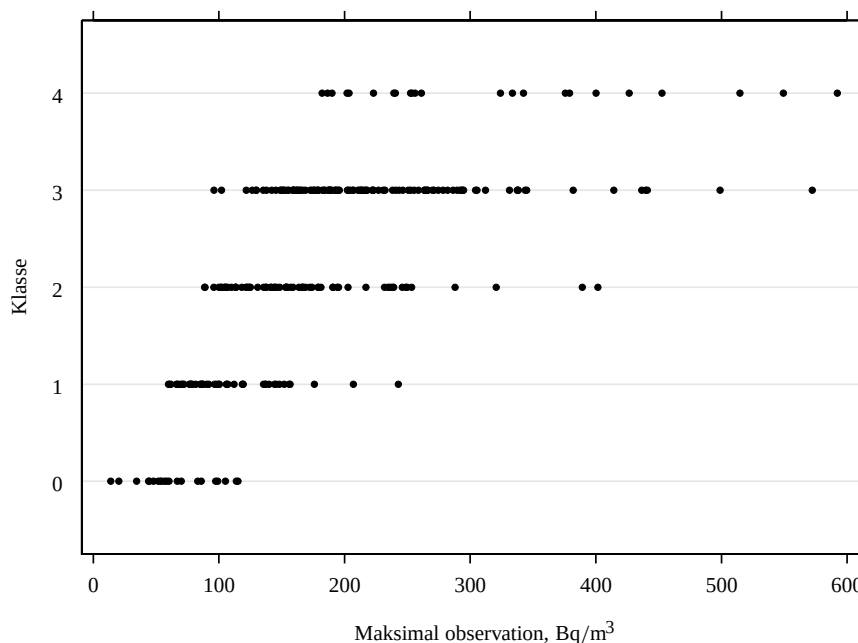
Klasse 1 : 0.3–1 % (lille tæthed af huse med niveauer over 200 Bq/m³)

Klasse 2 : 1–3 %

Klasse 3 : 3–10 %

Klasse 4 : 10–30 % (stor tæthed af huse med niveauer over 200 Bq/m³)

For en “klasse 2”-kommune vurderes det således, at mellem 1 og 3 % af enfamiliehuse har værdier over 200 Bq/m³. De 275 kommuner fordeler sig på de fem klasser på følgende måde: Der er 21 kommuner i klasse 0, 46 i klasse 1, 68 i klasse 2, 116 i klasse 3, og 24 i klasse 4. Hovedparten af kommunerne er således i klasse 3. Det skal understreges, at klassifikationen angiver en vurdering af hvor stor en *andel* af husene i den enkelte kommune, der er over 200 Bq/m³. I princippet forventes det, at der forekommer huse med koncentrationer over 200 Bq/m³ i alle kommuner. Figur 6 viser, at der faktisk blev registreret huse over 200 Bq/m³ i alle klasser på nær klasse 0.

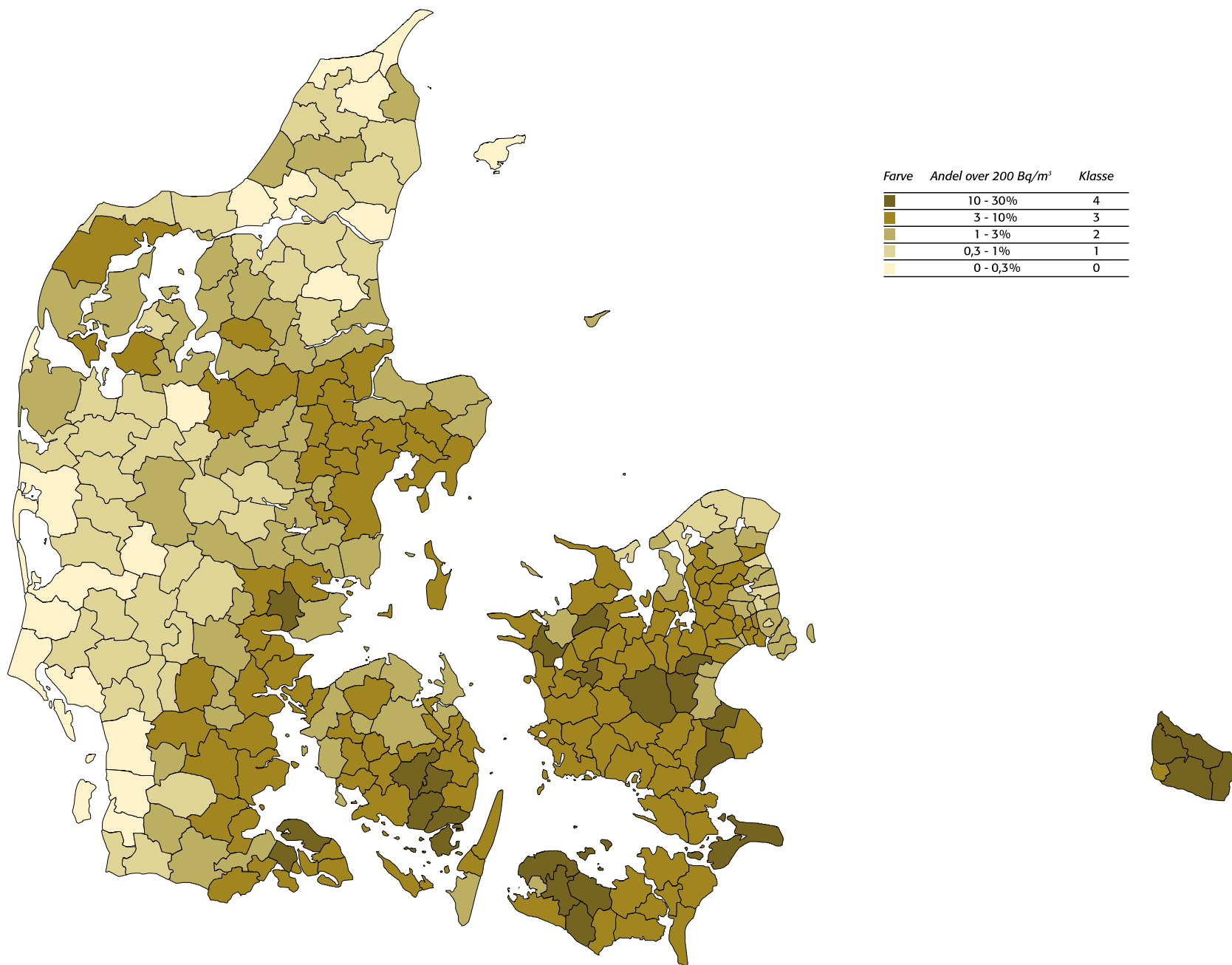


Figur 6. Maksimalværdierne er her vist for alle 275 kommuner inddelt efter klasser. Eksempelvis fremgår det, at hovedparten af “klasse 4”-kommunerne havde maksimalværdier over 200 Bq/m³. Bemærk, at der blev observeret huse over 400 Bq/m³ i både klasse 2, 3 og 4.

Den geografiske fordeling af f_{200} -klasserne er vist i Figur 7. Kortet viser, at store dele af Vest- og Nordjylland er præget af kommuner, hvor huse med værdier over 200 Bq/m³ kun meget sjældent forekommer. I udprægede morænelersområder såsom på Sjælland og Øerne er tætheden af huse over 200 Bq/m³ betydeligt større. Her forekommer mange klasse 3 og 4 kommuner. Det øger tiltroen til kortet, at vurderingerne ikke generelt udviser store spring mellem nabokommuner. Det bemærkes, at modellen ikke “ved” hvilke kommuner, der støder op til hinanden. Kortet understøtter, at der er en væsentlig sammenhæng mellem geologi og radon i danske enfamiliehuse.

Datablade

De detaljerede resultater for alle 275 kommuner fremgår af Bilag J. Databladene er opdelt i amter. Som et eksempel gennemgås resultaterne for kommunerne i Vestsjællands Amt i det følgende. Hovedresultaterne fremgår af Tabel 6.



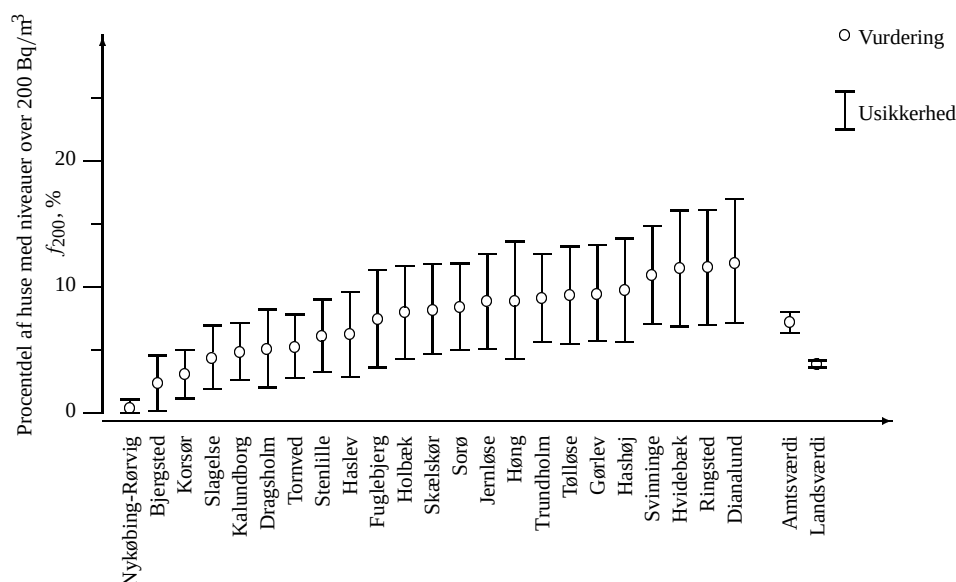
Figur 7. Kort over andelen af huse med radonkoncentrationer over 200 Bq/m³ i de 275 kommuner. Inddelingen svarer til de fem klasser i teksten.

Tabel 6. Resultater for kommunerne i Vestsjællands Amt. Tilsvarende resultater findes i Bilag J for alle amter.

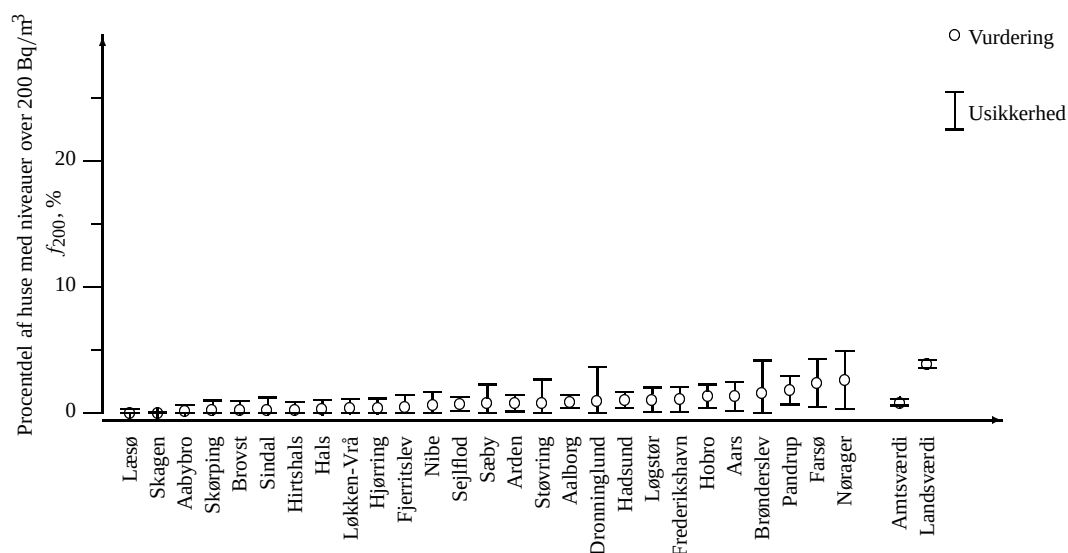
Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	GM Bq/m ³	Max Bq/m ³	f ₂₀₀ %	f ₄₀₀ %	f ₂₀₀ %	f ₄₀₀ %			
Nykøbing-Rørvig	2600	75	12	35	80	0.0	0.0	0.4 [0.0, 1.1]	0.01 [0.00, 0.02]			1
Bjergsted	3112	15	9	53	100	0.0	0.0	2.4 [0.2, 4.6]	0.06 [0.00, 0.27]			2
Korsør	5282	40	10	64	240	10.0	0.0	3.1 [1.1, 5.0]	0.10 [0.00, 0.23]			3
Slagelse	7827	10	12	66	170	0.0	0.0	4.4 [1.9, 6.9]	0.18 [0.00, 0.36]			3
Kalundborg	6035	50	12	77	190	0.0	0.0	4.9 [2.6, 7.2]	0.21 [0.07, 0.36]			3
Dragsholm	4891	20	8	76	180	0.0	0.0	5.1 [2.0, 8.2]	0.19 [0.00, 0.46]			3
Tornved	3326	50	10	82	340	10.0	0.0	5.3 [2.8, 7.8]	0.23 [0.07, 0.39]			3
Stenlille	2117	40	9	87	190	0.0	0.0	6.1 [3.2, 9.0]	0.28 [0.08, 0.46]			3
Haslev	4214	10	10	79	130	0.0	0.0	6.3 [2.9, 9.6]	0.30 [0.02, 0.56]			3
Fuglebjerg	2564	10	9	87	160	0.0	0.0	7.5 [3.6, 11]	0.38 [0.05, 0.71]			3
Holbæk	7519	20	10	91	170	0.0	0.0	8.0 [4.3, 12]	0.44 [0.12, 0.75]			3
Skælskør	3893	5	13	86	130	0.0	0.0	8.2 [4.7, 12]	0.49 [0.15, 0.83]			3
Sorø	4262	20	14	87	440	7.1	7.1	8.4 [5.0, 12]	0.52 [0.19, 0.84]			3
Jernløse	2180	20	11	94	200	9.1	0.0	8.9 [5.1, 13]	0.54 [0.19, 0.88]			3
Høng	3194	5	8	90	440	25.0	12.5	8.9 [4.3, 14]	0.49 [0.06, 0.90]			3
Trundholm	4164	40	10	103	270	20.0	0.0	9.1 [5.6, 13]	0.55 [0.25, 0.82]			3
Tølløse	3426	5	13	92	300	15.4	0.0	9.4 [5.5, 13]	0.61 [0.20, 1.01]			3
Gørlev	2461	10	13	92	220	7.7	0.0	9.5 [5.7, 13]	0.62 [0.22, 1.01]			3
Hashøj	2540	10	12	95	250	8.3	0.0	9.7 [5.6, 14]	0.64 [0.21, 1.06]			3
Svinninge	2427	40	11	111	180	0.0	0.0	11.0 [7.1, 15]	0.76 [0.39, 1.12]			4
Hvidebæk	2247	10	10	106	200	10.0	0.0	11.5 [6.9, 16]	0.81 [0.31, 1.28]			4
Ringsted	6801	5	13	101	510	23.1	7.7	11.6 [7.0, 16]	0.86 [0.33, 1.37]			4
Dianalund	2658	15	9	110	320	22.2	0.0	11.9 [7.2, 17]	0.82 [0.33, 1.34]			4
Amtsværdi (vægtet)	89740	-	248	82	510	7.0	1.4	7.2 [6.4, 8.0]	0.42 [0.32, 0.51]			3
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9 [3.6, 4.2]	0.21 [0.18, 0.24]			3
GM : Geometrisk middelværdi, Bq/m ³ f ₂₀₀ : %-del med værdier > 200 Bq/m ³												
Max : Maksimumsværdi, Bq/m ³ f ₄₀₀ : %-del med værdier > 400 Bq/m ³												

Eksempel Først betragtes resultaterne for Nykøbing-Rørvig Kommune. Det ses, at der er 2600 enfamiliehuse i kommunen, og at 75 % af kommunernes overfladeareal vurderes til at være domineret af sand og grus. Det vil sige, at 25 % af arealet vurderes at være domineret af ler. I undersøgelsen blev der foretaget målinger i 12 huse. Den geometriske middelværdi af resultaterne er 35 Bq/m³. Den højeste værdi, som blev målt i kommunen, er 80 Bq/m³. Der er således ikke direkte registreret nogen huse med niveauer over 200 eller 400 Bq/m³. De sidste kolonner i tabellen vedrører modelvurderingerne. Ud fra modellen vurderes det, at 0.4 % af kommunens huse har niveauer over 200 Bq/m³. Modelestimatet er naturligvis behæftet med usikkerhed. Dette er angivet i tabellen ved et 68 %-konfidensinterval. For Nykøbing-Rørvig Kommune går konfidensintervallet for f₂₀₀-estimatet fra 0.0 til 1.1 %. Tilsvarende er andelen af huse over 400 Bq/m³ vurderet. Her er modelestimatet 0.01 %. Den sidste kolonne i tabellen vedrører klasseinddelingen. Nykøbing-Rørvig Kommune er vurderet til at være i klasse 1.

Kommunerne i Tabel 6 er sorteret efter modelvurderingerne af f₂₀₀. Det ses, at Nykøbing-Rørvig Kommune er den kommune i Vestsjællands Amt, der formodes, at have den laveste andel af huse med værdier over 200 Bq/m³. Det fremgår dog af usikkerheden ved vurderingen, at denne placering kunne bero på en tilfældighed. I den høje ende af skalaen i Vestsjællands Amt findes Dianalund Kommune, hvor der blev målt i 9 huse. Gennemsnitsværdien er 110 Bq/m³, og i to huse (svarende til 22.2 %) blev der målt værdier over 200 Bq/m³. Det ses, at modelestimatet for f₂₀₀ er 11.9 %. Usikkerheden ved vurderingen er dog betydelig. 68 %-konfidensintervallet går således fra 7.2 % til 17 %. I bunden af Tabel 6 er tallene angivet på amts- og landsniveau.



Figur 8. Resultater for Vestsjællands Amt.



Figur 9. Resultater for Nordjyllands Amt.

De vurderede f_{200} -værdier for kommunerne i Vestsjællands Amt er vist grafisk i Figur 8. Figuren tydeliggør den betydelige usikkerhed, som er knyttet til estimaterne. Som allerede nævnt er hovedårsagen til usikkerheden, at der typisk kun er foretaget 10 målinger i de enkelte kommuner. Hvis man vil have en større vished for vurderingerne, må man altså foretage yderligere målinger.

f_{200} -værdierne for kommunerne i Vestsjællands Amt ligger i den høje ende af skalaen. Værdierne sættes i perspektiv ved sammenligning med resultaterne for kommunerne i Nordjyllands Amt (se Figur 9), der ligger i den lave ende. Det ses, at modelvurderingerne for kommunerne i de to amter er vidt forskellige. Modellen vurderer således alle kommuner i Nordjyllands Amt til at have en lav andel af huse med koncentrationer over 200 Bq/m³. På nær et par kommuner vurderes alle kommuner i Nordjyllands Amt til at have lavere f_{200} -værdier end alle kommuner i Vestsjællands Amt.

4 Faktoranalyse (enfamiliehuse)

3018 huse Dette kapitel søger at afdække de faktorer, som er bestemmende for radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse. Formålet er at få en bedre forståelse for de bagvedliggende mekanismer og at opnå et forbedret grundlag for at finde huse med høje niveauer. Faktorerne vedrører primært geologi og huskonstruktion. Faktoroplysningerne stammer fra Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS), Bygnings- og Boligregistret (BBR), og spørgeskemaer udfyldt af beboerne. Kilderne er nærmere beskrevet i Kapitel 2. Der indgår 3018 enfamiliehuse i faktoranalysen. Det svarer til alle enfamiliehuse i undersøgelsen på nær et enkelt. Huset blev udeladt pga. mangelfulde supplerende oplysninger. Oprindeligt var huset (fejlagtigt) kategoriseret som et flerfamiliehus.

Tabel 7. Oversigt over undersøgte faktorer.

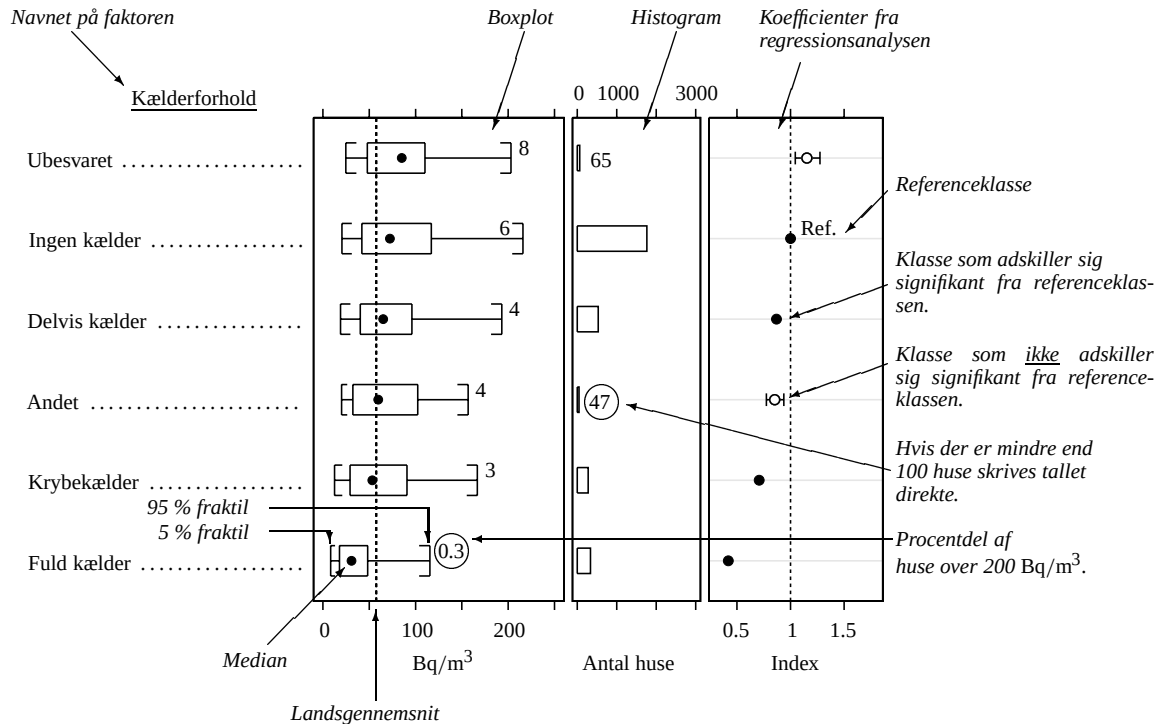
Tema	Kilde	Afsnit
Geologi		
Amt	BBR	4.1
Landsdel	GEUS	4.2
Jordart	GEUS	4.3
Jordart	beboer	4.4
Grundvand	beboer	4.5
Huskonstruktion		
Kælderforhold	beboer	4.6
Byggemateriale	BBR	4.7
Byggemateriale	beboer	4.8
Tag	BBR	4.9
Husstørrelse		
Bebygget areal	BBR	4.10
Beboet areal	BBR	4.11
Antal etager	BBR	4.12
Antal etager	beboer	4.13
Dosimeterplacering	beboer	4.14
Ventilation		
Ventilationssystem	BBR	4.15
Udluftning, soveværelse	beboer	4.16
Udluftning, stue	beboer	4.17
Hustype m.v.		
Hustype	BBR	4.18
Hustype	beboer	4.19
Byggeår	BBR	4.20

I de følgende afsnit gennemgås faktorerne i samme rækkefølge som angivet i Tabel 7. Behandlingen af de enkelte faktorer er ikke lige omfattende. Eksempelvis behandles jordart og kælderforhold mere grundigt end de øvrige (mindre vigtige) faktorer. Fælles for behandlingen er dog, at hver faktor har sit eget afsnit, og at dette afsnit starter med en figur, som her kaldes for et faktordiagram. Fordelen ved sådanne diagrammer er, at de indeholder alle de vigtigste informationer om den pågældende faktor. Dette skulle gerne hjælpe til at give et godt og hurtigt overblik. Diagrammerne er alle udført som beskrevet i det følgende.

Faktordiagrammer

Klasseinddeling Figur 10 viser et faktordiagram for faktoren *kælderforhold*. Helt til venstre kan man se, hvordan faktoren er inddelt i seks klasser (eller niveauer) svarende til *fuld kælder*, *krybekælder* osv. I dette tilfælde stammer oplysningerne fra spørgeskemaundersøgelsen, hvor-

for der også er en klasse, som hedder *ubesvaret*. Rækkefølgen, som klasserne angives i, er ikke tilfældig. Normalt angives klasserne efter stigende radonniveauer. Således er husene med fuld kælder anbragt nederst i Figur 10. Dernæst kommer krybekælderhusene, som i gennemsnit har en højere radonkoncentration osv. For visse faktorer har klasserne en egen naturlig rækkefølge. Det gælder eksempelvis for faktorer vedr. husenes alder eller størrelse. I sådanne tilfælde er det denne rækkefølge, som benyttes i faktordiagrammet.



Figur 10. Eksempel på faktordiagram med forklaringer af indhold. Det tilsvarende diagram (uden forklaringer) er vist side 33.

Panelet til venstre i Figur 10 angiver fordelingen af husenes radonkoncentration indenfor de enkelte klasser. Der anvendes såkaldte boxplot [C93]. For hver klasse er der markeringer ved fordelings 5, 25, 50, 75, og 95 % fraktiler. Paraplyintervallet går fra 5 %-fraktilen til 95 %-fraktilen. Dette interval omfatter således 90 % af alle huse i den pågældende klasse. Eksempelvis kan det aflæses af Figur 10, at 90 % af alle undersøgelsens krybekælderhuse har radonkoncentrationer mellem ca. 20 og 165 Bq/m³. Omvendt gælder det naturligvis, at 10 % ligger uden for intervallet: 5 % af krybekælderhusene har koncentrationer under 20 Bq/m³, og 5 % har koncentrationer over 165 Bq/m³.

Boksintervallet går fra 25 %-fraktilen til 75 %-fraktilen. Dette interval omfatter således 50 % af fordelingen. Fordelingens median (dvs. 50 %-fraktilen) er angivet ved et punkt inde i boksen. Panelet er tilføjet en hjælpelinie (stiplet), som svarer til landets gennemsnitlige radonkoncentration (57.7 Bq/m³ jf. Tabel 4). Man kan altså umiddelbart vurdere om den enkelte klasse har et gennemsnitligt niveau, som ligger over eller under landsgennemsnittet. Den sidste information i panelet er, at procentdelen af huse med koncentrationer over 200 Bq/m³ er påskrevet ved den øvre del af paraplyintervallet. Det fremgår eksempelvis af Figur 10, at 0.3 % af husene med fuld kælder har niveauer over 200 Bq/m³.

Panelet i midten er et simpelt histogram. Det viser, hvorledes de 3018 huse fordeler sig på klasserne. Eksempelvis kan man se af Figur 10, at hovedparten af undersøgelsens huse er terrændækshuse (klassen *ingen kælder*). Det fremgår altså, at materialet er stærkt ubalanceret, idet der ikke er lige mange huse i de forskellige klasser. For klasser med mindre end 100 huse er antallet påskrevet med tal. Dette skal advare om, at det statistiske materiale er tyndt for den pågældende klasse. Eksempelvis ses det af Figur 10, at klassen

Boxplot

Histogram

andet kun indeholder 47 huse.

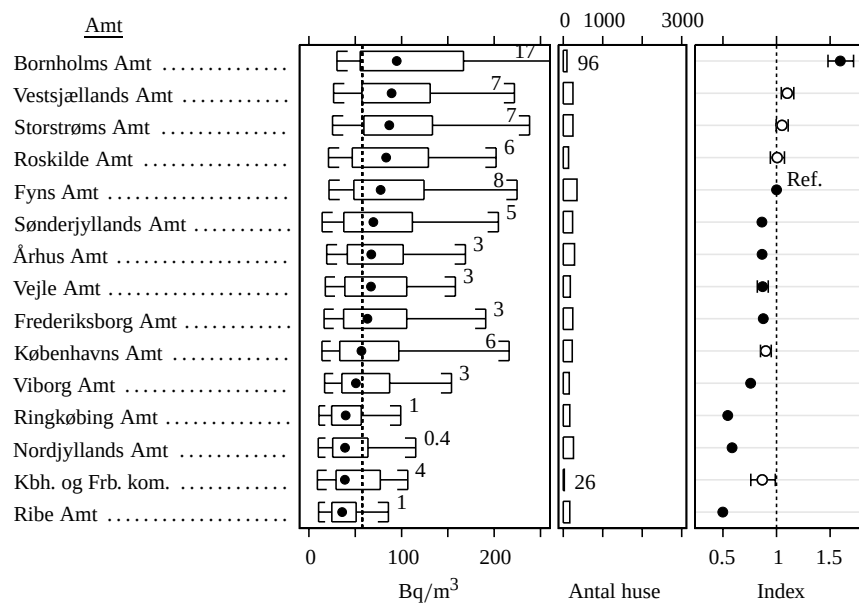
Panelet til højre angiver den radonmæssige betydning af faktoren klasse for klasse. Resultaterne knytter sig til en regressionsanalyse, som er nærmere beskrevet i afsnit 4.21. For hver faktor er der valgt en referenceklasse svarende til index 1. Det er i alle tilfælde den klasse, som har flest huse. I Figur 10 er det klassen *ingen kælder*. Referenceklassen er markeret ved en sortmalet cirkel og teksten *Ref.* De øvrige klasser er afsat ved index, som svarer til deres relative betydning i forhold til referenceklassen. Hvis en bestemt klasse vurderes til (i gennemsnit) at øge radonkoncentrationen med 50 % i forhold til referenceklassen, da afsættes et punkt ved index 1.5. Hvis en klasse derimod forårsager en reduktion til 50 %, er klassen markeret ved index 0.5. Det ses af Figur 10, at kælderhusene har et index på ca. 0.4. Nu kan man ikke uden videre omdanne et hus fra terrændæk til kælderhus, men hvis man kunne, ville vi altså forvente (alt andet lige), at indgrebet ville sænke radonkoncentrationen til 40 % af terrændæklusets niveau. Hvis en faktor ingen betydning har for radonkoncentrationen, da vil alle klasser have et index omkring 1. Afsnit 4.21 giver en mere uddybende beskrivelse af, hvordan disse index (eller regressionskoefficienter) anvendes og tolkes. En vigtig egenskab ved koefficienterne skal dog pointeres allerede her: Ved ovenstående vurdering af kælderforholdenes betydning er der taget hensyn til betydningen af andre faktorer. Eksempelvis er der taget hensyn til, at kælderhuse ikke forekommer ligeligt på de forskellige jordarter. Den angivne effekt i Figur 10 er altså (forsøgt) renset for betydningen af andre faktorer: Regressionsanalysen anslår den isolerede effekt af faktoren *kælderforhold*. Det skal her pointeres, at analysen dog på ingen måde er perfekt. Bl.a. kan regressionsmodellen kun redegøre for en ret begrænset del af variabiliteten fra hus til hus (se side 49).

Det er interessant at vide, om de enkelte klasser har regressionskoefficienter, som signifikant adskiller sig fra 1 (altså fra referenceklassen). Dette er vist i diagrammet på følgende måde: De klasser, som ikke adskiller sig signifikant ($P > 0.05$), er markeret med åbne cirkler. De øvrige er markeret med sortmalede cirkler. Det ses således umiddelbart af Figur 10, at der ikke er signifikant forskel mellem referenceklassen og klasserne *ubesvaret* og *andet*. Derimod er der signifikant forskel mellem referenceklassen og klasserne *fuld kælder*, *krybekælder* og *delvis kælder*. Det bemærkes, at antallet af huse i klassen indgår når det skal afgøres om en regressionskoefficient er signifikant forskellig fra 1 eller ej. Hvis der kun er få huse i en given klasse, er der svært at påvise en statistisk signifikant forskel fra referenceklassen. I Figur 10 ses det, at de "ikke-signifikante" klasser *ubesvaret* og *andet* kun indeholder få huse (hhv. 47 og 65 stk.).

Det er således klart, at der knytter sig en vis usikkerhed til hver regressionskoefficient. Koefficienter med større usikkerhed (standard error) end 5 procentpoint er vist eksplicit med usikkerhedsintervaller. I Figur 10 er der således angivet et usikkerhedsinterval omkring klassen *andet*. Usikkerhedsintervaller mindre end de førnævnte 5 procentpoint er ikke vist (de ligger stort set indenfor punkternes udstrækning).

4.1 Amt

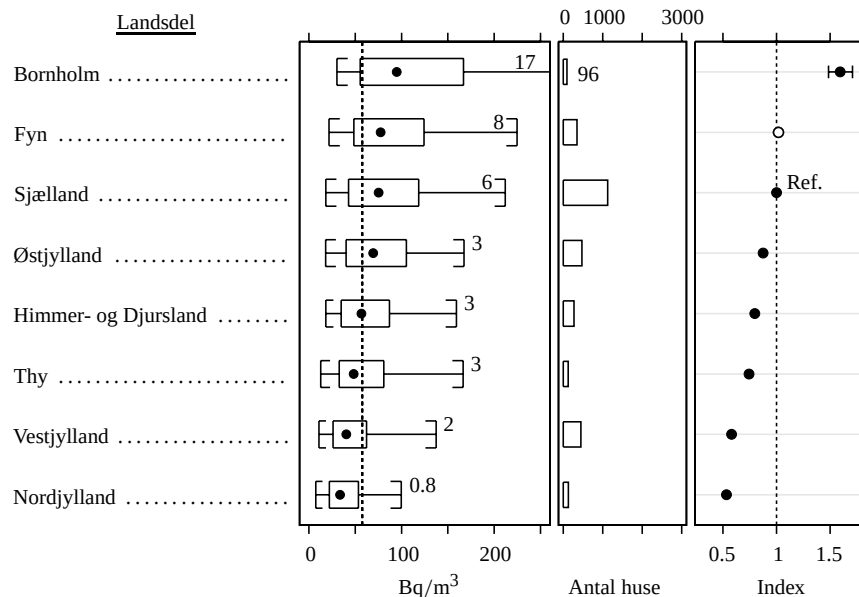
Først undersøges sammenhængen mellem radon og amterne. Vi opfatter således *amtet* som en faktor. Emnet er for så vidt allerede behandlet i afsnit 3.2, og faktoren medtages her primært for fuldstændighedens skyld. Det ses af boxplottet til venstre i Figur 11, at der er stor forskel mellem radonkoncentrationen i de forskellige amter. Indenfor hver amt er der dog også en stor spredning. Eksempelvis kan man i alle amter finde huse med radonkoncentrationer over 200 Bq/m^3 . Dette viser, at amtet ikke er den eneste faktor, som betyder noget. Dette fænomen vil gå igen i alle de følgende afsnit: Ingen enkeltfaktor er i stand til alene at "forklare" radonkoncentrationen for et givet hus. Panelet til højre i Figur 11 viser resultatet af regressionsanalysen. Fyns Amt (der jo har flest huse) er valgt som referenceklasse. Det ses, at de sjællandske amter (på nær Frederiksborg Amt) har index, som ikke adskiller sig signifikant fra referenceklassens. Bornholms Amt ligger i toppen ved index 1.5, og Ribe Amt ligger i bunden ved index 0.5. Det ses således, at



Figur 11. Undersøgelsens resultater klassificeret efter amt. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

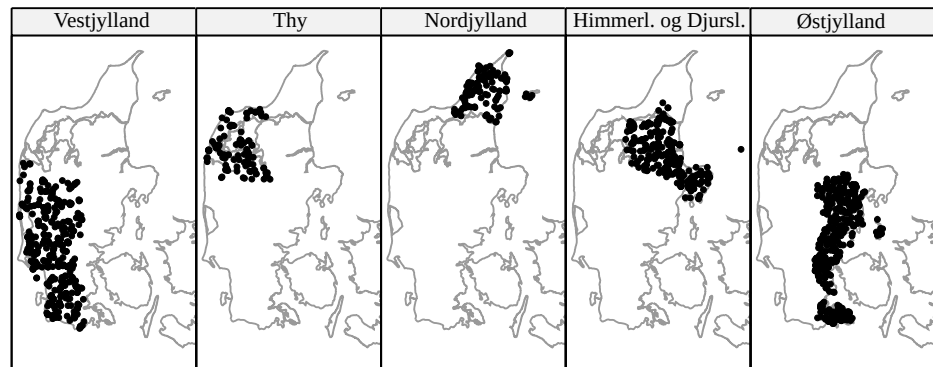
amtsfaktoren har en meget markant effekt på radonkoncentrationen. Det betyder, at der er en effekt af huset ligger i et bestemt amt selv efter korrektion for andre faktorer. Det formodes, at en vigtig årsag til denne amtseffekt er af geologisk natur.

4.2 Landsdel



Figur 12. Undersøgelsens resultater klassificeret efter landsdel. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

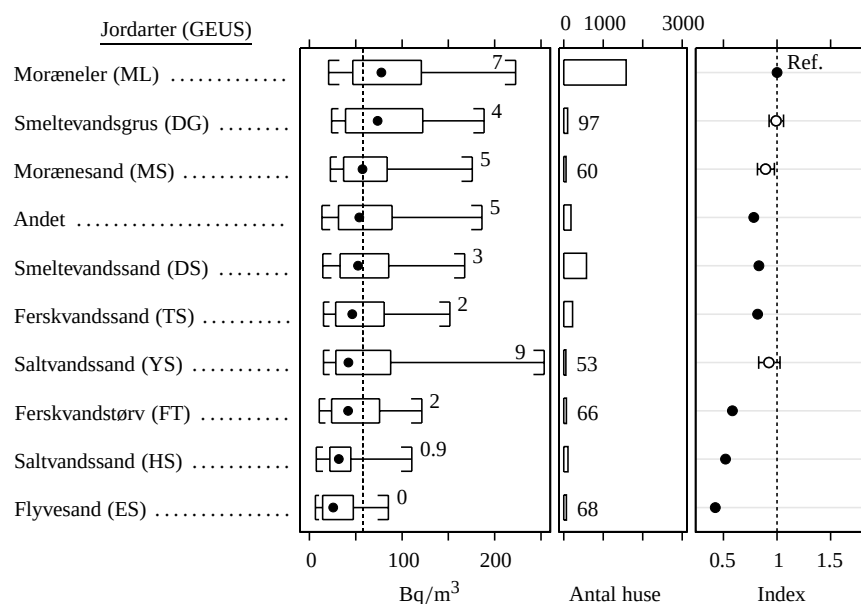
Som et alternativ til at inddele materialet efter amter, kan man også lægge landsdele til grund. Dette er vist i Figur 12. Figur 13 viser definitionen af de jyske landsdele. Lolland, Falster, Møn og de omkringliggende småøer regnes til landsdelen *Sjælland*, og Langeland, Ærø m.v. regnes til *Fyn*. Fordelen ved disse landsdele er, at de i højere grad følger landets geologi end amtsklassifikationen. Reduktionen i antallet af klasser fra 15 amter til



Figur 13. Kort over radonmålinger i de jyske landsdele. Hvert punkt svarer til et hus. Bemærk, at Aalborg Kommune er indregnet i landsdelen "Himmerland og Djursland".

8 landsdele er deruden attraktiv, da der så er flere huse i de enkelte klasser. Herved opnås en mere sikker statistik. Det fremgår af Figur 12, at det index, der knyttes til de enkelte landsdele, går fra omkring 0.5 for Nordjylland til omkring 1.5 for Bornholm. Sjælland er referenceklasse. Det ses, at Fyn ikke adskiller sig signifikant fra Sjælland. Derimod er der signifikante forskelle mellem Sjælland og alle de øvrige landsdele.

4.3 Jordart



Figur 14. Undersøgelsens resultater klassificeret efter jordart iht. GEUS. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

Jorden under huset kan være en vigtig kilde til radon, og det er derfor oplagt at undersøge sammenhængen mellem indendørs radon og geologi. I det følgende lægges den klassifikation af jordarter til grund, som GEUS bruger ved kortlægning (se afsnit 2.4). I alt kan husene fordeles på 35 forskellige jordarter. Hovedresultaterne fremgår af Figur 14. I figuren er jordarter, som indeholder mindre end 50 huse, dog samlet i klassen *andet*. Tabel 8 giver resultaterne for samtlige jordarter.

De fleste boliger i undersøgelsen ligger på jordarter fra istiderne eller tiden derefter (Glacial, Interglacial, Senglacial og Postglacial), men i få tilfælde findes ældre jordarter/bjergarter helt oppe under jordoverfladen (Tertiær: kvartssand, plastisk ler, kalk,

Tabel 8. Forekomst af jordarter i undersøgelsen og tilhørende radonkoncentrationer.

		Forekomst i %	N	GM	GSD	f_{200}	f_{400}	Max
Kvartære, postglaciale aflejringer								
ES	Flyvesand	2.3	68	25	2.4	0	0	140
FG	Ferskvandsgrus	0.1	1	110		0	0	110
FS	Ferskvandssand	1.2	35	58	2.1	2.9	0	360
FL	Ferskvandsler	0.3	9	46	2.4	0	0	170
FP	Ferskvandsgytje	0.6	17	44	2.6	0	0	170
FT	Ferskvandstørv	2.2	66	41	2.3	1.5	0	220
HG	Saltvandsgrus	0.8	23	34	1.9	0	0	120
HS	Saltvandssand	3.6	109	31	2.1	0.9	0	240
HL	Saltvandsler	0.3	9	38	1.5	0	0	70
HP	Saltvandsgytje	0.1	2	40	1	0	0	40
HV	Marsk	0.1	1	20		0	0	20
Kvartære, senglaciale aflejringer								
TG	Ferskvandsgrus	0.7	20	68	2.2	10	0	230
TS	Ferskvandssand	7.4	223	49	2.1	1.8	0	320
TL	Ferskvandsler	0.1	3	140	2.5	33	33	400
YG	Saltvandsgrus	0.1	1	39		0	0	40
YS	Saltvandssand	1.8	53	51	2.5	9.4	2	410
YL	Saltvandsler	0.1	4	19	2.4	0	0	35
Kvartære, glaciale aflejringer								
ZS	Issøgrus	0.1	1	49		0	0	50
ZL	Isøler	0.1	1	87		0	0	90
DG	Smeltevandsgrus	3.2	97	70	2	4.1	0	270
DS	Smeltevandssand	19.1	577	52	2.1	2.9	0.5	550
DI	Smeltevandssilt	0.1	1	240		100	0	240
DL	Smeltevandsler	0.8	24	52	2.3	4.2	0	200
MG	Morænegrus	0.3	9	79	3.2	11	0	210
MS	Morænesand	2.0	60	58	2.1	5	3.3	440
ML	Moræneler	52.3	1579	74	2.1	6.6	0.4	570
KMG	Kalkmorænegrus	0.1	1	71		0	0	70
Andre jordarter								
KS	Miocænt kvartssand	0.1	1	50		0	0	50
LL	Lillebælt ler	0.1	2	100	1.7	0	0	150
O	Fyld	0.1	2	31	2.4	0	0	60
PA	Prækambrisk granit eller gnejs	0.2	5	150	2.7	40	20	590
QL	Interglacialt saltvandsler	0.1	1	31		0	0	30
SL	Eocæn søvind mergel	0.1	1	110		0	0	110
SK	Maastrichtien skrivekridt	0.2	6	39	1.7	0	0	85
ZK	Danien kalk	0.2	6	53	1.7	0	0	110
<i>N</i> : Antallet af måleværdier		f_{200} : Observeret %-del med værdier > 200 Bq/m ³						
<i>GM</i> : Geometrisk middelværdi, Bq/m ³		f_{400} : Observeret %-del med værdier > 400 Bq/m ³						
<i>GSD</i> : Geometrisk standardafvigelse		Max : Maksimum (afrundet), Bq/m ³						

Kridt: skrivekridt og Prækambrium: granit/gnejs). Kun 5 huse er kategoriseret til at ligge på prækambrisk granit eller gnejs. De to hyppigst forekommende jordarter er moræneler (52.3 %) og smeltevandssand (19.1 %). Forekomsten af de øvrige jordarter er angivet i Tabel 8. Moræneler (ML) er overrepræsenteret ved denne undersøgelse i forhold til det kortlagte (52.3 % mod 40.1 %), mens smeltevandssand og grus (DS+TS+DG+TG) svarer godt til de kortlagte forhold (30.2 % mod 28.8 %). For postglacialt marint sand (HS) og flyvesand (ES) er hustallene mindre, hvilket svarer godt til, at man er tilbageholdende med at bygge på disse typer jordarter.

Figur 14 viser, at der er en markant sammenhæng mellem jordart og husenes radonkoncentration. I gennemsnit er koncentrationen højest for huse på moræneler. De laveste værdier findes i huse på flyvesand (ES), saltvandssand (HS), og ferskvandstørv (FT). Disse tre jordarter har et index under 0.6. Det ses desuden af figuren, at der ikke er nogen

signifikant forskel mellem referenceklassen (moræneler) og indexet for smeltevandssand (DG), morænesand (MS) og saltvandssand (YS).

Det ses af boxplottet i Figur 14, at klassen saltvandssand (YS) har en fordeling, som er bredere end de andre. Medianen ligger langt under landsgennemsnittet, men hele 9 % (5 huse) af de 53 huse i klassen har radonniveauer over 200 Bq/m³. Forklaringen er, at saltvandssand (YS) i undersøgelsen kun forekommer to steder: i Nordjylland og på Bornholm, og at jordarten de to steder åbenbart er forskellig fra en radonmæssig synsvinkel. I Nordjyllands Amt forekommer der 44 huse på saltvandssand (YS), og kun et enkelt er over 200 Bq/m³. På Bornholm forekommer der 9 huse på saltvandssand (YS), men hele 4 huse har niveauer over 200 Bq/m³. På baggrund af sådanne forskelle, er der grund til at undersøge den geologiske klassifikation nærmere. Det skal understreges, at det geologiske set er velkendt, at sammensætningen af saltvandssand i Nordjylland og på Bornholm er meget forskellig. Det nye her angår alene den radonmæssige anvendelse af klassifikationen.

Geografisk forekomst

Figur 15 viser, hvorledes de hyppigst forekommende jordarter er fordelt over landet. Som allerede nævnt forekommer saltvandssand (YS) i undersøgelsen kun i Nordjylland og på Bornholm. Det fremgår af figuren, at undersøgelsens huse på moræneler (ML) er spredt over hele Danmark på nær det nordlige og det sydvestlige Jylland. Smeltevandssand (DS) forekommer tilsvarende over det meste af landet på nær dele af det østlige Sjælland. Andre jordarter har en mere begrænset udbredelse. Bemærk eksempelvis, hvorledes flyvesand (ES) primært forekommer i kystnære områder.

Figur 16 viser den relative hyppighed af jordarterne indenfor hver landsdel. Bemærk, at jordarterne er ordnet efter stigende radonkoncentration: flyvesand nederst og moræneler øverst. Panelerne med de enkelte landsdele er sorteret på samme måde: Nordjylland (med de laveste radonkoncentrationer) i nederste venstre hjørne og Bornholm (med de højeste) i det øverste højre. Hvert panel i figuren svarer til 100 %. Figuren kan benyttes til at sammenligne de geologiske profiler for husene landsdel for landsdel. Eksempelvis kan man umiddelbart se af figuren, at husene på Sjælland og Fyn har næsten ens geologiske profiler: De domineres af moræneler og har omkring 10 % af husene på smeltevandssand (DS). Bemærk desuden, at der ikke blev registreret huse i Nordjylland på moræneler, smeltevandssand eller morænesand. Det er interessant, da det netop er de tre jordarter, som normalt kan give høje radonkoncentrationer. Det forklarer, hvorfor Nordjylland er den landsdel, som har mindst radon i husene.

Amtseffekten

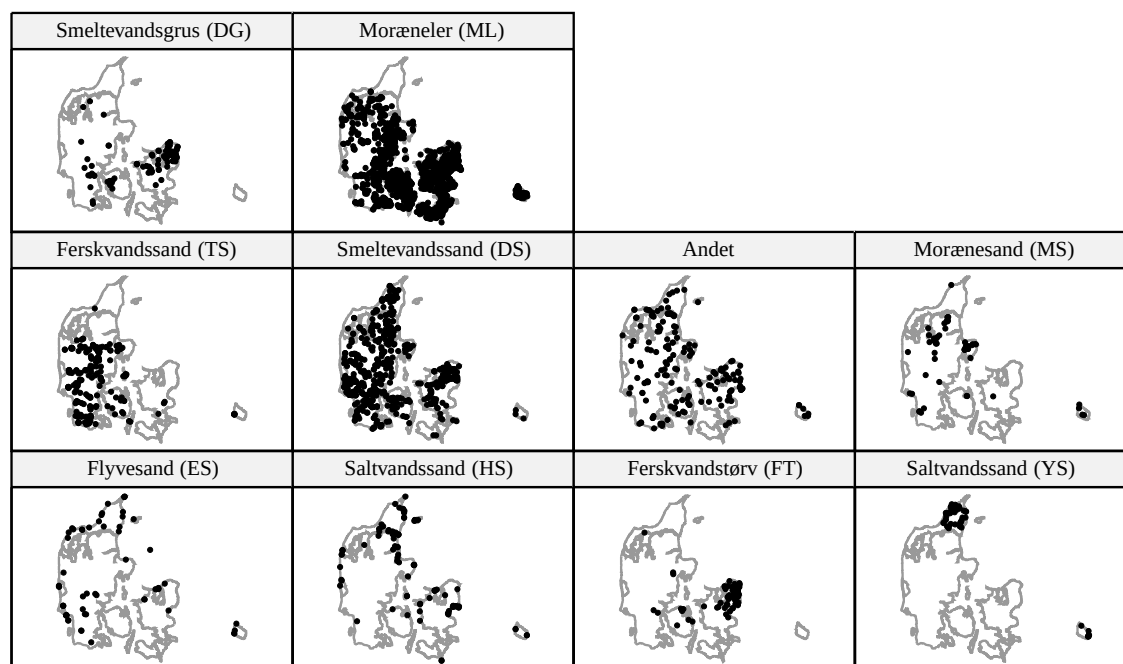
Det skal nu undersøges om de forskellige jordarter giver anledning til identiske radonforhold, uanset hvor i landet de forekommer. Figur 17 viser, at for de tre hyppigst forekommende jordarter: moræneler (ML), smeltevandssand (DS) og ferskvandssand (TS) er dette ikke tilfældet. Der er stor radonmæssig forskel på moræneler fra amt til amt. Det samme gælder for de to andre jordarter. Dette bekræftes af tre envejs variansanalyser af logaritmen til radonkoncentrationen mod amtet:

$$\log(R_n) \sim \text{Amt} \quad (1)$$

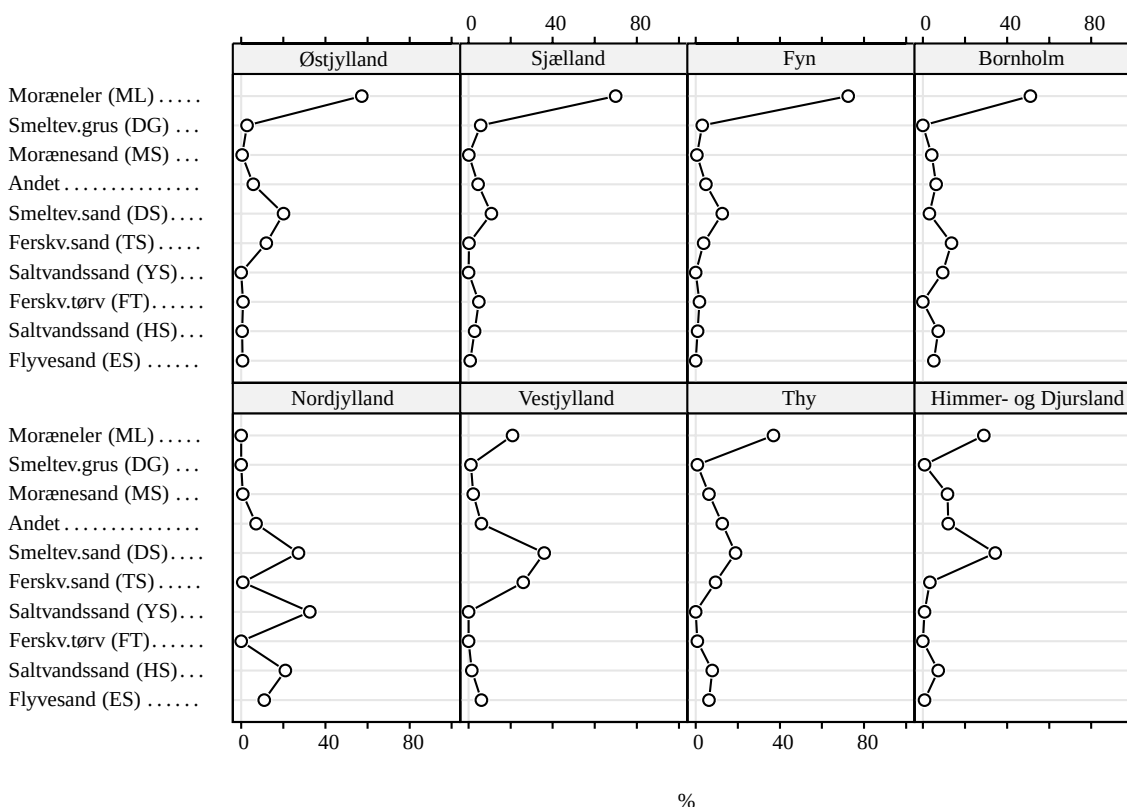
For hver jordart er der en overbevisende amtseffekt. Nul-hypotesen: "Der er ingen sammenhæng mellem radon og amt" kan klart afvises ($P < 0.003$) i alle tre tilfælde.

En visuel sammenligning mellem Figur 14 og 17 antyder, at variationen fra jordart til jordart for Danmark som helhed er af samme størrelse som variationen fra amt til amt indenfor de enkelte jordarter. Denne observation bekræftes af regressionsanalysen i afsnit 4.21.

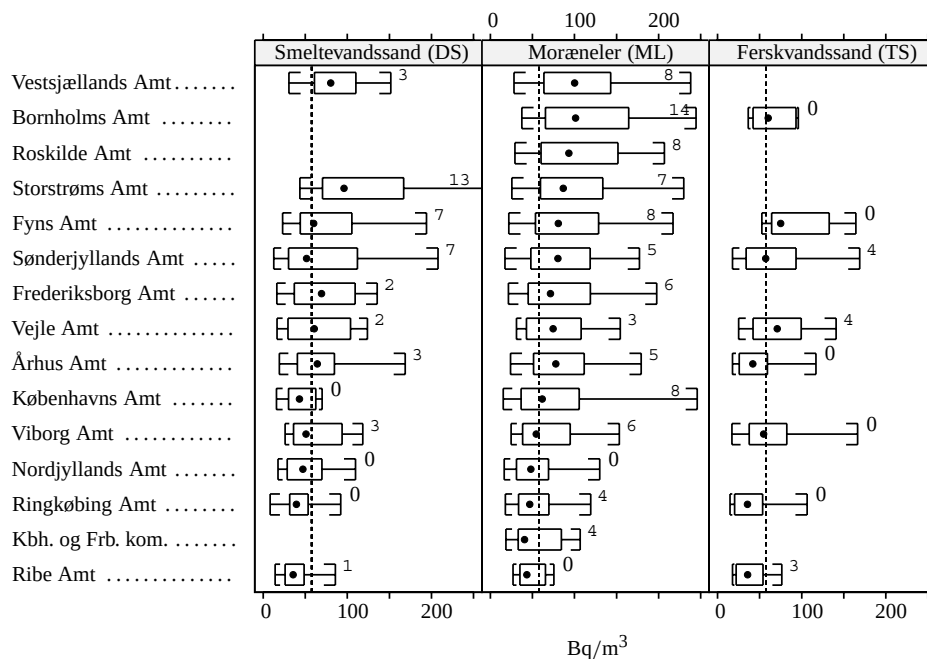
Et andet vigtigt forhold fremgår af Figur 17: Der er en vis sammenhæng på tværs af jordarterne. Hvis en jordart i et amt giver anledning til lave radonkoncentrationer, da er der tendens til at de andre to jordarter i amtet gør ligeså. Bemærk f.eks. at Ribe Amt har de laveste radonkoncentrationer for alle de tre nævnte jordarter. Tilsvarende ligger Vestsjællands og Storstrøms amter i toppen for både smeltevandssand (DS) og moræneler (ML). Det er svært at pege på væsentlige byggetekniske og/eller meteorologiske forskelle, som amtvis kan forklarer disse forhold. Det er derimod mere nærliggende, at den anvendte



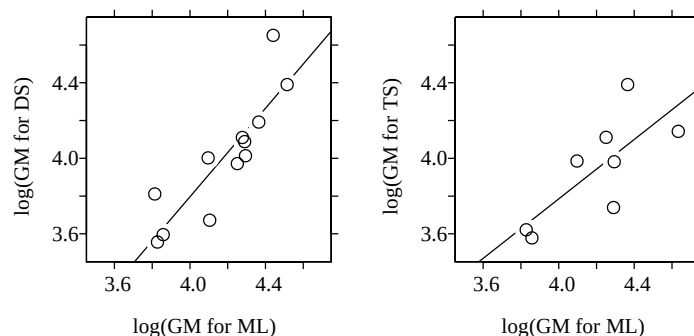
Figur 15. Geografisk fordeling af huse på de hyppigst forekommende jordarter. Bemærk, at jordarterne er ordnet efter stigende radonkoncentration. Hvert punkt svarer til et hus.



Figur 16. Procentvis andel af huse på de hyppigst forekommende jordarter indenfor de enkelte landsdele. Hvert panel svarer til 100 %. Eksempelvis ses det, at omkring 50 % af de bornholmske huse ligger på moræneler.



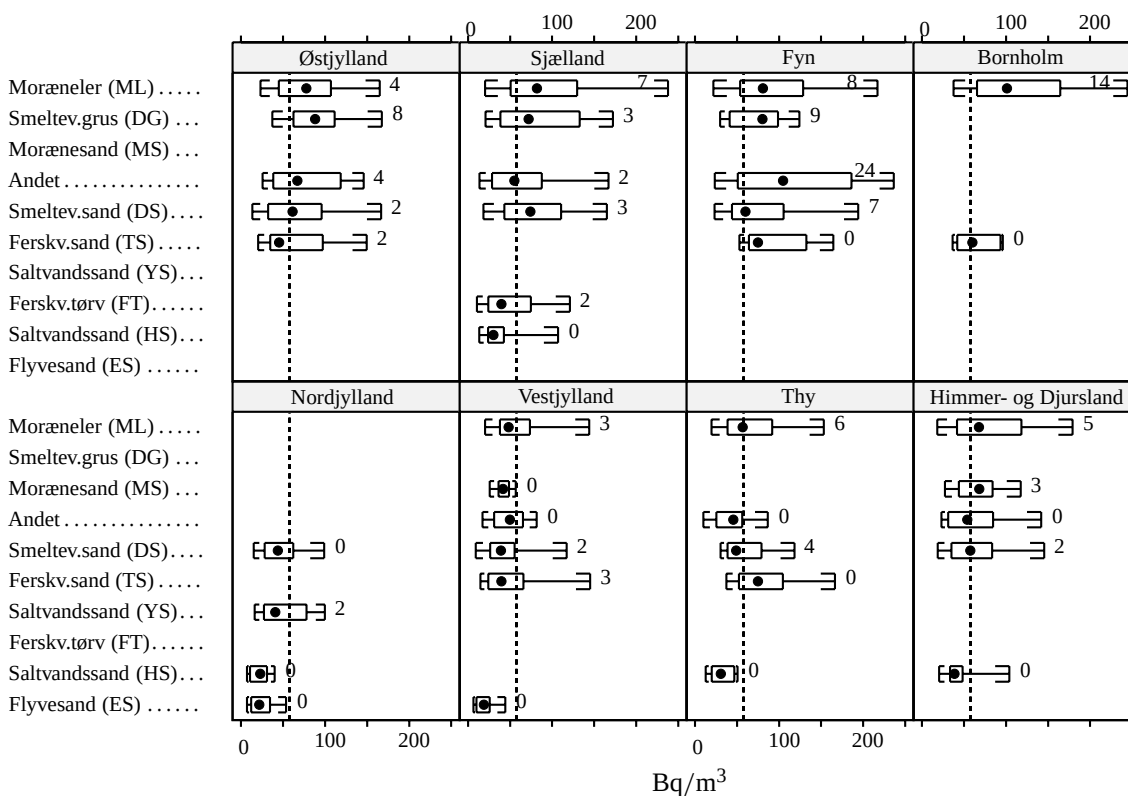
Figur 17. Fordeling af radonmålinger i huse på smeltevandssand (DS), moræner (ML), eller ferskvandssand (TS) grupperet efter amt. Hvert panel viser et såkaldt boxplot med påskrevne tal for procentdelen af huse med koncentrationer over 200 Bq/m³ (se nærmere forklaring side 21). Grupper med mindre end 10 huse er udeladt af diagrammet.



Figur 18. Til venstre ses sammenhængen mellem logaritmen til de geometriske middelværdier for hhv. smeltevandssand (DS) og moræner (ML). Hvert punkt svarer til et amt. Kun amter, hvor der er 10 huse eller mere af hver af de to jordarter, er medtaget. Linien er en lineær regressionslinje. Til højre ses en tilsvarende sammenhæng mellem ferskvandssand (TS) og moræner (ML).

geologiske klassifikation ikke er detaljeret nok, og at geologiske sammenhænge vedr. fælles geologisk oprindelse eller alder således kommer til udtryk som en "amtseffekt". Man kan sige at "amtseffekten" bliver et surrogat for fælles geologisk oprindelse og alder. Eksempelvis er sammenhængen mellem moræner og smeltevandssand, at disse jordarter (sted for sted) er dannet ud fra samme materiale. Der opstår således en naturlig (fælles) variation i disse jordarters radonmæssige betydning fra amt til amt (eller fra landsdel til landsdel).

Figur 18 tydeliggør den amtsvise sammenhæng mellem moræner, smeltevandssand og ferskvandssand. Det venstre plot i figuren viser smeltevandssand mod moræner. Hvert punkt svarer til et amt. Kun amter, hvor der i undersøgelsen forekommer 10 huse eller mere af hver jordart er medtaget. I alt er der således 12 amter i plottet. Indenfor hvert amt er den geometriske middelværdi (GM) beregnet for de to jordarter. Plottet afbilder lo-



Figur 19. Fordelingen af radonkoncentrationer grupperet efter jordart og landsdel. Hvert panel viser et såkaldt boxplot med påskrevne tal for procentdelen af huse med koncentrationer over 200 Bq/m³ (se nærmere forklaring side 21). Grupper med mindre end 10 huse er udeladt af diagrammet. Det bemærkes, at gruppen "andet" på Fyn udgøres af 17 huse. Heraf er 4 over 200 Bq/m³, hvilket altså svarer til de angivne 24 %.

garitmen til disse geometriske middelværdier mod hinanden. Det ses, at der er en tydelig sammenhæng mellem moræneler og smeltevandssand: I amter, hvor moræneleren giver høje radonniveauer, gør smeltevandssandet det også. Det højre plot viser ferskvandssand mod moræneler. I dette tilfælde er der kun 8 amter, som har 10 huse eller mere af hver jordart. Det ses af plottet, at der er en udpræget sammenhæng mellem radonniveauerne for de to jordarter. Sammenhængen er dog ikke så udtalt som i det forrige tilfælde.

På baggrund af de forudgående observationer er det af betydning at undersøge, om der i det hele taget er forskel på radonniveauerne fra jordart til jordart *indenfor* de enkelte landsdele eller amter. Figur 19 viser, at der på Sjælland forekommer en differentiering mellem jordarterne, som tydeligvis ligner den der blev fundet for Danmark som helhed (se Figur 14). Indenfor visse andre landsdele (f.eks. Thy og Fyn) forekommer differentiationen dog at være anderledes eller mindre udpræget.

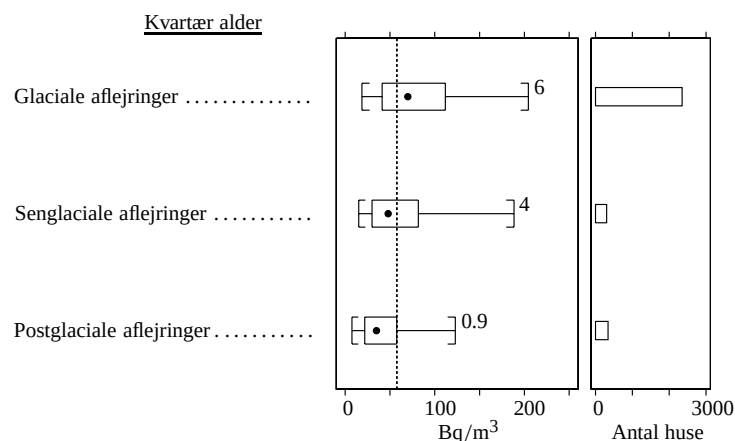
For at undersøge sagen nærmere er der foretaget otte envejs variansanalyser (en for hver landsdel) af logaritmen til radonkoncentrationen mod jordart:

$$\log(Rn) \sim \text{Jordart} \quad (2)$$

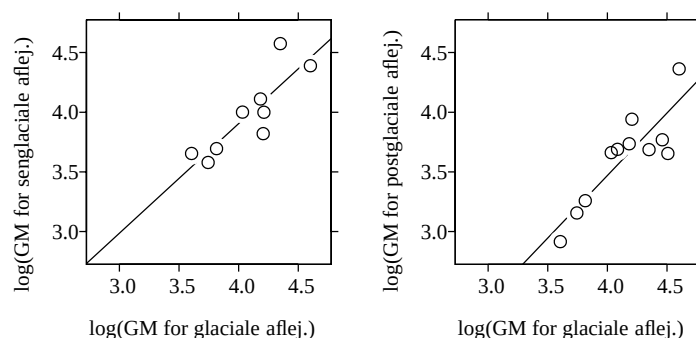
På Fyn kan det ikke på den måde påvises, at der er en sammenhæng mellem jordart og radon ($P = 0.068$). Det samme gælder for Bornholm ($P = 0.15$). Derimod kan der påvises sammenhænge mellem jordart og radon for de øvrige landsdele ($P < 0.05$).

Afslutningsvis undersøges sammenhængen mellem radon og jordarterne ud fra disses alder. Det fremgår af Tabel 8, at de kvartære jordarter kan inddeles i aldersgrupperne: glaciale, senglaciale, og postglaciale aflejringer. Blandt de mest forekommende kvartære jordarter gælder, at de postglaciale aflejringer har den lavest radonkoncentration (median), så kommer de senglaciale aflejringer, og i toppen findes de glaciale aflejringer. Det

Alder for kvartære jordarter



Figur 20. Undersøgelsens resultater klassificeret efter aflejringerens alder. Kun de 2994 huse på kvartære jordarter er medtaget. Gruppen med glaciale jordarter er ældst, så kommer de senglaciale jordarter, og sidst kommer den yngste gruppe med postglaciale jordarter. Figuren kan tolkes på samme måde som faktordiagrammerne (se side 21), idet der dog ikke er foretaget nogen regressionsanalyse.

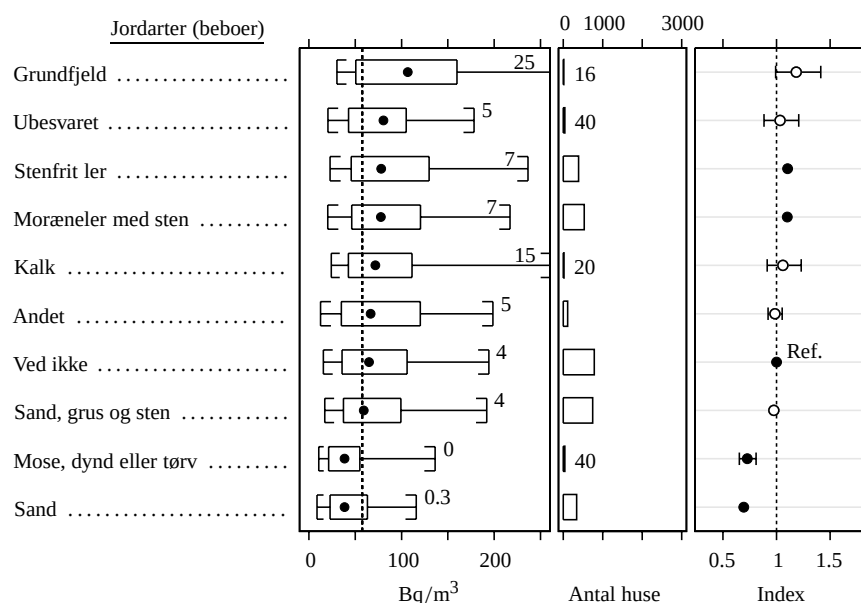


Figur 21. Til venstre ses sammenhængen mellem logaritmen til de geometriske middelværdier for hhv. kvartære senglaciale aflejringer og kvartære glaciale aflejringer. Hvert punkt svarer til et amt. Kun amter, hvor der er 10 huse eller mere af hver af de to aflejringer, er medtaget. Linien er en lineær regressionslinie. Til højre ses en tilsvarende sammenhæng mellem kvartære postglaciale aflejringer og kvartære glaciale aflejringer.

vil sige, at jo ældre aflejringer er, jo mere radon kommer der i husene. Denne observation illustreres i Figur 20. Figuren omfatter undersøgelsens 2994 huse på kvartære jordarter på nær et enkelt hus på saltvandsler (QL), som tilhører klassen af kvartære interglaciale jordarter.

Det kan påvises, at jordarterne (på tværs af alder) har en tendens til at opføre sig ens radonmæssigt, hvis de ligger indenfor samme amt. Dette fremgår af Figur 21, der helt svarer til Figur 18: Hvert punkt repræsenterer et amt. Kun amter, hvor der i undersøgelsen forekommer 10 huse eller mere af hver aldersgruppe er medtaget. Indenfor hvert amt er den geometriske middelværdi (GM) beregnet for de to aldersgrupper. Plottet afbilder logaritmen til disse geometriske middelværdier mod hinanden. Det ses af plottet til venstre i Figur 21, at der er en tydelig sammenhæng mellem senglaciale aflejringer og glaciale aflejringer: I amter hvor glaciale aflejringer giver høje radonniveauer gør de senglaciale aflejringer det også. Plottet til højre viser en tilsvarende sammenhæng mellem postglaciale aflejringer og glaciale aflejringer.

4.4 Jordart (beboeroplysning)



Figur 22. Undersøgelsens resultater klassificeret efter jordart iht. beboerne selv. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

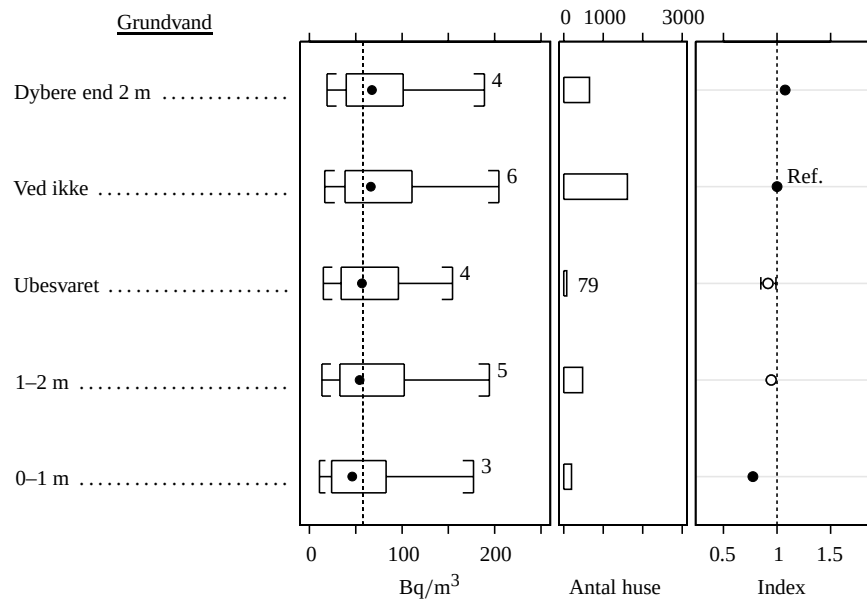
Jorden under husene blev også vurderet af beboerne selv. Der foreligger således en alternativ klassifikation i forhold til den fra GEUS. Resultaterne fremgår af Figur 22. Det ses, at *grundfjeld* og *kalk* har de højeste andele af huse med værdier over 200 Bq/m^3 (hhv. 25 og 15 %). Klasserne er dog ikke særligt store, og som det fremgår af regressionsanalysen kan man ikke hævde, at der er en effekt, som er signifikant forskellig fra referenceklassen *ved ikke*. Det ses, at de omkring 900 huse i lergrupperne: *stenfrit ler* og *moræner med sten* ligger væsentligt over landsgennemsnittet. I bunden af skalaen haves huse på forskellige former for sand og grus. Resultaterne forekommer således at være i rimelig overensstemmelse med resultaterne baseret på jordartsklassifikationen foretaget af GEUS (se Figur 14).

4.5 Grundvand

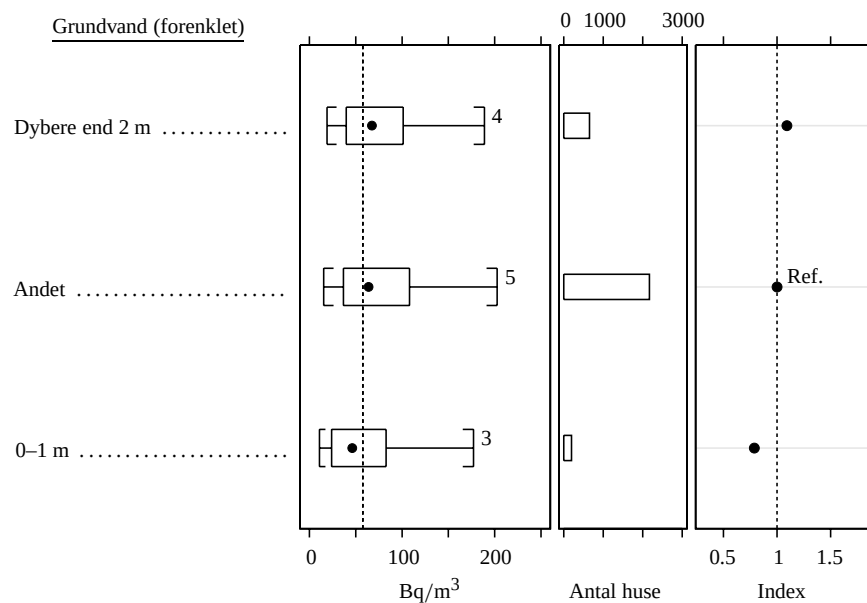
Transport af jordluft og radon er svær i vandmættet jord [Rog91]. Der kan således kun tilgå huset radon fra det gasreservoir, som ligger mellem jordoverfladen og grundvandspejlet (dvs. fra den umættede zone). Et højt grundvandspejl vil således begrænse indtrængning af radon fra jorden under huset. Dette var baggrunden for at beboerne blev spurgt om den typiske grundvandsstand om vinteren.

Det fremgår af Figur 23, at hovedparten af beboerne svarede *ved ikke* til spørgsmålet. Dette viser, at grundvandspejlets rette placering er vanskeligt at vurdere. Samtidig er der ofte tale om en stor årstidsvariation i grundvandspejlets beliggenhed og mindre sekundære vandspejle optræder f.eks. i moræner. På den anden side må det formodes, at man er særlig opmærksom på grundvand, dersom det står højt. Gruppen *ved ikke* er derfor næppe "repræsentativ" sammensat.

Det fremgår af Figur 23, at der faktisk er en sammenhæng mellem grundvandspejl og radonkoncentration: radonkoncentrationen er størst, når der er mere end 2 m ned til grundvandet. Figur 24 viser et faktordiagram baseret på en forenklet klassifikation af faktoren *grundvand*. Her er klasserne *ved ikke*, *ubesvaret*, og *1–2 m* samlet i en klasse kaldet *andet*.



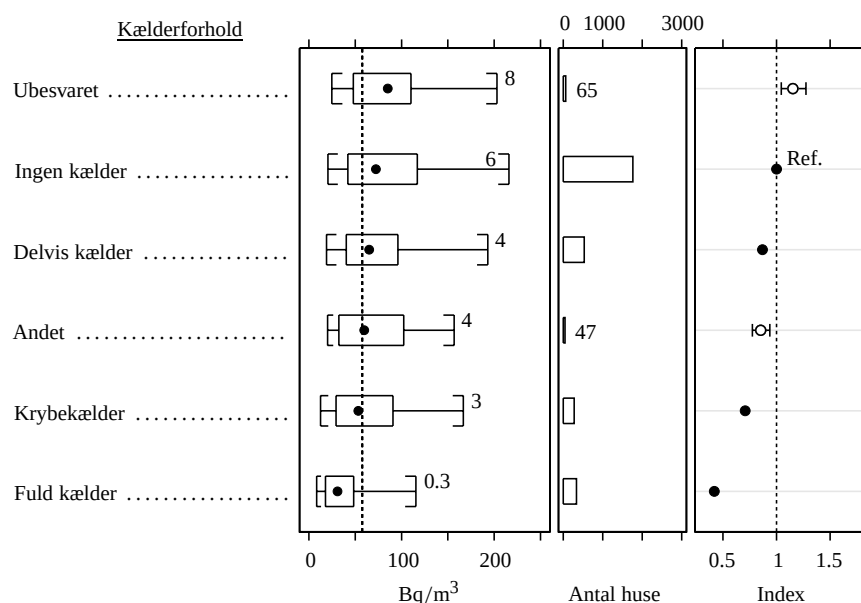
Figur 23. Undersøgelsens resultater klassificeret efter dybden af grundvandsspejlet. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.



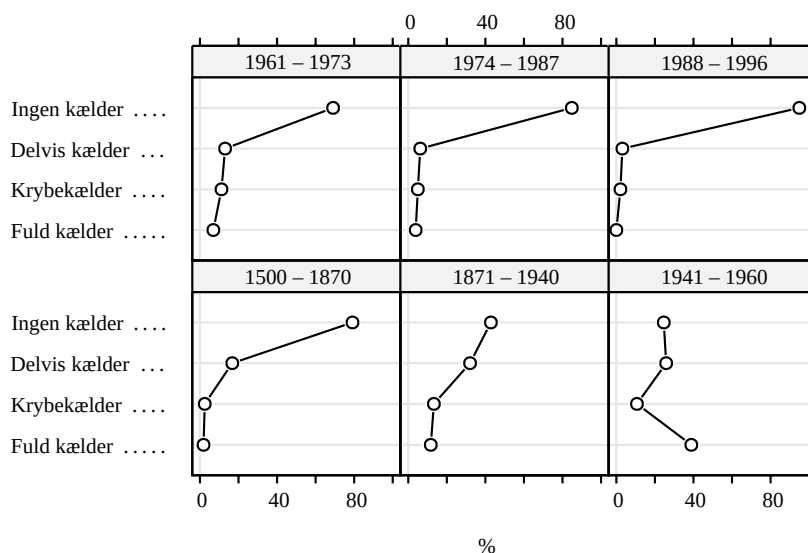
Figur 24. Undersøgelsens resultater klassificeret efter dybden af grundvandsspejlet. Klassifikationen er forenklet i forhold til Figur 23. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

4.6 Kælderforhold

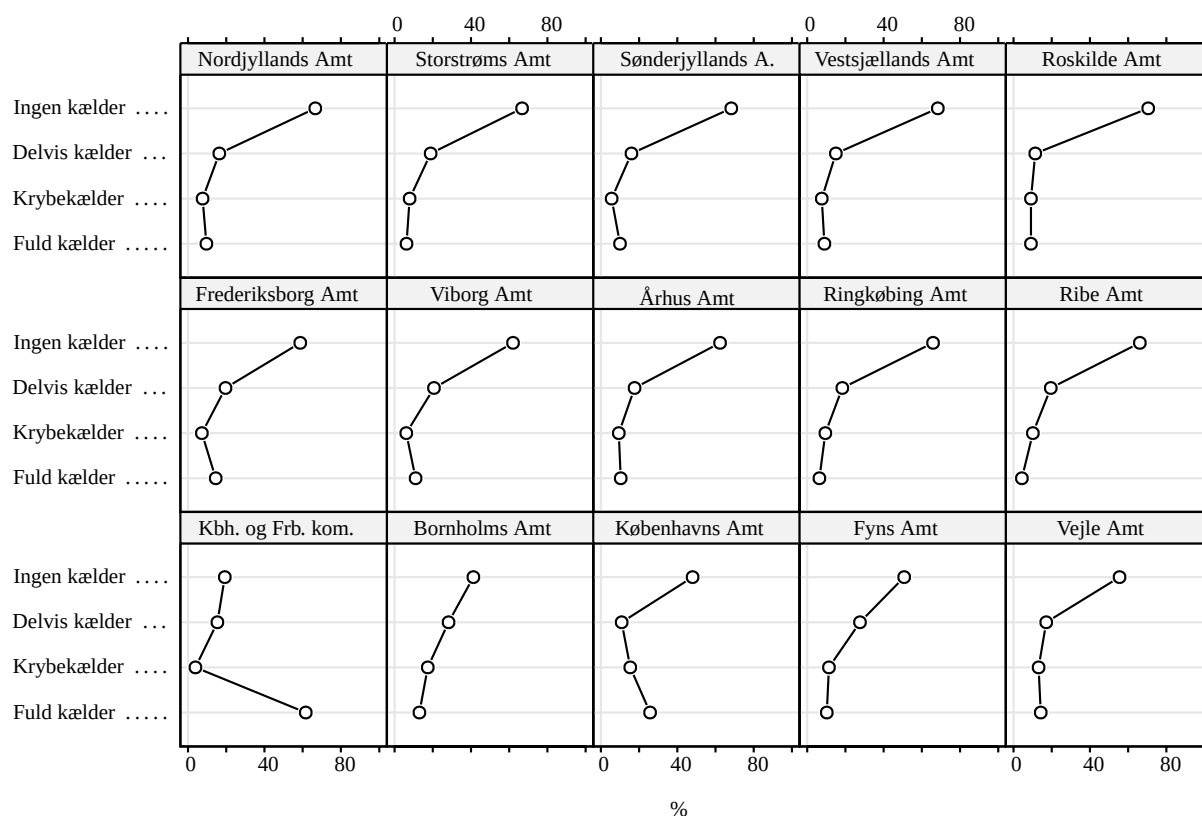
Indtrængning af radon fra jorden må nødvendigvis foregå via den del af huset, som danner grænse mod jorden. Husets kælderforhold er derfor af stor betydning for radonkoncentrationen i huset. Dette fremgår af Figur 25. Radonkoncentration er lavest for *fuld kælder*. Dernæst følger *krybekælder*, *delvis kælder*, og *ingen kælder* (dvs. terrændækhuse).



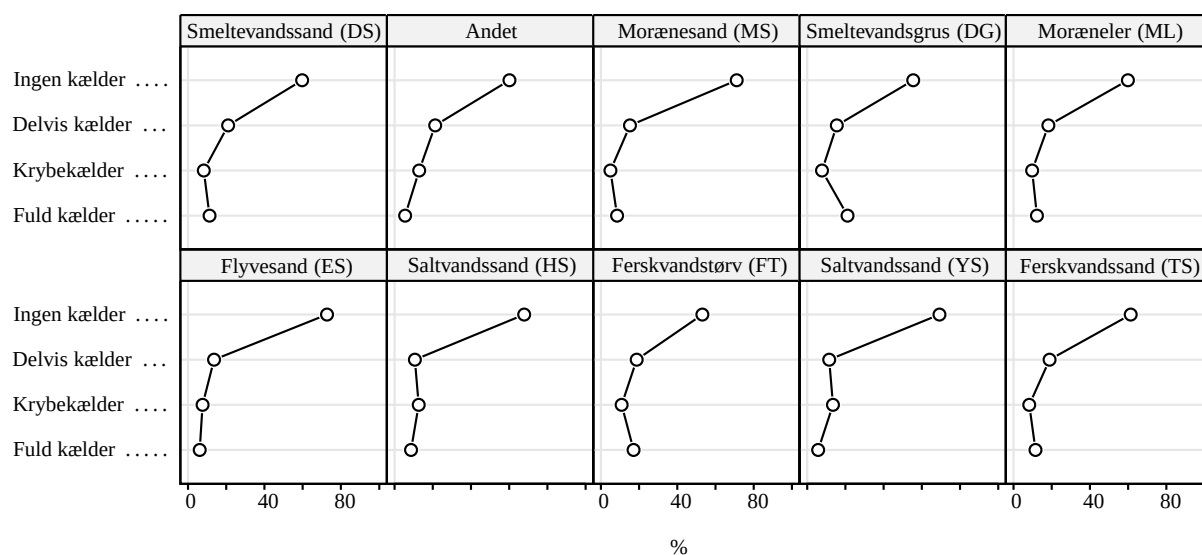
Figur 25. Undersøgelsens resultater klassificeret efter kælderforhold. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.



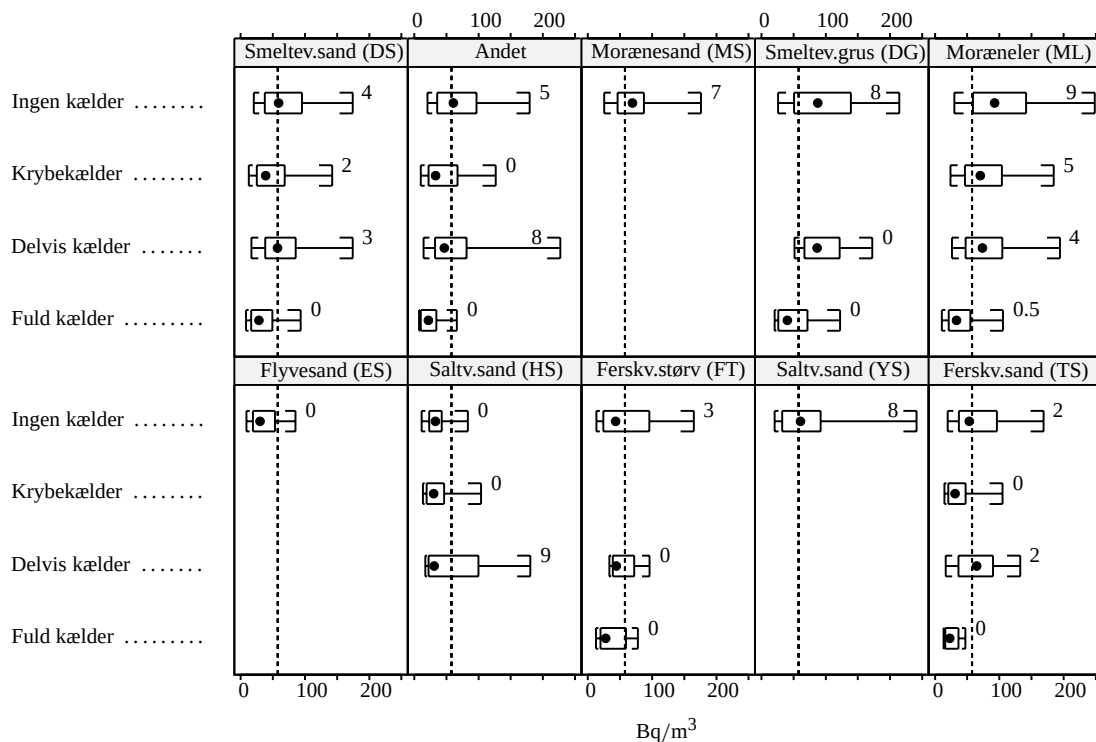
Figur 26. Procentvis andel af forskellige kælderforhold opdelt efter perioder af byggeår. Eksempelvis kan det aflæses, at omkring 80 % af husene fra perioden 1500-1870 havde terrændæk.



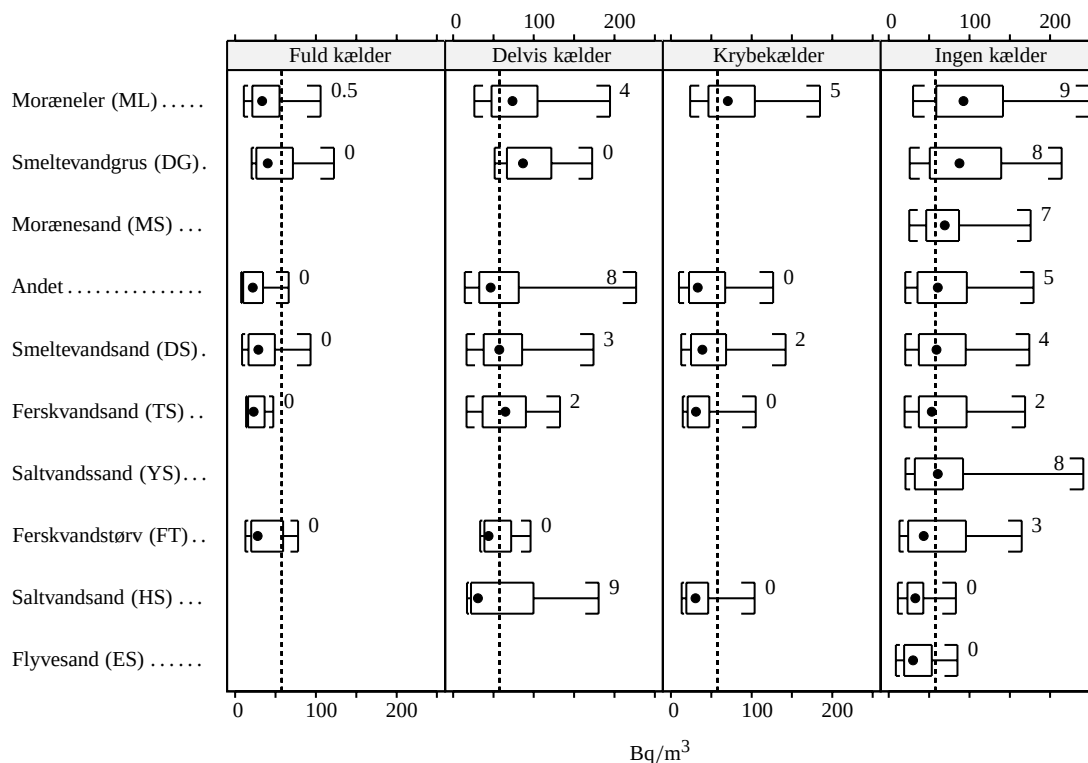
Figur 27. Procentvis andel af forskellige kælderforhold opdelt efter amt. Hvert panel svarer til 100 %. Det kan eksempelvis aflæses, at omkring 70 % af de undersøgte huse i Roskilde Amt er terrændækshuse. Amtene er sorteret efter stigende andel af terrændæks-huse.



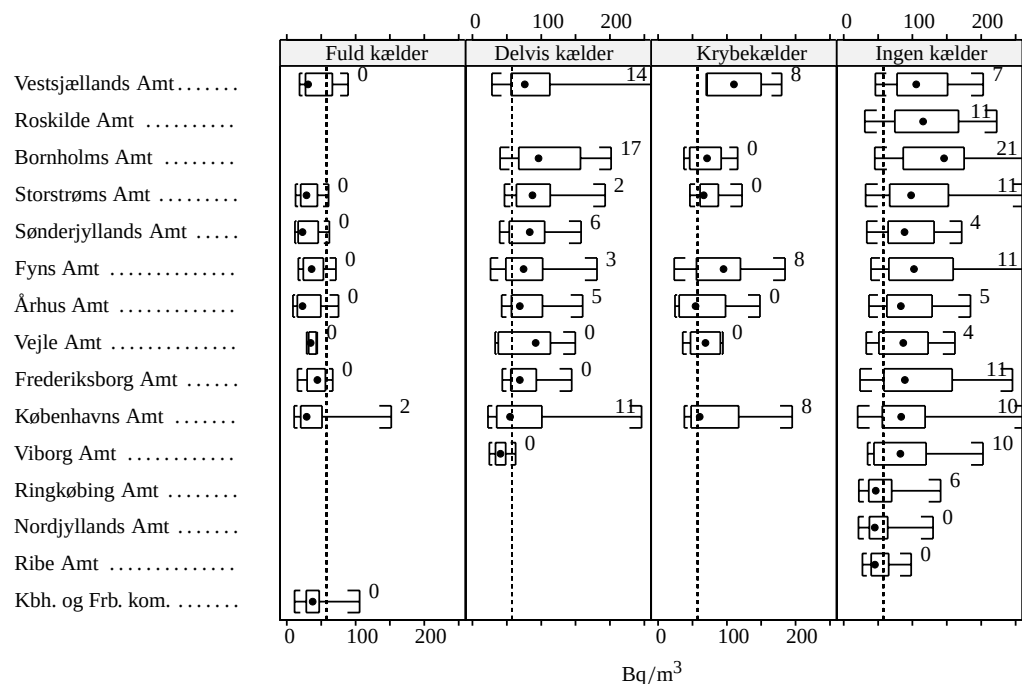
Figur 28. Procentvis andel af forskellige kælderforhold opdelt efter jordart. Hvert panel svarer til 100 %. Jordarterne er sorteret efter stigende radonkoncentration.



Figur 29. Fordeling af radonmålingerne grupperet efter kælderforhold og jordart. Hvert panel viser et såkaldt boxplot med påskrevne tal for procentdelen af huse med koncentrationer over 200 Bq/m³ (se nærmere forklaring side 21). Grupper med mindre end 10 huse er udeladt af diagrammet.



Figur 30. Fordeling af radonmålingerne grupperet efter jordart og kælderforhold. Hvert panel viser et såkaldt boxplot med påskrevne tal for procentdelen af huse med koncentrationer over 200 Bq/m³ (se nærmere forklaring side 21). Grupper med mindre end 10 huse er udeladt af diagrammet.



Figur 31. Huse på moræner (ML) grupperet efter kælderforhold og amt. Hvert panel viser et såkaldt boxplot med påskrevne tal for procentdelen af huse med koncentrationer over 200 Bq/m³ (se nærmere forklaring side 21). Grupper med mindre end 10 huse er udeladt af diagrammet. Grupper med mindre end 10 huse er udeladt af diagrammet.

Variationer i byggeskik

Det er vigtigt, at være opmærksom på at husenes kælderforhold på kompliceret vis er forbundet med en række andre faktorer såsom ændret byggeskik gennem tiderne, økonomisk vækst, jordbundsforhold m.v. Dette belyses i det følgende. Figur 26 viser fordelingen af kælderforhold for forskellige periode af byggeår. Det ses, at de to perioder 1871–1940 og 1941–1960 har en anderledes byggeskik i forhold til de øvrige perioder. Eksempelvis har 40 % af undersøgelsens huse fra perioden 1941–1960 fuld kælder. Af snit 4.20 omhandler yderligere aspekter vedr. byggeåret. Figur 27 viser den amtsvise fordeling af husenes kælderforhold. Det ses, at terrændækhuse dominerer i alle amter på nær Københavns og Frederiksbergs kommuner, hvor omkring 60 % af de undersøgte huse har fuld kælder. Dette kunne måske bero på en tilfældighed, da “amtet” kun omfatter 26 huse. Observationen understøttes imidlertid af, at også Københavns Amt har en stor andel af huse med fuld kælder. Det ses også af figuren, at terrændækhuse ikke forekommer så hyppigt i Bornholms Amt: Kun omkring 40 % af de bornholmske huse har terrændæk. Tilsvarende forekommer der varierede kælderforhold fra jordart til jordart. Eksempelvis ses det af Figur 28, at der er forholdsmæssigt mange kælderhuse på smeltevandsgrus (DG). Variationerne er dog små, og hvis man eksempelvis foretager en sammenligning mellem radonforholdene for moræner og ferskvandssand, så viser figuren, at eventuelle forskelle ikke kan skyldes, at husene på de to jordarter har forskellige kælderforhold.

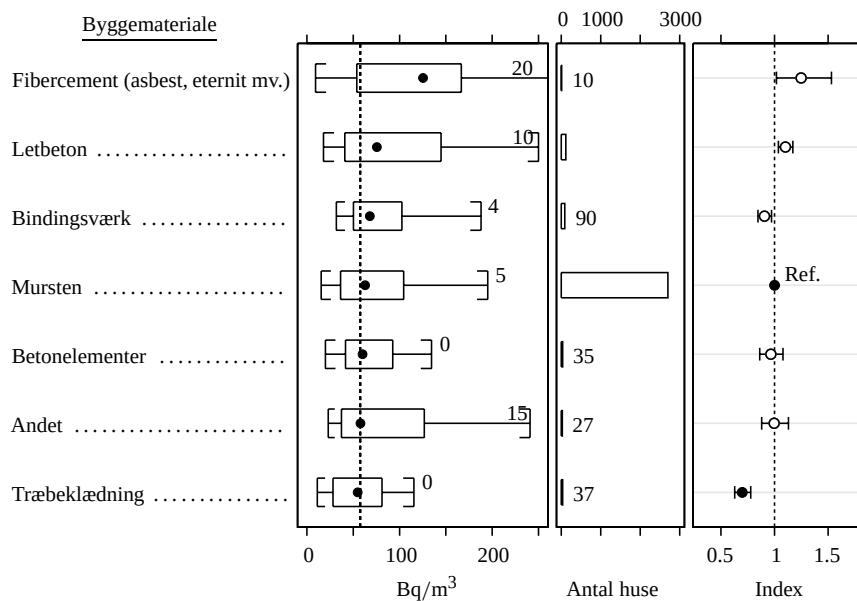
Da (eksempelvis) huse med fuld kælder ikke er jævnt fordelt over landet, skal det nu undersøges om den sammenhæng mellem kælderforhold og indendørs radon, der blev observeret for Danmark som helhed (se Figur 25) også gælder indenfor de enkelte jordarter. Figur 29 viser, at det gør den stort set: Eksempelvis er der for næsten alle jordarter en klar tendens til, at huse med fuld kælder har radonværdier, som er lavere end dem man finder i terrændækhuse. Indholdet fra Figur 29 kan med fordel omorganiseres, som vist i Figur 30. Her ses det igen, at huse med fuld kælder har en tendens til at have et lavt radonniveau uanset hvilken jordart husene ligger på. Det er samtidig interessant, at for huse med fuld kælder er der en ret begrænset variation fra jordart til jordart. Eksempelvis

er der ingen signifikant forskel ($P = 0.08$) mellem ferskvandstørv (FT) og moræneler (ML). En envejs variansanalyse af logaritmen til radonkoncentrationen mod jordarten:

$$\log(Rn) \sim \text{Jordart} \quad (3)$$

viser dog, at det kan afvises, at alle jordarterne har ens gennemsnitlige radonkoncentrationer for huse med fuld kælder ($P < 0.0002$). Det fremgår desuden af Figur 30, at sammenhængen mellem jordart og indendørs radon er betydeligt mere udpræget for terrændækhuse. Figur 31 viser, at tilsvarende forhold gør sig gældende, hvis man betragter variabiliteten fra amt til amt på moræneler (sammenlign med Figur 17).

4.7 Byggemateriale

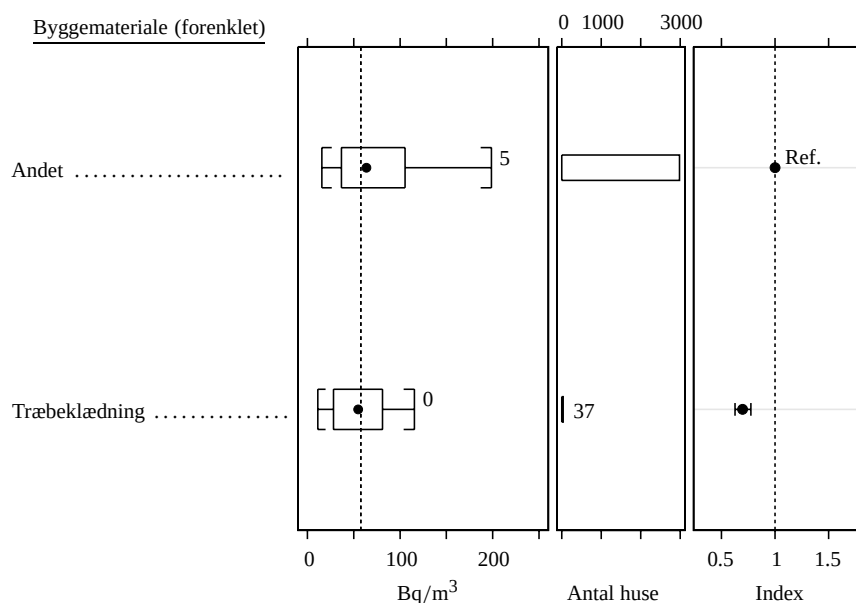


Figur 32. Undersøgelsens resultater klassificeret efter ydervæggens byggemateriale iht. BBR. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

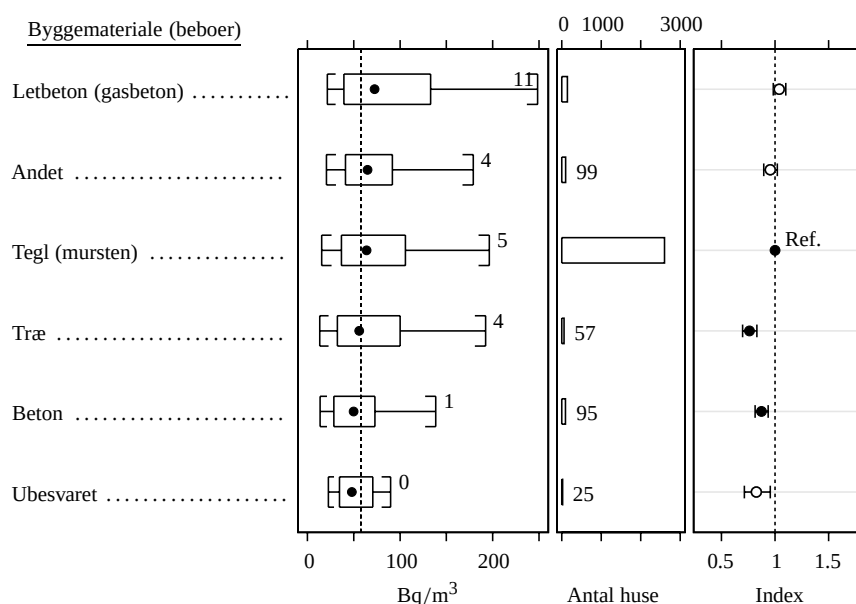
Betydningen af husenes (dvs. ydervæggens) byggemateriale belyses i Figur 32. Oplysningerne stammer fra BBR. Faktoren kunne tænkes at have betydning for radonkoncentrationen, da radon afgasser fra de fleste byggematerialer [J76, J80, U80, U84, A99a]. Af histogrammet fremgår det, at hovedparten af husene er murstenshuse. Figuren viser, at der er en vis forskel mellem grupperne. De laveste værdier findes i huse med træbeklædning, og de højeste findes i huse baseret på plader af fibercement. Kun træbeklædning har en signifikant virkning i forhold til referenceklassen (murstenshusene). Bemærk eksempelvis, at der ikke er signifikant radonmæssig forskel på huse af beton (letbeton eller betonelementer) og mursten. Figur 33 viser et faktordiagram, hvor der kun skelnes mellem træbeklædning og andet.

4.8 Byggemateriale (beboeroplysninger)

Også beboerne blev spurgt om beskaffenheden af husenes byggematerialer. Resultatet fremgår af Figur 34. Det ses, at træhusene (alt andet lige) har radonkoncentrationer, som i gennemsnit ligger omkring 20 % under værdierne for teglhuse. Forskellen er signifikant. Det er også en signifikant forskel mellem klassen beton og teglhusene. Der kan ikke påvises radonmæssige forskelle mellem de andre byggematerialer og teglhusene.



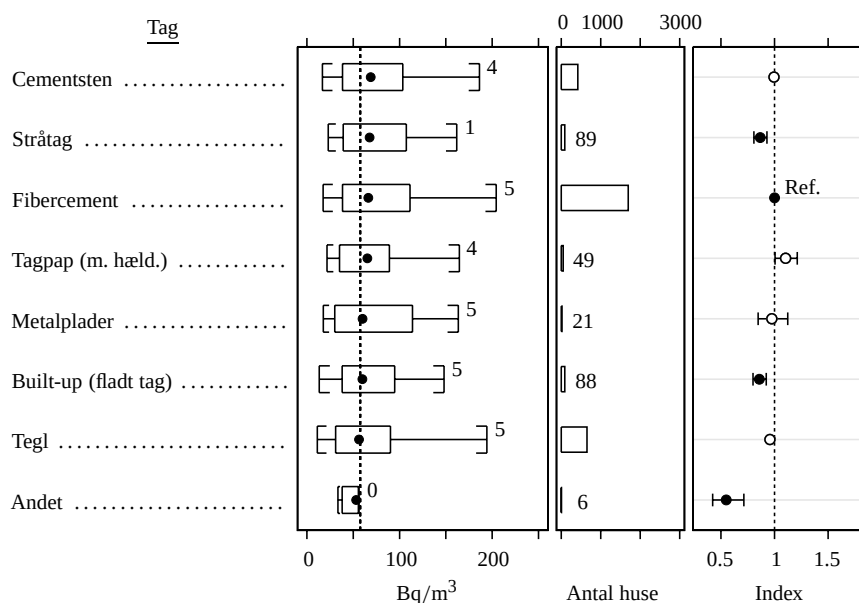
Figur 33. Undersøgelsens resultater klassificeret efter om byggemateriale iht. BBR er træbeklædning eller ej. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.



Figur 34. Undersøgelsens resultater klassificeret efter byggemateriale iht. beboernes egne oplysninger. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

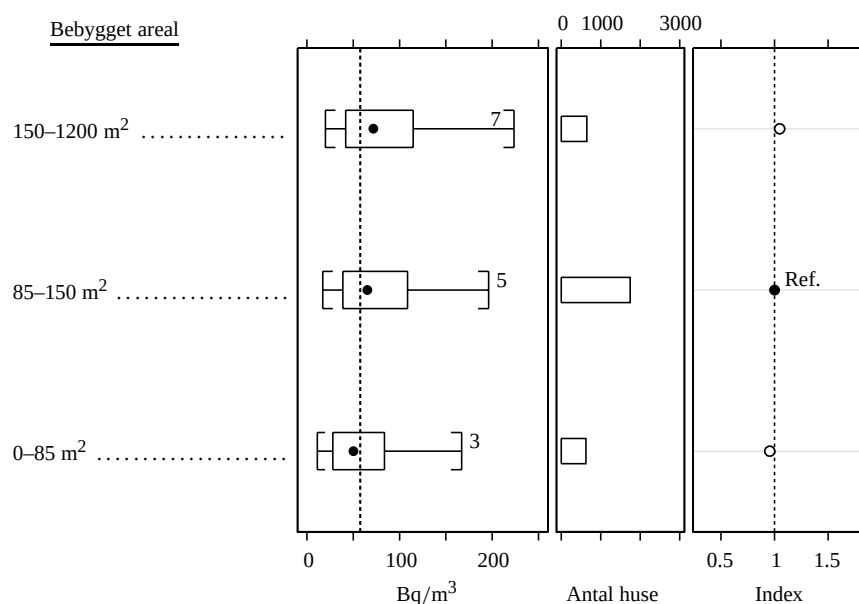
4.9 Tagkonstruktion

Figur 35 viser sammenhængen mellem tagkonstruktion og radon. Hovedparten af husene har tag af fibercement. Grupperne *stråtag*, *built-up (fladt tag)* og *andet* adskiller sig signifikant fra klassen *fibercement*. Årsagen til dette er ukendt. En mulighed er, at tagkonstruktionen har indflydelse på de trykgenererende mekanismer i huset (mindre “skorstens-effekt” for aftrækskanaler i huse med fladt tag og anden indflydelse af vind-inducerede tryk), hvilket videre kunne have betydning for radonniveauet.



Figur 35. Undersøgelsens resultater klassificeret efter husenes tagkonstruktion. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

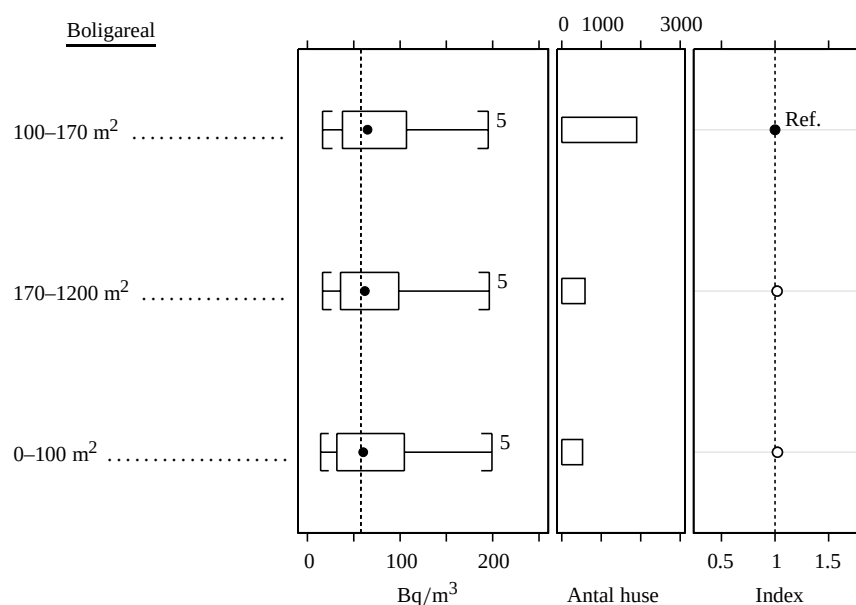
4.10 Bebygget areal



Figur 36. Undersøgelsens resultater klassificeret efter bebygget areal. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

Faktoren *bebygget areal* er et mål for kontaktfladen mellem hus og jord. Boxplottet til venstre i Figur 36 viser, at der er en tendens til at radonkoncentrationen stiger med det bebyggede areal. Sammenhængen svarer til, at radonkoncentrationen i gennemsnit stiger omkring 10 Bq/m³ pr. 100 m² bebygget areal. Hvis der foretages korrektion for andre faktorer, kan det imidlertid ikke påvises, at der er nogen forskel mellem huse i arealklasserne i Figur 36. Dette ses af regressionskoefficienterne i højre side af figuren. Disse resultater indgår i diskussionen side 67.

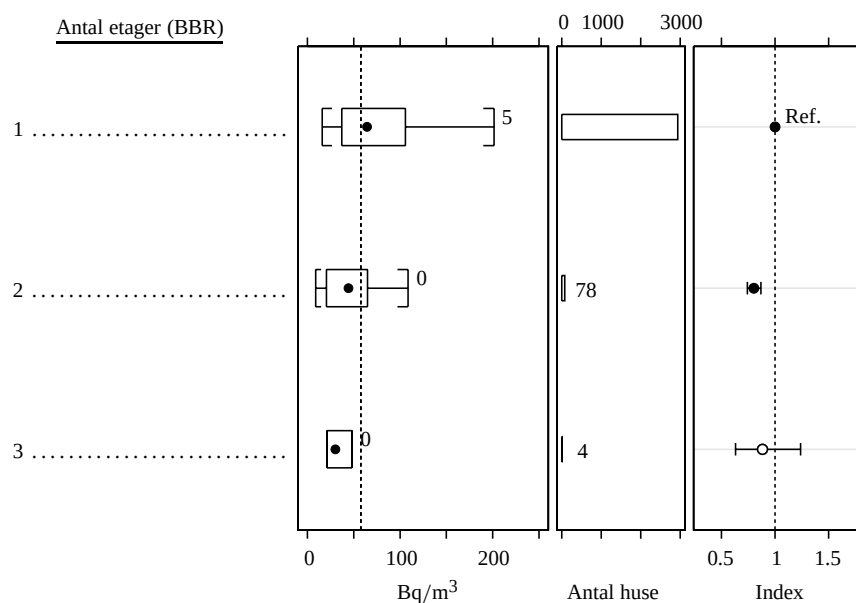
4.11 Boligareal



Figur 37. Undersøgelsens resultater klassificeret efter boligareal. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

Faktoren *boligareal* angiver, hvor stort et areal i huset der er beboeligt. Hvis der er flere etager i huset, vil disse hver bidrage til boligarealet. Derimod vil f.eks. uisolerede loft- og kælderrum ikke indgå. Figur 37 viser, at der ikke er nogen sammenhæng mellem boligareal og radonkoncentration.

4.12 Antal etager

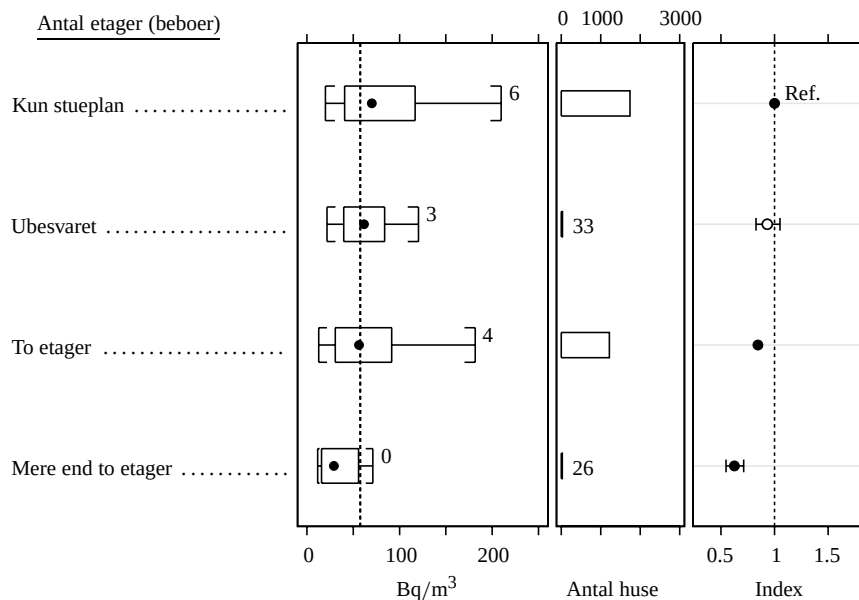


Figur 38. Undersøgelsens resultater klassificeret efter antallet af etager iht. BBR. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

BBR's oplysninger om husenes antal af etager fremgår af Figur 38. Det skal understre-

ges, at tagetager ikke indgår i BBR's opgørelse. Kun 82 huse har mere end en etage. Det ses også af figuren, at der er en klar sammenhæng mellem radon og antallet af etager: Jo flere etager, jo mindre radon. Eksempelvis ses det, at ingen af husene med to etager (eller mere) har radonkoncentrationer over 200 Bq/m³. Effekten af dosimeterplaceringen behandles nærmere i afsnit 4.14.

4.13 Antal etager (beboeroplysning)



Figur 39. Undersøgelsens resultater klassificeret efter antallet af etager iht. beboerne. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

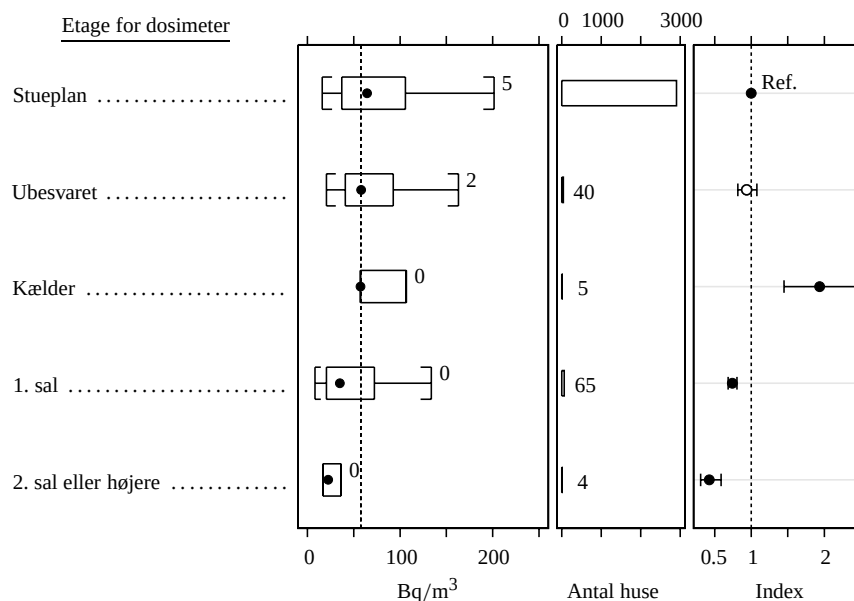
Beboerne har i spørgeskemaundersøgelsen angivet antallet af etager i deres hus. Resultaterne fremgår af Figur 39. 1742 huse er angivet til at være etplanshuse, 1217 huse har to etager, og 26 huse har mere end to etager. Det ses, at disse oplysninger adskiller sig væsentligt fra dem der er opført i BBR (se Figur 38), hvilket skyldes, at tagetager ikke indregnes som "normaletager" i BBR. Sammenhængen mellem radon og husenes antal af etager (som angivet af beboerne) er dog som for de BBR-baserede data: Radonkoncentrationen falder med antallet af etager.

4.14 Etage for dosimeter

Som nævnt i afsnit 2.2 blev alle undersøgelsens radonmålinger foretaget i husenes (primære) opholdsstue. For de fleste huse i undersøgelsen betyder dette, at radonmålingen er foretaget i det såkaldte stueplan. For huse med kælder eller mere end en etage kan radonmålingen imidlertid være foretaget i andre dele af huset end stueplanet. Radonmålingernes fordeling mellem de forskellige planer i husene fremgår af Figur 40. Det ses, at der i 74 tilfælde blev foretaget radonmålinger andre steder end stueplanet. Det ses, at målingerne på første sal er væsentligt lavere end målingerne i stueplanet.

Det bemærkes, at der ikke er konsistens mellem oplysningerne for dosimeterplacering og husenes antal af etager. Således har 11 beboere meddelt, at målingen blev foretaget på første sal og at huset var et etplanshus.

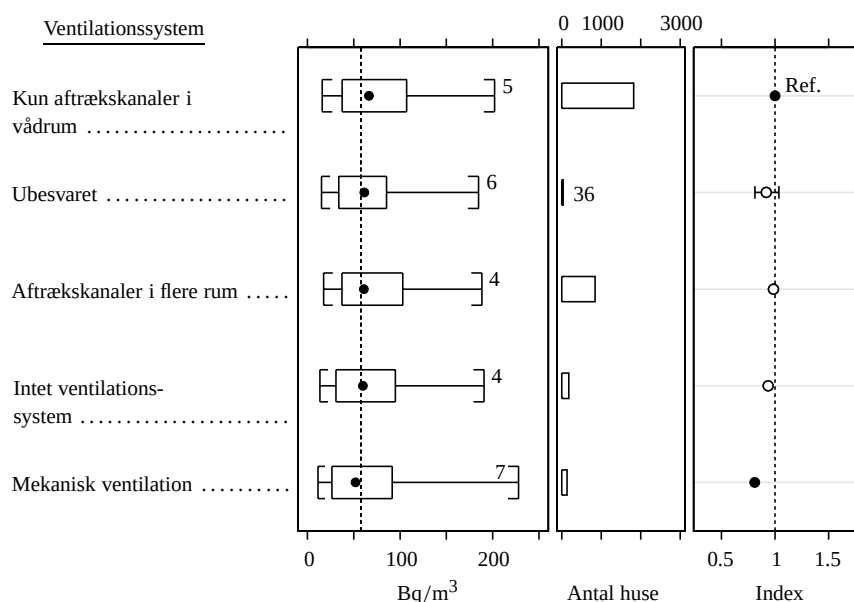
Resultaterne fra regressionsanalysen (til højre i Figur 40) kan tolkes på en særlig måde. Det er muligt, at opfatte faktoren *etage for dosimeter* som en korrektion for et måleteknisk problem. Eksempelvis kan det hævdes, at det havde været bedst om alle målinger var foretaget i stueplanet (uanset om den primære opholdsstue er der). Eksempelvis viser Fi-



Figur 40. Undersøgelsens resultater klassificeret efter placeringen af dosimeteret. Bemærk, at indexskalaen er udvidet i forhold til de andre faktordiagrammer. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

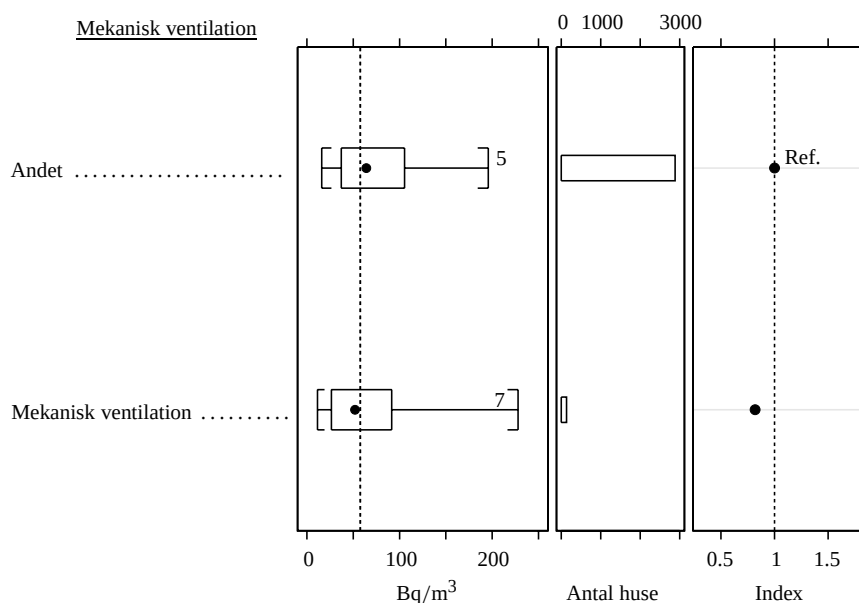
Figur 40, at dersom man foretager målingen i kælderen, da opnås i gennemsnit en dobbelt så høj værdi, som hvis man havde målt i stueplanet. Disse resultater indgår i regressionsanalysen, som således hjælper til at standardisere materialet. På den måde forstyrer de høje “kældermålinger” ikke det forhold, at huse med fuld kælder i gennemsnit har en væsentlige lavere radonkoncentration (i stueplanet) end eksempelvis huse uden kælder (se afsnit 4.6).

4.15 Ventilationssystem



Figur 41. Undersøgelsens resultater klassificeret efter husenes ventilationssystem iht. oplysning fra beboerne. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

Figur 41 viser, at hovedparten af husene (i alt 1819 huse) kun har aftrækskanaler i vådrum. Disse huse har den højeste gennemsnitlige radonkoncentration. Det laveste gennemsnit forekommer for gruppen af huse med mekanisk ventilationssystem. Regressionsanalysen viser, at forskellen er signifikant. De andre ventilationssystemer adskiller sig derimod ikke signifikant fra referenceklassen. Dette viser, at en mere simpel klassifikation kan anvendes. Hvis der kun skelnes mellem *mekanisk ventilation* og *andet*, opnås resultatet i Figur 42. Det bemærkes, at 7 % af husene med mekanisk ventilation har radonkoncentrationer over 200 Bq/m³.



Figur 42. Undersøgelsens resultater klassificeret efter om husene har mekanisk ventilationssystem eller ej. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

4.16 Udluftning (soveværelse)

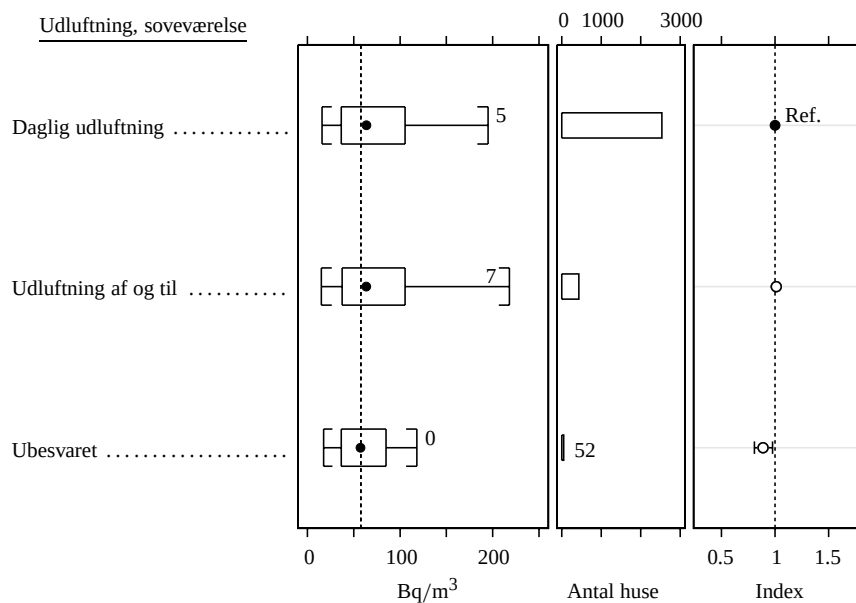
Beboernes oplysninger om graden af udluftning i soveværelset er vist i Figur 43. Hovedparten af beboerne (84 %) har svaret, at der foretages daglig udluftning. Figuren viser, at der ingen sammenhæng er mellem de givne oplysninger om udluftning og husenes radonkoncentration.

4.17 Udluftning (stue)

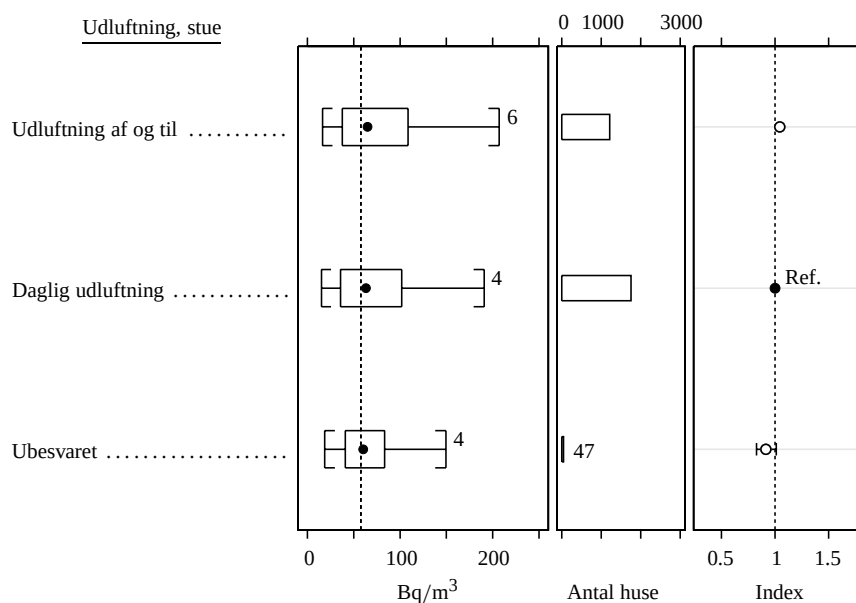
Beboernes oplysninger om graden af udluftning i stuen er vist i Figur 44. Hovedparten af beboerne (58 %) har svaret, at der foretages daglig udluftning. Dette er noget mindre end for soveværelset (se det forudgående afsnit). Der er ingen sammenhæng mellem de givne oplysninger om udluftning i stuen og husenes radonkoncentration.

4.18 Hustype

Iht. BBR kan husene opdeles i tre typer (eller anvendelser) som vist i Figur 45. Det ses, at hovedparten af husene (75 %) er fritliggende enfamiliehuse. Gruppen af række-, kæde- eller dobbelthuse, som omfatter 11 % af husene, har den laveste gennemsnitlige radonkoncentration. Der er ingen signifikant forskel mellem stuehuse til landbrugsejendomme og fritliggende enfamiliehuse.



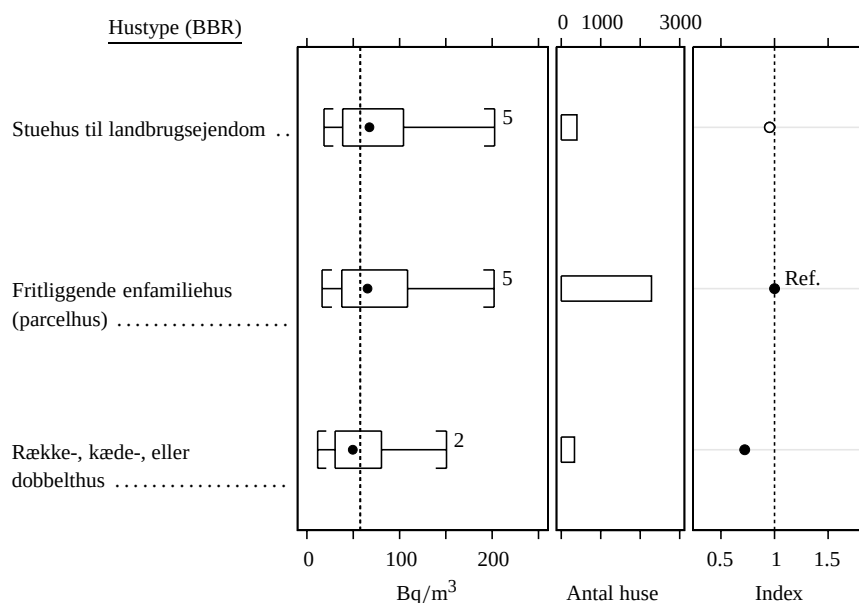
Figur 43. Undersøgelsens resultater klassificeret efter graden af udluftning af soveværelset iht. beboernes egne oplysninger. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.



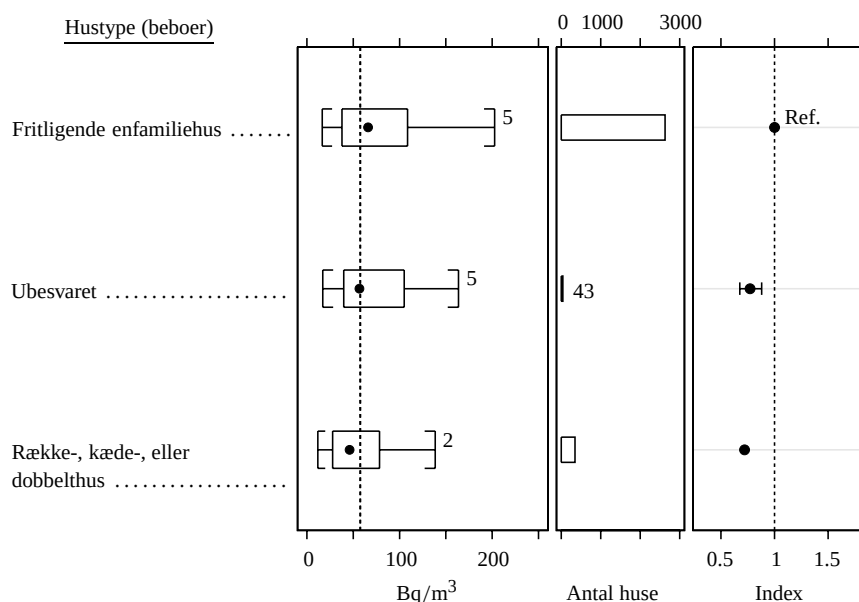
Figur 44. Undersøgelsens resultater klassificeret efter graden af udluftning af stuen iht. beboernes egne oplysninger. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

4.19 Hustype (beboeroplysninger)

Også beboerne har oplyst hvilken slags hus de bor i. Hovedparten af husene (87 %) er fritliggende enfamiliehuse. Det svarer godt til de resultater, der blev oplyst fra BBR (se det forudgående afsnit), dersom man regner stuehuse til landbrugsejendomme som enfamiliehuse. Figur 46 viser, at gruppen af række-, kæde- eller dobbelthuse har en signifikant lavere radonkoncentration end de fritliggende enfamiliehuse.



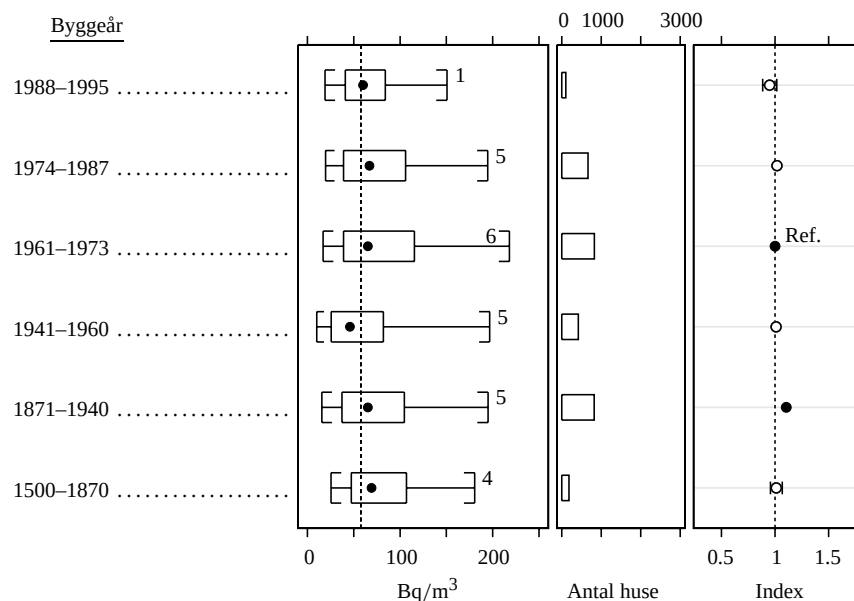
Figur 45. Undersøgelsens resultater klassificeret efter hustype iht. oplysninger fra BBR. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.



Figur 46. Undersøgelsens resultater klassificeret efter hustype iht. beboernes egne oplysninger. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

4.20 Byggeår

Ifølge oplysningerne fra BBR er husene opført i perioden fra år 1577 til 1995. Figur 47 viser undersøgelsesresultaterne fordelt på seks perioder. Hovedparten af husene (i alt 96 %) er bygget efter 1850. Figur 48 viser denne periode i detaljer. Det ses, at fordelingen starter med et minimum omkring 1850. For tiden derfra og frem til omkring 1940 forekommer der en svag stigning. Der er forholdsmæssigt mange huse fra år 1900 (i alt 101 huse), hvilket må formodes at bero på en klassifikationsfejl. Til sammenligning er der kun to huse fra år 1899 og tre fra år 1901. Omkring 2. verdenskrig optræder der et minimum i fordelingen. Antallet af huse stiger derefter kraftigt i efterkrigstiden og frem til begyndelsen af 1970'erne. I perioden derfra og frem til 1995 forekommer der et faldende antal huse. Husenes geografiske fordeling er vist i Figur 49.



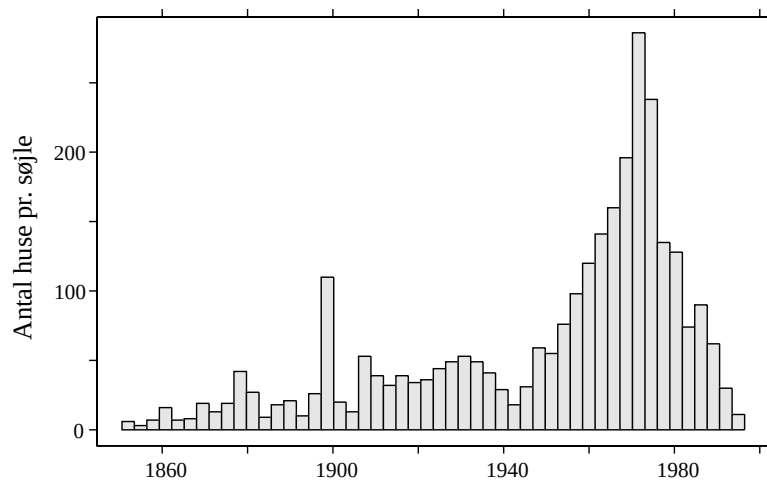
Figur 47. Undersøgelsens resultater klassificeret efter husenes byggeår iht. BBR. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

Figur 47 viser, at huse fra perioden 1941 til 1960 i gennemsnit har en radonkoncentration, som ligger væsentlig under landsgennemsnittet (se boxplottet i venstre del af figuren). Årsagen er imidlertid, at denne periode har en forholdsvis stor andel af huse med fuld kælder (se Figur 26). Da “kældereffekten” indgår separat i regressionsanalysen er der ingen “alderseffekt” at spore i indexplottet i højre del af Figur 47. Tilsvarende bemærkes det, at der heller ikke er nogen alderseffekt for husene fra perioden 1500–1870 til trods for at denne periode har den største gennemsnitlige radonkoncentration. Årsagen formodes at være, at husene for denne periode primært er i den østlige del af Danmark (se Figur 49). Denne “landsdelseffekt” er fjernet af regressionsanalysen.

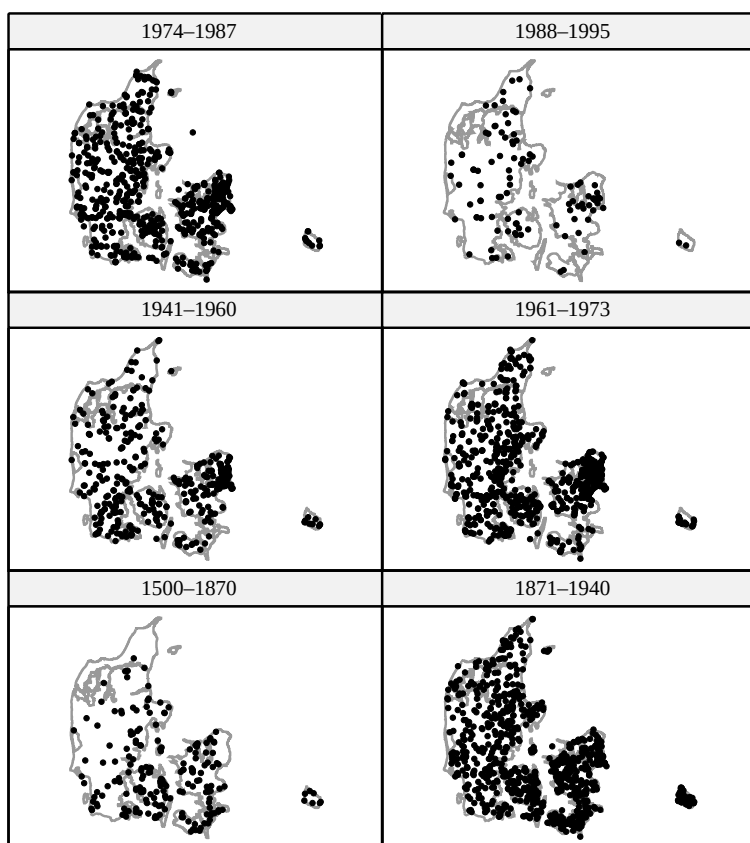
Regressionsanalysen udpeger kun en enkelt forskel: Perioden 1871–1940 er signifikant forskellig fra referenceklassen 1961–1973. Index er dog kun omkring 1.1. Det kan derfor konkluderes, at radonkoncentrationen stort set er uafhængig af husenes alder. En “alderseffekt” kunne ellers forventes af flere årsager. Eksempelvis kunne man forestille sig en fysisk sammenhæng mellem alder og radon pga. revnedannelse i huskonstruktionen. Revnedannelse i gulvkonstruktionen skulle betyde et forhøjet radonniveau for ældre huse. Omvendt skulle utætheder andre steder i klimaskærmen give et bedre luftskifte således, at radonkonstruktionen for de ældre huse skulle være lavest. Figur 46 viser, at der ikke er nogen sådan simpel sammenhæng mellem byggeår og radonkoncentration.

År 1987

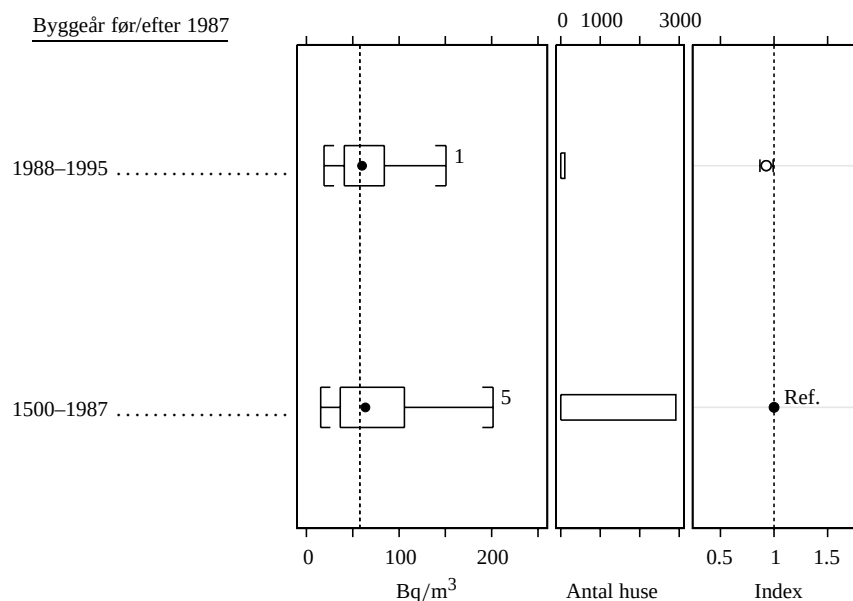
Perioderne i Figur 47 er primært valgt ud fra historiske eller økonomiske skel i danmarkshistorien. Året 1987, som afgrænser den sidste periode, er dog valgt fordi den første landsdækkende radonundersøgelse blev offentliggjort dette år, og fordi den daværende Byggestyrelse udsendte en pjeces om radon [B87]. I tiden derefter har der været en forøget opmærksomhed omkring radon i Danmark, bl.a. er der kommet anbefalinger [B88] og krav om at bygge “radonsikkert” [Bo98]. Hvis danskerne faktisk bygger “radonsikkert”, og hvis tiltagene er effektive, kan det forventes, at disse huse har et lavere radonniveau end andre. For at belyse dette spørgsmål bedst muligt foretages en forenklet klassificering, hvor husene deles i to grupper svarende til tiden før og efter 1987. Gruppen af nyere huse består af 103 huse bygget i perioden 1988 til 1995. Middelbyggeåret for denne gruppe er 1990. Figur 50 viser, at gruppen af nyere terrændækshuse har en marginalt lavere gennemsnitlig radonkoncentration end husene fra før 1987. Det er muligvis mere interessant at bemærke, at der blandt de nye huse kun er 1 % med niveauer over 200 Bq/m^3 mod 5 % for de ældre huse. Regressionsanalysen viser imidlertid, at når alt tages i betragtning, så



Figur 48. Histogram over husenes byggeår (huse bygget før 1850 indgår ikke).



Figur 49. Kort med geografisk fordeling af husene opdelt efter deres byggeår.



Figur 50. Undersøgelsens resultater klassificeret efter om husenes byggeår (BBR) er før eller efter 1987. Faktordiagrammet er forklaret nærmere side 21.

kan det ikke påstås, at der er en signifikant radonmæssig forskel mellem huse før og efter 1987, som skyldes alderen.

4.21 Regressionsmodel

Som vist i de forudgående afsnit afhænger radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse på kompliceret vis af en række faktorer. Et centralt punkt i behandlingen har været de såkaldte faktordiagrammer, hvori der indgår resultater fra en regressionsanalyse. Formålet med det følgende er at redegøre for regressionsanalysen. Udgangspunktet er spørgsmålet:

Hvad er radonkoncentrationen i et bestemt hus, hvor der ikke er foretaget en radonmåling, men hvor man til gengæld har kendskab til simple oplysninger om huskonstruktion og geologi?

Som det vil fremgå, findes der ikke noget reelt alternativ til en egentlig radonmåling, så hvis man vil kende radonkoncentrationen, må man måle den. Ikke desto mindre kan man naturligvis forsøge, at benytte resultaterne fra nærværende undersøgelse til at lave en simpel vurdering: Hvis man bebor et hus, som på væsentlige punkter matcher huse fra undersøgelsen, er det jo nærliggende at gætte på, at radonkoncentrationen i det pågældende hus vil ligne den, som blev fundet i undersøgelsen. En systematisk metode til at foretage vurderingen hedder *regressionsanalyse*.

Modelformulering

Først må der opstilles en model. Modellen skal kæde radonkoncentrationen sammen med de observerede faktorer. Hver faktor opdeles i en række klasser, og hver klasse tildeles en regressionskoefficient (eller et index) svarende til faktorens virkning. Koefficienterne vælges herefter således, at der opnås den bedste overensstemmelse mellem model og undersøgelsesresultaterne (altså de 3018 radonmålinger). Den regressionsmodel, som anvendes, kan udtrykkes som følgende produkt:

$$R_n = \beta_0 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 \cdot \beta_5 \cdot \beta_6 \cdot \beta_7 \cdot \beta_8 \cdot \beta_9 \quad (4)$$

hvor R_n er husets radonkoncentration, og β_0 er en konstant (uanset hvilket hus, som betragtes). β_1 – β_9 afhænger derimod hver især af de ni faktorer, som indgår i modellen: (1) kælderforhold, (2) landsdel, (3) jordart, (4) hustype, (5) antal etager, (6) grundvand, (7) etage for dosimeter, (8) mekanisk ventilation, og (9) træ som byggemateriale. Faktoren *kælderforhold* styrer således værdien af β_1 , ligesom faktoren *landsdel* styrer β_2 etc. Årsagen til at netop disse faktorer indgår behandles nærmere side 52.

Tilpasningen af modellen til de 3018 radonmålinger foregår ved såkaldt lineær regressionsanalyse baseret på mindste kvadraters metode [Mat00] af de logaritme-transformerede data. Metoden har tidligere været anvendt ved udenlandske radonundersøgelser [Mä90, Gu92, V94, Mä98, G00]. Symbolsk kan regressionen udtrykkes som:

$$\log(Rn) \sim \text{Kælderforhold} + \text{Landsdel} + \text{Jordart} + \dots \quad (5)$$

De tilpassede regressionskoefficienter fremgår af Tabel 9. Eksempelvis ses det af tabellen, at β_8 antager værdien 0.82, dersom huset har mekanisk ventilation (ellers er β_8 lig 1). Anvendelsen af regressionsmodellen kan illustreres med et par eksempler:

Eksempel 1 En beboer oplyser følgende om sit hus: Huset har fuld kælder og ligger i Nordjylland. Jordarten på grunden er saltvandssand (HS). Huset er et fritliggende enfamiliehus i et plan. Afstanden til grundvandsspejlet er ukendt, der er ingen mekanisk ventilation, og huset har ydervægge af tegl. Jf. aflæsning af Tabel 9 ud for de nævnte klasser fås følgende beregning:

$$\begin{aligned} Rn &= 105 \text{ Bq/m}^3 \cdot 0.42 \cdot 0.53 \cdot 0.52 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \\ &= 12 \text{ Bq/m}^3 \end{aligned} \quad (6)$$

Det forventes altså, at huset vil have en radonkoncentration omkring 12 Bq/m^3 . Usikkerheden ved modelberegningen er omkring en faktor 2. Det vil sige, at hovedparten (68 %) af sådanne huse forventes at ligge i intervallet $6\text{--}24 \text{ Bq/m}^3$ (thi $12/2 = 6$ og $12 \cdot 2 = 24$). Som en simpel test af resultatet undersøges det, om nogle af de 3018 huse i undersøgelsen matcher beboerens hus (dvs. husene skal have fuld kælder, og de skal ligge på saltvandssand i Nordjylland etc.). Det viser sig, at et enkelt hus matcher beskrivelsen. Dette hus har en radonkoncentration på 10 Bq/m^3 , hvilket svarer til det forventede iht. regressionsmodellen. Det bemærkes, at regressionskoefficienterne ikke afhænger væsentligt af dette ene hus.

Eksempel 2 En anden beboer giver følgende oplysninger om sit hus: Der er tale om et etplans fritliggende enfamiliehus med terrændæk. Huset ligger på moræneler på Bornholm. Afstanden til grundvandsspejlet er ukendt, der er ingen mekanisk ventilation, og huset har ydervægge af tegl. Jf. aflæsning af Tabel 9 ud for de nævnte klasser fås følgende beregning:

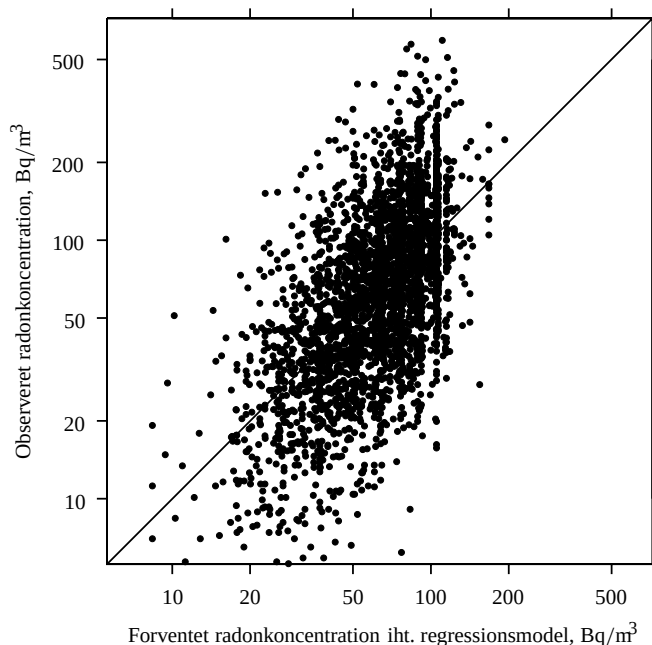
$$\begin{aligned} Rn &= 105 \text{ Bq/m}^3 \cdot 1 \cdot 1.59 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \\ &= 167 \text{ Bq/m}^3 \end{aligned} \quad (7)$$

Det forventes altså, at huset vil have en radonkoncentration omkring 170 Bq/m^3 . Igen er usikkerheden ved modelberegningen omkring en faktor 2. Det vil sige, at hovedparten (68 %) af sådanne huse forventes at ligge i intervallet $85\text{--}340 \text{ Bq/m}^3$ (thi $170/2 = 85$ og $170 \cdot 2 = 340$). Hvis vi gennemsøger alle 3018 huse, viser det sig, at ni huse matcher ovenstående beskrivelse. Disse huse har i gennemsnit (geometrisk middel) en radonkoncentration på 160 Bq/m^3 .

I disse to eksempler er der foretaget sammenligninger mellem modelforudsigelser og faktiske observationer. Dette kan gøres for alle 3018 målinger, som vist i Figur 51. Det ses, at det på ingen måde er muligt at tilpasse modellen så den i alle tilfælde giver en nøjagtig beskrivelse af data. Dette fremgår af den betydelige variation omkring den indtegnede 1:1-linie. Variationen svarer til den tidligere nævnte usikkerhed på en faktor 2. Eksempelvis ses det, at modellen forudsiger, at en hel række af huse skal have radonkoncentrationer omkring 100 Bq/m^3 . Det fremgår af figuren, at de faktiske målinger fordeler sig fra omkring 20 til 500 Bq/m^3 . Hovedparten ligger dog mellem 50 og 200 Bq/m^3 . Den forklarede variabilitet (R^2 for $\log(Rn)$ -regressionen) er omkring 35 %. Det vil sige, at modellen kun redegør for en ret begrænset del af variabiliteten fra hus til hus. Det skal her bemærkes, at alle radonkoncentrationer (høje såvel som lave) indgår med samme vægt i regressionen.

Tabel 9. Regressionskoefficienter for modellen i ligning 4. For hver faktor er der en referenceklasse, hvor koefficienten er sat til 1. De øvrige klassers virkning er målt i forhold til referenceklassen. β_0 er en konstant med enheden Bq/m³. De øvrige koefficienter er dimensionsløse. De angivne usikkerheder svarer til en standardafvigelse på resultatet.

Koeff.	Faktor	Klasse	Værdi	Faktordiagram
β_0	Konstant	Konstant	105±3	
β_1	Kælderforhold	Ubesvaret	1.15±0.12	Figur 25
		Ingen kælder	1	-
		Delvis kælder	0.87±0.03	-
		Andet	0.85±0.09	-
		Krybekælder	0.71±0.03	-
		Fuld kælder	0.42±0.02	-
β_2	Landsdel	Bornholm	1.59±0.12	Figur 12
		Fyn	1.02±0.04	-
		Sjælland	1	-
		Østjylland	0.87±0.03	-
		Himmerland	0.80±0.04	-
		Thy	0.74±0.05	-
		Vestjylland	0.58±0.02	-
		Nordjylland	0.53±0.04	-
β_3	Jordart	Moræneler (ML)	1	Figur 14
		Smeltevandssgrus (DG)	0.99±0.07	-
		Saltvandssand (YS)	0.92±0.10	-
		Morænesand (MS)	0.89±0.08	-
		Smeltevandssand (DS)	0.83±0.03	-
		Ferskvandssand (TS)	0.82±0.04	-
		Andet	0.78±0.04	-
		Ferskvandstørv (FT)	0.58±0.05	-
		Saltvandssand (HS)	0.52±0.04	-
		Flyvesand (ES)	0.42±0.04	-
β_4	Hustype	Fritliggende enfamiliehus	1	Figur 46
		Ubesvaret	0.77±0.11	-
		Række-, kæde- eller dobbelthus	0.72±0.03	-
β_5	Antal etager	Kun stueplan	1	Figur 39
		Ubesvaret	0.93±0.12	-
		To planshuse	0.84±0.02	-
		Mere end to etager	0.62±0.09	-
β_6	Grundvand	Dybere end 2m	1.09±0.03	Figur 24
		Andet	1	-
		0–1m	0.79±0.04	-
β_7	Etag for dosimeter	Kældereren	1.94±0.65	Figur 40
		Stueetage	1	-
		Ubesvaret	0.94±0.14	-
		1. sal	0.74±0.06	-
		2. sal eller højere	0.43±0.16	-
β_8	Mekanisk ventilation	Andet	1	Figur 42
		Mekanisk ventilation	0.82±0.05	-
β_9	Træ som byggemateriale	Andet	1	Figur 33
		Træbeklædning	0.70±0.08	-



Figur 51. Sammenligning mellem de observerede og beregnede radonkoncentrationer. Hvis regressionsmodellen helt kunne redegøre for målingerne ville alle punkter ligge på den rette 1:1-linie. Der anvendes logaritmiske skalaer.

Rangordning af faktorerne

Regressionsmodellen kan også anvendes til at foretage en rangordning af faktorerne. Som nævnt forklarer modellen med de ni faktorer 35 % af variabiliteten. Hvis vi fjerner en enkelt faktor fra modellen, falder den forklarede variabilitet. Hvis eksempelvis landsdelsfaktoren fjernes, da falder den forklarede variabilitet til 27.8 %. I den forstand kan man sige, at faktoren *landsdel* forklarer $35 \% - 27.8 \% = 7.2 \%$ af variabiliteten. Tabel 10 viser, at husenes kælderforhold er den faktor, som således bedst forklarer variationen i de danske koncentrationer. Faktoren forklarer 11.1 %. Derefter kommer *landsdel*, *jordart*, *hustype* og de andre faktorer i tabellen. Det skal bemærkes, at dersom man summerer enkeltbidragene til den forklarede variabilitet, da får man 28.1 % (og altså ikke 35 %, som man måske umiddelbart kunne forvente). Det skyldes, at materialet ikke er balanceret [Gu92] som i et planlagt laboratorieforsøg, hvor der er lige mange målinger for alle kombinationer af de undersøgte faktorer.

Tabel 10 viser også resultaterne af tests af om den forklarede variabilitet er signifikant eller ej. Det ses, at alle de faktorer, som er medtaget i modellen er stærkt signifikante. De faktorer, som ikke bidrager signifikant til at "forklare" undersøgelsesresultaterne, indgår ikke i modellen. Dette gælder eksempelvis oplysning om folks udluftningsvaner i stue eller soveværelse.

De ni faktorer i modellen er valgt blandt alle tilrådighedværende faktorer under hensyntagen til (1) hvor godt modellen kan tilpasses til målingerne og (2) modellens kompleksitet (dvs. antallet af koefficienter). I den valgte model indgår i alt 35 uafhængige koefficienter (de 44 koefficienter i Tabel 9 minus de 9 ettaller for referenceklasserne). Det er klart, at en mere kompleks model ville kunne tilpasses bedre til målingerne. Eksempelvis ville en model med 3018 koefficienter kunne bringes til fuldstændig at matche målingerne. En sådan model ville dog ikke være anvendelig til ret meget.

Kriterium for valg af model

Tabel 10. Rangordning af faktorerne i regressionsmodellen i ligning 4. Tabellens indhold er nærmere forklaret i teksten.

Faktor	Antal klasser	% forklaret variabilitet	Signifikans-niveau
1. Kælderforhold	6	11.1	< 0.0001
2. Landsdel	8	7.2	< 0.0001
3. Jordart	10	5.1	< 0.0001
4. Hustype	3	1.7	< 0.0001
5. Antallet af etager	4	1.1	< 0.0001
6. Grundvand	3	0.8	< 0.0001
7. Etage for dosimeter	5	0.6	< 0.0001
8. Mekanisk ventilation	2	0.3	0.0006
9. Træ som byggemateriale	2	0.2	0.0007
Sum af ovenstående		28.1	
Alle 9 faktorer (samtidig)		35.0	

Korrespondance til faktordiagrammerne

Som nævnt indgår resultaterne af regressionsanalysen i faktordiagrammerne i afsnit 4.1 til 4.20: I hvert faktordiagram er der angivet et index for de enkelte klasser. For de ni faktorer, som indgår i regressionsmodellen, er disse index ganske enkelt lig regressionskoefficienterne i Tabel 9. Betragt eksempelvis faktordiagrammet i Figur 42, side 43. Det ses, at index for klassen *mekanisk ventilation* er afsat ved 0.82 (omend en så nøjagtig aflæsning næppe er mulig). Samme resultat fås ved aflæsning af Tabel 9 for β_8 .

Hvad så med de faktorer, som ikke indgår i modellen? Hvordan er index i faktordiagrammerne beregnet for dem? For at estimere virkningen af faktorer, som ikke indgår i hovedmodellen med de ni faktorer, er der lavet en række modificerede modeller. Eksempelvis er virkningen af faktoreren *udluftning i stue* tilføjet modellen (så den altså indeholder ti faktorer). Derefter er modellen tilpasset til målingerne. De index, som indgår i faktordiagrammet for faktoren, er regressionskoefficienterne for denne modificerede regressionsmodel. I visse tilfælde foretages der dog yderligere en modifikation. Det gælder situationer, hvor to faktorer formodes at dække identiske fysiske forhold. Eksempelvis formodes faktoren *jordart* iht. GEUS's klassifikation at modsvare faktoren *jordart iht. beboernes oplysninger*. Ved beregning af index for sidstnævnte modificeres regressionsmodellen på to måder: Først fjernes faktoren *jordart* iht. GEUS's klassifikation fra modellen, og så tilføjes faktoren *jordart iht. beboernes oplysninger*.

Vekselvirkninger

Der indgår ikke nogen vekselvirkninger i modellen udover dem, som allerede er medtaget derved at alle faktorer multipliceres. Dette skyldes primært ønsket om at have en relativ simpel model med resultater, der kan anvendes til at estimere virkningen (dvs. hovedvirkningen) af de forskellige faktorer. Der er foretaget en undersøgelse af effekten af at udvide regressionsmodellen med førsteordens vekselvirkningsled mellem de tre vigtigste faktorer: *kælderforhold*, *landsdel* og *jordart*. Resultaterne fremgår af Tabel 11. Først betragtes rækken svarende til vekselvirkningsleddet mellem kælderforhold og landsdel. Det ses, at et sådant led svarer til 48 regressionskoefficienter. Et sådant vekselvirkningsled vil altså forøge antallet af koefficienter i modellen betragteligt. Kolonnen *% forklaret variabilitet* angiver bidraget til R^2 . Det ses, at vekselvirkningsleddet mellem kælderforhold og landsdel vil hæve R^2 fra 35.0 % til 35.7 % (altså med 0.7 %, som angivet i tabellen). Den sidste kolonne i tabellen angiver signifikansen for, om udvidelsen af modellen bidrager væsentligt eller ej. Undersøgelsen viser, at der ikke er grundlag for at udvide modellen med et vekselvirkningsled mellem kælderforhold og landsdel ($P > 0.05$). Det kan derimod ikke afvises, at modellen burde udvides med de to andre vekselvirkningsled, idet disse er sig-

nifikante ($P < 0.05$). Den fysiske betydning af resultaterne er, at det altså kan afvises, at den radonmæssige virkning af de forskellige jordarter er ens for huse med forskellige kælderforhold. Dette svarer til observationerne i Figur 30, side 35. Tilsvarende kan det afvises, at den radonmæssige virkning af de forskellige jordarter er ens fra landsdel til landsdel. Dette svarer til observationerne i Figur 19, side 29.

Tabel 11. Konsekvenser af at udvide regressionsmodellen med vekselvirkningsled.

Vekselvirkningsled	Antal klasser	% forklaret variabilitet	Signifikans-niveau
kælderforhold $\times$ landsdel	48	0.7	0.634
kælderforhold $\times$ jordart	60	1.3	0.047
landsdel $\times$ jordart	80	1.7	0.008

5 Flerfamiliehuse

Der er foretaget målinger i 101 flerfamiliehuse. Som for enfamiliehusene er der foretaget en stuemåling i hver bolig. Der er derefter beregnet en "husværdi" på baggrund af resultaterne fra den landsdækkende undersøgelse fra 1987, hvor der blev foretaget samtidige målinger i såvel stue som soveværelse. De beregningstekniske detaljer fremgår af Bilag F.

5.1 Landsværdier

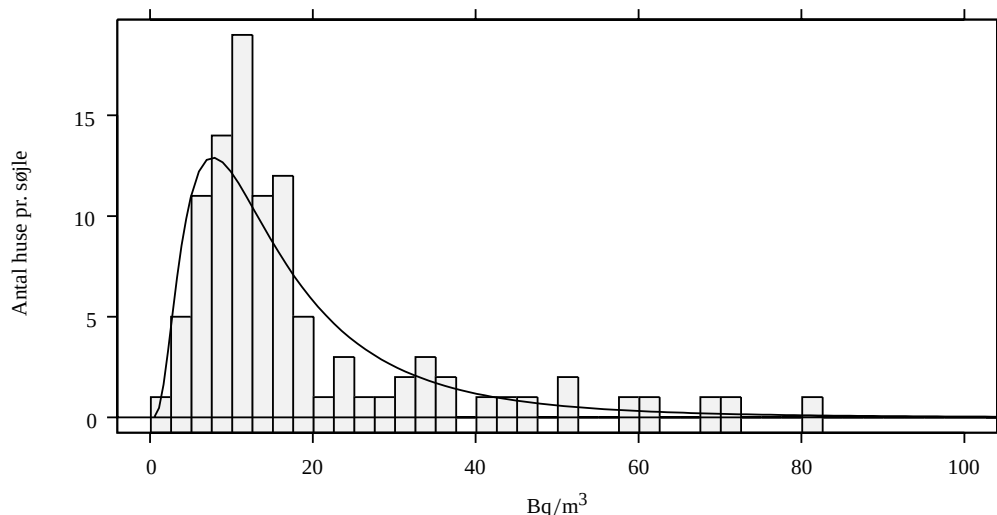
Hovedresultaterne for målingerne i flerfamiliehusene er vist i Tabel 12. Det ses, at korrektionen fra stuemålinger til vurderede husværdier er lille. Eksempelvis er den geometriske middelværdi for stuemålingerne lig 13.2 Bq/m^3 , mens den tilsvarende husværdi er 13.6 Bq/m^3 . Alt det følgende omhandler alene husværdier.

Figur 52 viser fordelingen af resultaterne. Som for enfamiliehusene er resultaterne vel beskrevet ved en logaritmisk normalfordeling. Den højeste husværdi er 80 Bq/m^3 . Der blev således ikke registreret nogen flerfamiliehuse med radonniveauer over 200 Bq/m^3 .

Som beskrevet i afsnit 2.1 er flerfamiliehusene udvalgt tilfældigt i amterne. Som det vil fremgå af det følgende, udviser resultaterne ingen overbevisende variabilitet fra amt til amt. Resultaterne kan derfor umiddelbart tolkes, som værende repræsentative for danske flerfamiliehuse.

Tabel 12. Landsresultater for danske flerfamiliehuse. Resultaterne er uvægtede, men de kan anses for at være repræsentative for Danmarks bestand af flerfamiliehuse uanset, at de er udvalgt fra en amtsbaseret protokol (se afsnit 2.1). Tallene i kantede parenteser angiver estimerede 68 % konfidensintervaller.

	AM	ASD	GM	GSD	f_{200}	f_{400}	Min	Max
Stueværdier, uvægtede	19.3 [17.8 – 21.6]	20.0 [17.4 – 22.9]	13.2 [12.0 – 14.3]	2.40 [2.24 – 2.65]	0	0	1	104
Husværdier, uvægtede	18.0 [16.6 – 19.7]	15.5 [13.6 – 17.4]	13.6 [12.6 – 14.7]	2.12 [2.00 – 2.31]	0	0	1	80
AM : Aritmetisk middelværdi, Bq/m^3 ASD : Aritmetisk standardafvigelse, Bq/m^3 GM : Geometrisk middelværdi, Bq/m^3 GSD : Geometrisk standardafvigelse								
					f_{200} : Observeret %-del med værdier $> 200 \text{ Bq/m}^3$ f_{400} : Observeret %-del med værdier $> 400 \text{ Bq/m}^3$ Min : Minimumsværdi, Bq/m^3 Max : Maksimumsværdi, Bq/m^3			



Figur 52. Fordeling af radonkoncentrationer i undersøgelsens 101 flerfamiliehus (husværdier uden vægtning). I lighed med Figur 3 er hver søjle med målinger forsat under nullinien. Kurven på figuren angiver en logaritmisk normalfordeling med geometrisk middelværdi 13.6 Bq/m^3 og geometrisk standardafvigelse 2.12.

5.2 Faktoranalyse

Der er ikke grundlag for en detaljeret analyse af sammenhængen mellem radonkoncentrationen i flerfamiliehusene og forskellige faktorer. Der er to årsager til dette: Først og fremmest sætter det lille antal målinger en grænse for hvilke statistiske hypoteser, som meningsfyldt kan testes (stort set ingen hypotese kan afvises, dersom der er tilpas få målinger). Dernæst er det af betydning, at radonkoncentrationerne i flerfamiliehusene er meget lave. Fra et sundhedsmæssigt perspektiv er det således kun af ringe interesse, at kende årsagerne til variationen i radonkoncentration fra bolig til bolig.

Følgende 10 faktorer behandles i det følgende:

- Amt
- Landsdel
- Jordart (GEUS)
- Byggemateriale (BBR)
- Byggemateriale (beboeroplysning)
- Etage for dosimeter (beboeroplysning)
- Ventilation (beboeroplysning)
- Udluftningsvaner i stue (beboeroplysning)
- Udluftningsvaner i soveværelse (beboeroplysning)
- Byggeår (BBR)

Hver faktor er inddelt i en række grupper, som det vil fremgå af det følgende. Der er foretaget 10 envejs variansanalyser af typen:

$$\log(R_n) \sim \text{Byggemateriale} \quad (8)$$

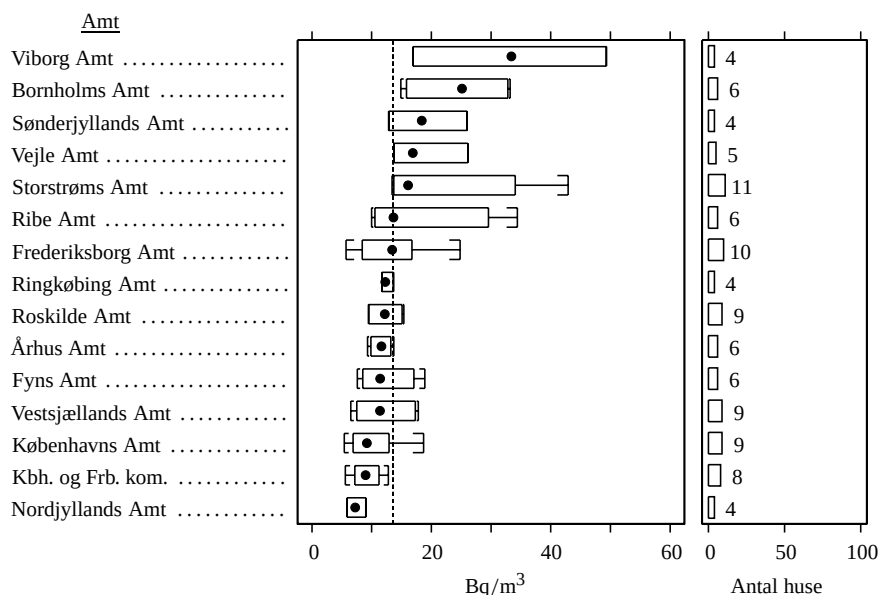
Kun i to tilfælde kan det afvises, at grupperne indenfor den enkelte faktor har ens radon-niveauer. Det drejer sig om faktorerne *etage for dosimeter* og *bygge år*. I begge tilfælde er

P -værdien omkring 0.002. For de øvrige faktorer er der ingen signifikant forskel mellem grupperne ($P > 0.05$). Faktorenes betydning er vist grafisk i figurene på de følgende sider. For hver faktor er der lavet et simplificeret “faktordiagram”, svarende til det der blev beskrevet side 21 for enfamiliehusene. Simplifikationer/ændringerne er som følger: (1) Der er ikke foretaget nogen regressionsanalyse for flerfamiliehusene, og der indgår derfor ikke noget index-plot i figurene. (2) Der er anvendt andre skalaer på x-akserne. (3) Ingen af målingerne er over 200 Bq/m³, så f_{200} -værdierne er ikke påskrevet i boxplottene. (4) Den stiplede referencelinie er sat til 13.6 Bq/m³ svarende til den geometriske middelværdi for alle målingerne (jf. Tabel 12).

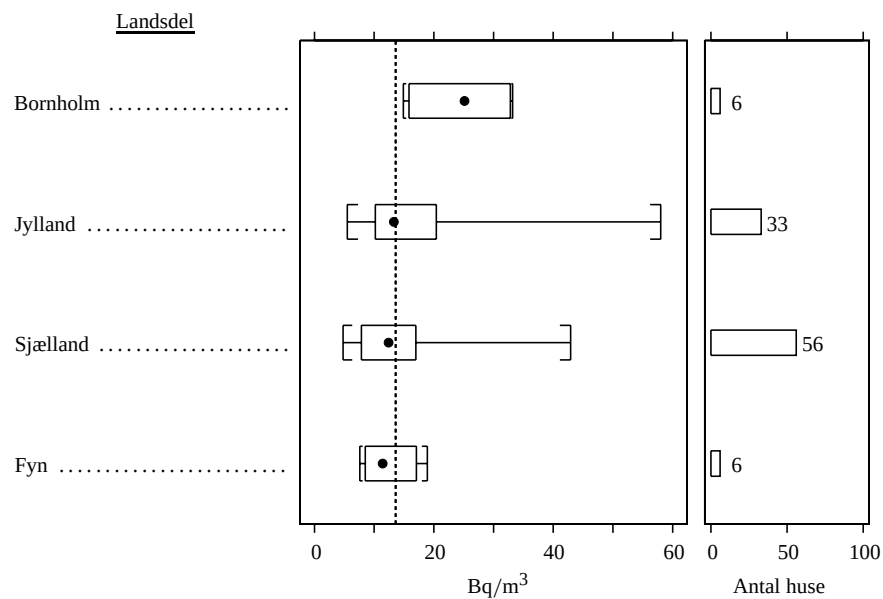
Som nævnt i det forudgående kan der ikke påvises nogen sammenhæng mellem radon i flerfamiliehusene og faktorerne *amt*, *landsdel* eller *jordart*. Dette peger på, at jorden ikke er en væsentlig kilde for radon i flerfamiliehusene. Dog har det betydning, om boligen er i stueetagen, på første sal eller højere oppe. Figur 58 viser, at der er en klar tendens til at radonkoncentrationen er størst i stueetagen, og at koncentrationen falder jo højere op man kommer i husene. Det er muligt, at man ville kunne påvise en sammenhæng mellem jordart og radon, hvis man begrænsede undersøgelsen til målinger i stueetagen i flerfamiliehusene.

Der kan ikke påvises nogen sammenhæng mellem byggemateriale og radon i flerfamiliehusene. Herunder bemærkes det, at der på ingen måde er nogen tendens til at beton giver anledning til højere radonniveau end andre byggematerialer. Dette resultat fremgår uanset om man lægger oplysningerne fra BBR eller beboerne til grund.

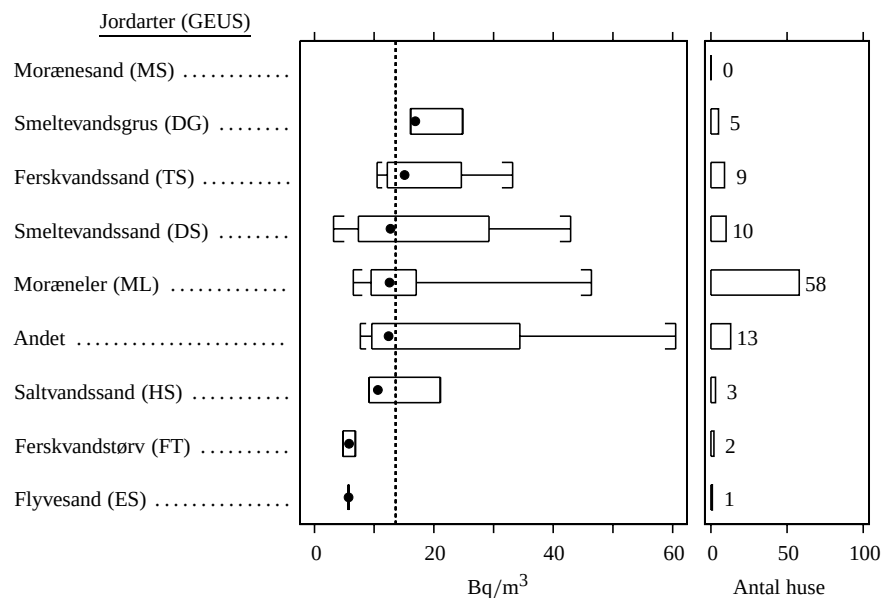
Den anden faktor af betydning for radonkoncentrationen i flerfamiliehusene er byggeåret. Som vist i Figur 62 har perioden 1871–1940 de højeste radonkoncentrationer. Årsagen hertil er ukendt. Det er naturligvis muligt, at forholdet beror på en tilfældighed. Det skal dog bemærkes, at et lignende forhold blev observeret for enfamiliehusene (se Figur 47, side 46).



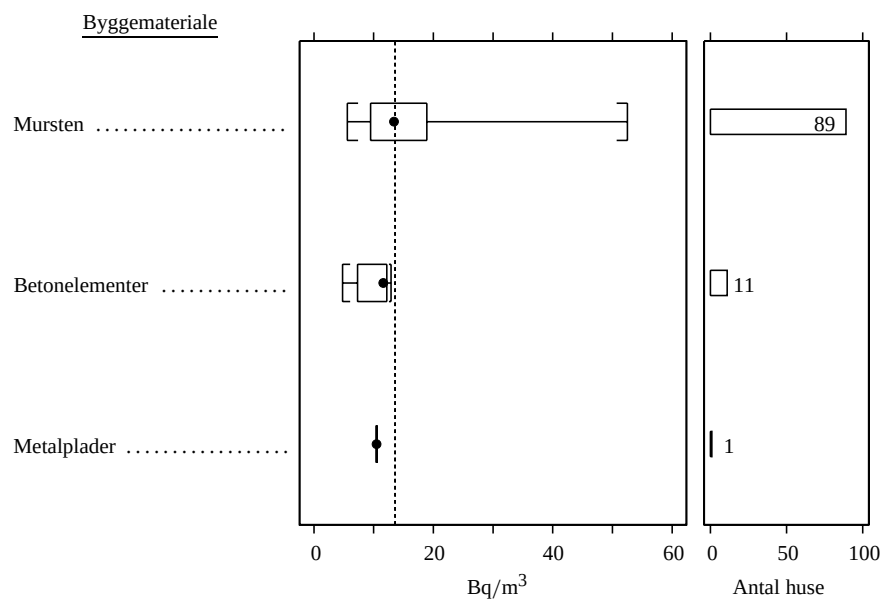
Figur 53. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehusene klassificeret efter amt. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel mellem grupperne.



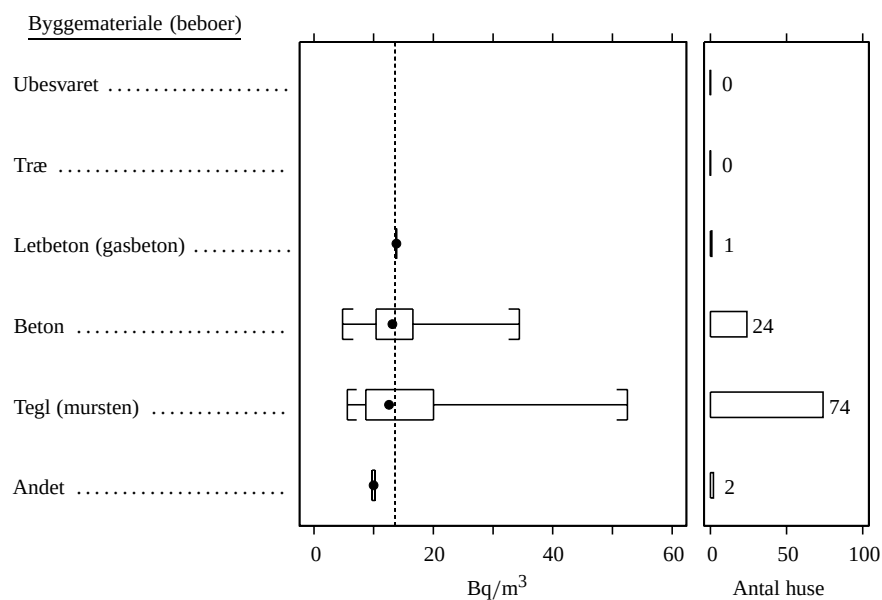
Figur 54. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter landsdel. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel mellem grupperne.



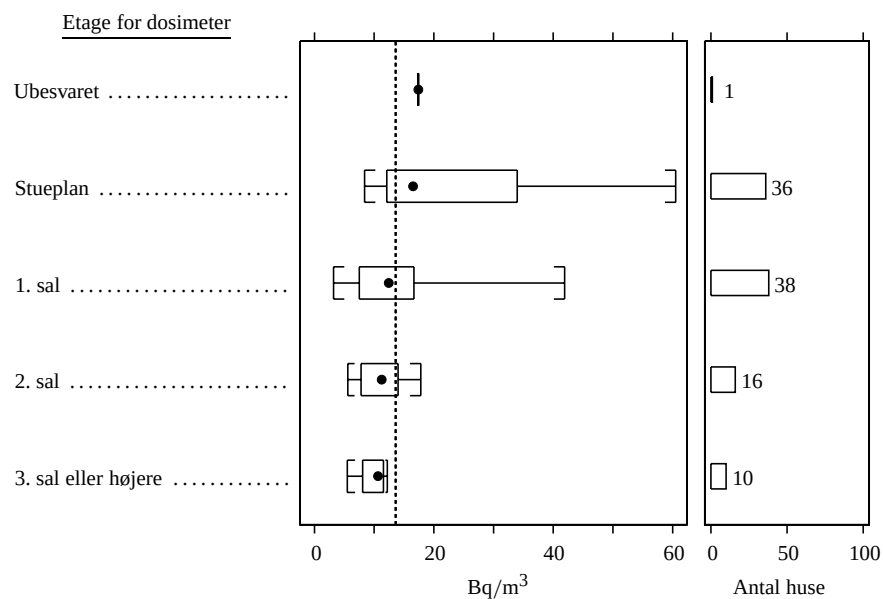
Figur 55. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter jordart iht. GEUS. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel mellem grupperne.



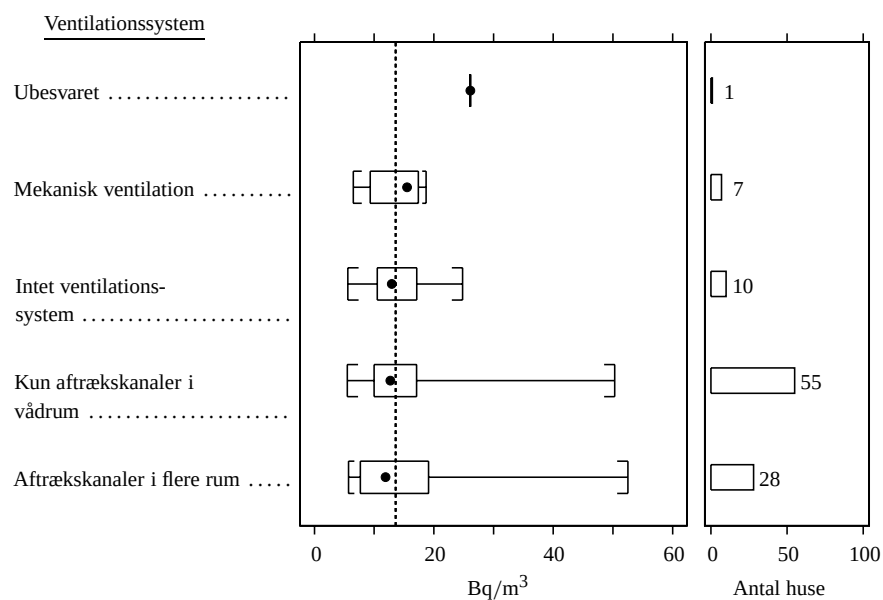
Figur 56. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter byggemateriale iht. BBR. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel mellem grupperne.



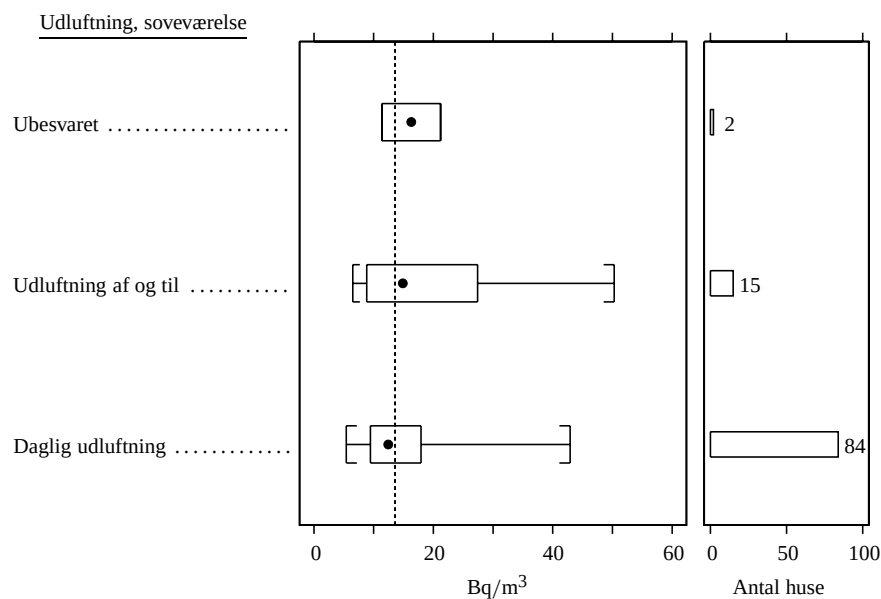
Figur 57. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter byggemateriale iht. beboernes egne oplysninger. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel mellem grupperne.



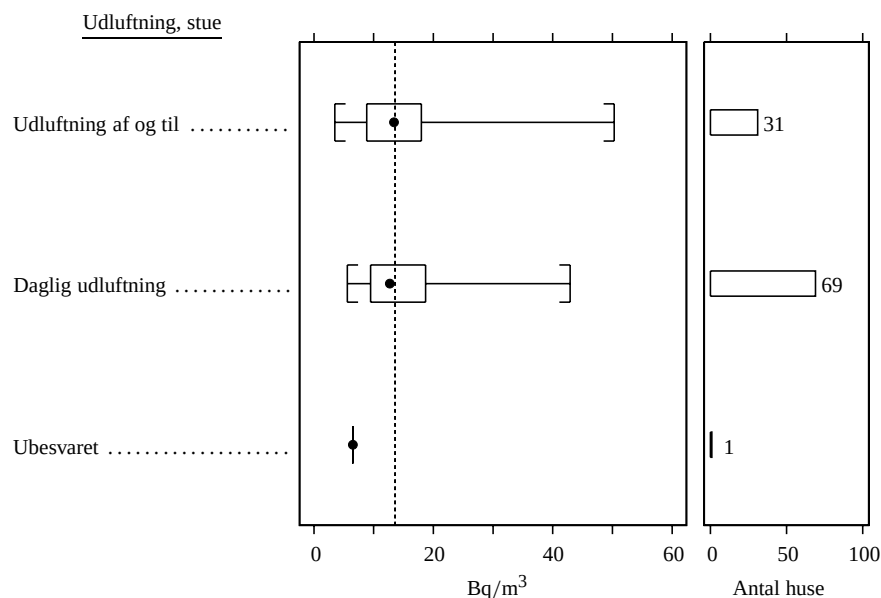
Figur 58. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter placeringen af dosimeteret. Som omtalt i teksten er der en signifikant forskel mellem grupperne.



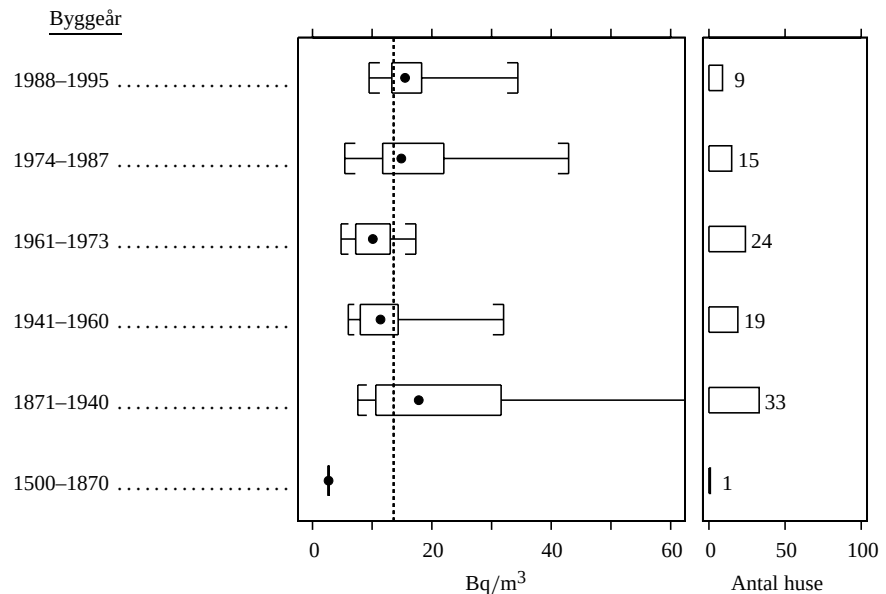
Figur 59. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter ventilations-system iht. oplysning fra BBR. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel mellem grupperne.



Figur 60. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter udluftning af soveværelset iht. beboernes egne oplysninger. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel mellem grupperne.



Figur 61. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter udluftning af stuen iht. beboernes egne oplysninger. Der kan ikke påvises nogen signifikant forskel mellem grupperne.



Figur 62. Undersøgelsens resultater for flerfamiliehuse klassificeret efter husenes byggeår iht. BBR. Som omtalt i teksten kan der påvises en signifikant forskel mellem grupperne.

6 Diskussion

I dette kapitel sammenfattes undersøgelsens hovedresultater i relation til emnerne:

- Danske radonniveauer og sammenligning med andre undersøgelser (afsnit 6.1 og 6.2).
- Identifikation af områder med og uden radonproblemer og vurderinger for specifikke huse (afsnit 6.3 og 6.4).
- Mekanismer og geologi (afsnit 6.5 og 6.6).
- Måleteknik (afsnit 6.7).

6.1 Danske radonniveauer

Repræsentative landsværdier for en- og flerfamiliehuse

Undersøgelsen viser, at det gennemsnitlige radonniveau i danske enfamiliehuse er 77 Bq/m^3 (aritmetisk middel) og at omkring 4.6 % af enfamiliehusene (i alt 65 000 huse) har værdier over 200 Bq/m^3 . Andelen af huse over 400 Bq/m^3 er mindre godt bestemt, da sådanne huse kun sjældent forekommer. Konkret blev der i undersøgelsen observeret 15 huse med værdier over 400 Bq/m^3 . Det svarer til omkring 0.38 % af alle danske enfamiliehuse. Det er muligvis mere sikkert, at lægge kommunemodellen i afsnit 3.3 til grund for vurderingen. I så fald opnås et estimat på 0.21 %, hvilket på landsplan svarer til, at 3000 huse har værdier over 400 Bq/m^3 .

I gennemsnit er radonniveauerne i danske flerfamiliehuse betydeligt lavere end i enfamiliehuse. Den aritmetiske middelværdi for flerfamiliehusene er 18 Bq/m^3 , og i ingen tilfælde blev der fundet værdier over 200 Bq/m^3 .

Det bemærkes, at der i undersøgelsen er lagt vægt på at vurdere antallet af boliger over hhv. 200 og 400 Bq/m³, da disse værdier i Danmark anvendes som grænser for, hvornår bygningsmyndighederne anbefaler mere eller mindre simple tiltag mod radon. De danske krav og anbefalinger er resumeret på side 1.

Bolig- og personmidlede værdier

Under hensyntagen til forekomsten af en- og flerfamiliehuse (se side 3) kan den gennemsnitlige radonkoncentration (aritmetisk middelværdi) for alle danske boliger beregnes til 53 Bq/m³. Dette er den såkaldte boligemidlede radonkoncentration. Tilsvarende kan den gennemsnitlige radonkoncentration for alle personer beregnes til 59 Bq/m³. Dette er den såkaldte personmidlede radonkoncentration. Disse tal er af betydning, når man skal anslå den dosis, som radon giver anledning til i befolkningen.

Sammenligning med andre lande

Det gennemsnitlige radonniveau i danske enfamiliehuse er omkring halvt så stort som det gennemsnitlige niveau i svenske enfamiliehuse [R00] og mere end dobbelt så stort, som det gennemsnitlige niveau i hollandske enfamiliehuse [Sto98]. Holland er blandt de lande i verden med de laveste niveauer og Sverige ligger sammen med Finland i toppen [UN00]. I Sverige vurderes det, at omkring 210 000 enfamiliehuse har niveauer over 200 Bq/m³, og at 50 000 har værdier over 400 Bq/m³. I Sverige og en række andre lande har man i enkelte tilfælde fundet huse med ekstremt høje niveauer (f.eks. større end 10 000 Bq/m³). Længerevarende ophold i sådanne huse er forbundet med en betydelig risiko. Det er betryggende, at der heller ikke i den nye danske undersøgelse blev fundet huse med så høje værdier. Den højeste rapporterede danske årsmiddelværdi for et hus er 1000 Bq/m³. I kortere perioder (timer) er der dog målt værdier op til 7000 Bq/m³ [A97a].

6.2 Sammenligning mellem ny og gammel radonundersøgelse

Den nye undersøgelse viser, at radonproblemet i Danmark er mere omfattende end hidtil antaget. I den gamle undersøgelse fra 1987 [St87a] blev det vurderet, at omkring 45 000 enfamiliehuse har værdier over 200 Bq/m³. I den nye undersøgelse vurderes tallet til at være 65 000. Hovedresultaterne for de to undersøgelser er sammenstillet i Tabel 13. En simpel statistisk analyse viser, at forskellene er signifikante. Forskellene træder også frem, hvis man sammenligner resultaterne amt for amt. Dette ses af Figur 63. Figuren beror på stuemålinger, hvilket udelukker indflydelse af problemer i den nye undersøgelse med omregning fra stue til husværdier (se afsnit 2.2 og Bilag F). Den mest markante forskel forekommer for Bornholms Amt, som i den gamle undersøgelse blev vurderet til at have et relativt lavt radonniveau. I den nye undersøgelse ligger Bornholm derimod blandt de amter, som har den største tæthed af huse med niveauer over 200 Bq/m³. Bornholm har en sammensat geologi, og den nye undersøgelse viser, at radonforholdene er vidt forskellige i øens fem kommuner. I Rønne Kommune blev der således ikke fundet nogen huse over 200 Bq/m³, mens halvdelen af de undersøgte huse i Nexø Kommune lå over 200 Bq/m³ (se datablad side 118). I den gamle undersøgelse blev der kun foretaget i alt 15 målinger på Bornholm, og da Rønne er øens største kommune, kan en stor del af målingerne tilfældigvis være udtrykket her¹. Selvom målingerne i den gamle undersøgelse var tilfældigt udtrykket indenfor Bornholms Amt, er det jo ikke givet, at den resulterende stikprøve var repræsentativ.

Bornholm

Der er fire grunde til at mene, at den nye undersøgelse giver det mest retvisende billede af de danske radonforhold:

¹En af forfatterne til den gamle undersøgelse bekræfter, at dette faktisk var tilfældet.

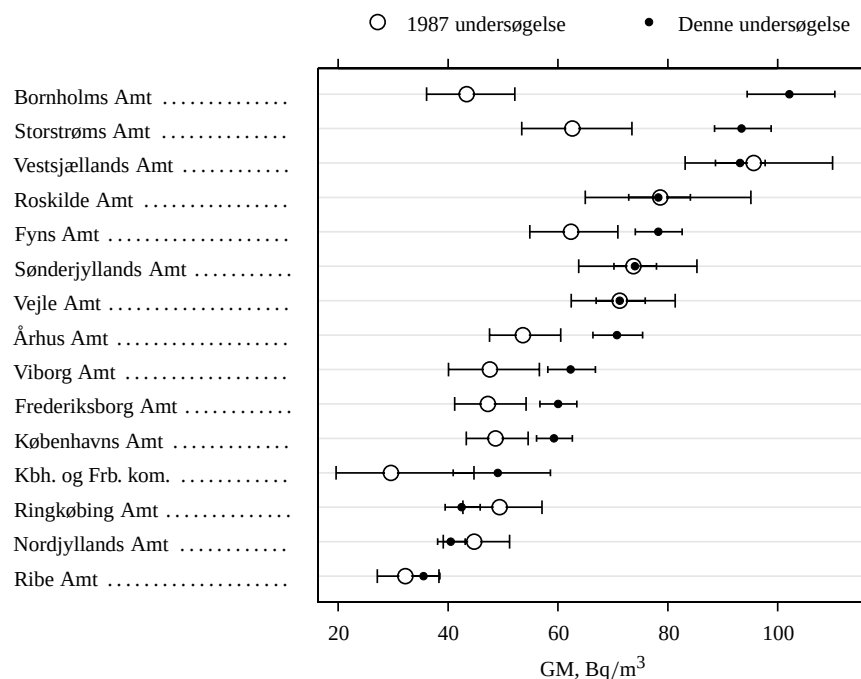
Tabel 13. Sammenligning mellem repræsentative værdier for de to landsdækkende undersøgelser. I den gamle radonundersøgelse [St87a] blev der målt i 348 enfamiliehuse og 148 flerfamiliehuse. Tallene i kantede parenteser angiver 68 %-konfidensintervaller. For den gamle undersøgelse er konfidensintervallerne beregnet vha. den såkaldte bootstrap-metode [Ma97, Mat00].

Gruppe	1987 undersøgelse				
	AM	GM	GSD	f_{200}	f_{400}
Enfamiliehuse, stueværdier	75.0 [71.8 – 79.0]	56.7 [54.7 – 59.0]	2.07 [2.02 – 2.13]	3.7 [2.2 – 4.3]	1.1 [0.57 – 1.4]
Enfamiliehuse, husværdier	68.0 [65.2 – 72.1]	52.0 [50.1 – 54.1]	2.02 [1.97 – 2.08]	3.2 [2.0 – 3.7]	0.57 [0 – 0.9]
Flerfamiliehuse, stueværdier	20.0 [19.3 – 21.0]	18.2 [17.5 – 18.8]	1.52 [1.48 – 1.58]	0	0
Flerfamiliehuse, husværdier	19.5 [18.8 – 20.4]	17.9 [17.4 – 18.6]	1.48 [1.45 – 1.54]	0	0

Gruppe	Denne undersøgelse				
	AM	GM	GSD	f_{200}	f_{400}
Enfamiliehuse, stueværdier	89.5 [87.5 – 90.9]	63.6 [63.2 – 65.5]	2.44 [2.37 – 2.46]	8.4 [7.9 – 9.0]	0.88 [0.69 – 1.08]
Enfamiliehuse, husværdier	77.3 [75.9 – 78.5]	57.7 [57.4 – 59.3]	2.28 [2.22 – 2.30]	4.6 [4.2 – 5.1]	0.38 [0.27 – 0.48]
Flerfamiliehuse, stueværdier	19.3 [17.8 – 21.6]	13.2 [12.0 – 14.3]	2.40 [2.24 – 2.65]	0	0
Flerfamiliehuse, husværdier	18.0 [16.6 – 19.7]	13.6 [12.6 – 14.7]	2.12 [2.00 – 2.31]	0	0

AM : Aritmetisk middelværdi, Bq/m³ f_{200} : Observeret %-del med værdier > 200 Bq/m³
 GM : Geometrisk middelværdi, Bq/m³ f_{400} : Observeret %-del med værdier > 400 Bq/m³
 GSD : Geometrisk standardafvigelse

- Den nye undersøgelse omfatter målinger i mere end seks gange flere boliger end den gamle. Den nye undersøgelse er således mindre følsom overfor tilfældige fejl fra små stikprøver.
- I den nye undersøgelse er der foretaget målinger i alle kommuner, hvilket giver en bedre garanti for, at der ikke er væsentlige forhold af geologisk eller bygningsmæssig karakter, som er blevet overset. Herunder skal det fremhæves, at stratificerede undersøgelser, hvor de enkelte strata repræsenterer homogene grupper af data, normalt giver væsentligt bedre populationsestimater end undersøgelser, hvor der blot udtages en (stor) tilfældig stikprøve fra hele populationen [Co77].
- I den nye undersøgelse er der taget hensyn til geografiske forskelle mht. ønsket om at deltage i undersøgelsen. Dette er nødvendigt, da Tabel 2, side 5 viser, at der er en vis sammenhæng mellem “afstanden til København” og andelen af brugbare resultater pr. henvendelse. Kun omkring 54 % af de adspurgte beboerne i Ringkøbing og Nordjyllands amter (hvor der er lave radonniveauer) deltog i undersøgelsen. I Københavns og Frederiksborg amter (hvor radonniveauerne er højere) var tilslutningen derimod omkring 75 %. Pga. landets geologiske forhold kan en tilfældig udtrukket stikprøve (som ikke korrigeres for disse forhold) således give et skævt billede af landets radonforhold. I den gamle landsdækkende undersøgelse blev der ikke foretaget sådanne korrektioner.
- I den nye undersøgelse er der foretaget direkte måling af (hel)årsværdier. Dette er en bedre metode i forhold til den gamle undersøgelse, hvor målte halvårsværdier blev



Figur 63. Sammenligning mellem amtsvise geometriske middelværdier for stuemålinger i de to landsdækkende undersøgelser. Amterne er sorteret efter stigende koncentration iht. den nye undersøgelse. De markerede usikkerheder angiver 68 %-konfidensintervaller. Usikkerheden ved værdierne for den gamle undersøgelse er beregnet ud fra en geometrisk standardafvigelse på 2.04 samt antallet af målinger i det enkelte amt. Det ses, at rangordningen af amterne efter radonkoncentration stort set er ens i de to undersøgelser. Den primære forskel mellem undersøgelserne er, at der er en klar tendens til, at den gamle undersøgelse giver lavere værdier end den nye. Dette gælder for 7 amter, og der forekommer ikke amter, hvor det modsatte er tilfældet. Disse forhold bekræfter, at forskellen mellem undersøgelserne ikke kan skyldes tilfældige fluktuationer.

omsat til helårsværdier vha. gennemsnitlige korrektionsfaktorer, som kun afhang af husenes jordbundsforhold [St87a, s. 58]). Eksempelvis blev alle målinger i huse på overvejende moræneler i sommerhalvåret omsat til helårsværdier ved at gange med 1.33. Denne omregning må imidlertid forventes at være behæftet med stor usikkerhed. Problemet er, at sæsonvariationen varierer fra hus til hus. Eksempelvis har terrændækhuse en mere udpræget sæsonvariation end krybekælderhuse [M92], men andre forhold spiller også ind (bl.a. husenes radonniveau [Ar95] og husenes brug).

På et enkelt punkt er den gamle undersøgelse dog bedre end den nye:

- I den nye undersøgelse er der kun foretaget stuemålinger, så husværdien er beregnet vha. en korrektionsformel (se afsnit 2.2 og Bilag F). I den gamle undersøgelse blev der foretaget samtidig måling af radon i stue og soveværelse. Husværdien kunne her beregnes som gennemsnittet af de to målinger.

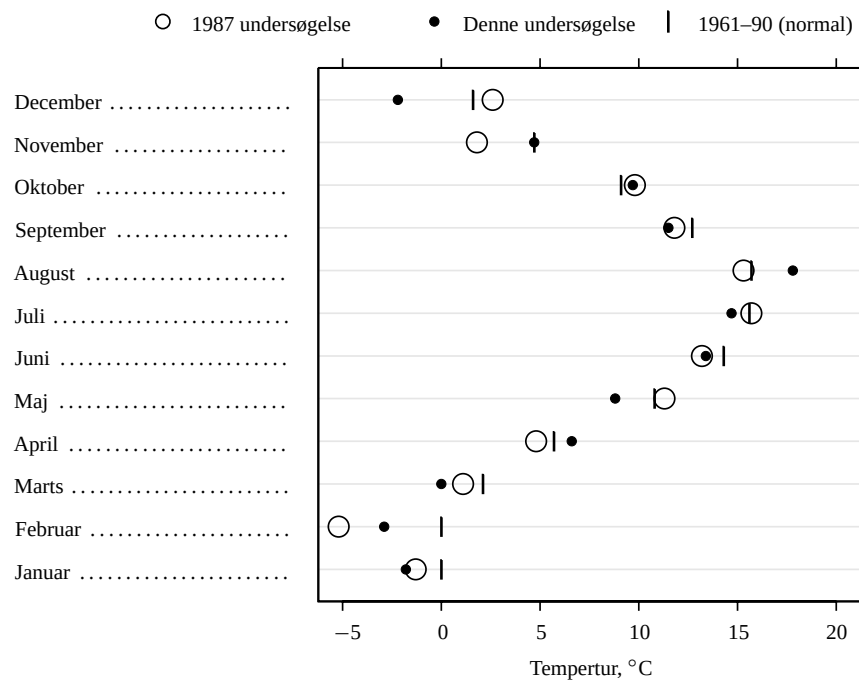
Det kan dog afvises, at det sidstnævnte forhold er årsag til den observerede forskel mellem de to undersøgelser, idet forskellen også eksisterer (endda i mere udpræget form), dersom man begrænser sammenligningen til kun at omfatte stueværdier.

Meteorologi m.v.

Tidligere undersøgelser har påvist en klar sammenhæng mellem indendørs radon og udetemperatur [M92]. Sammenhængen skyldes, at temperaturforskellen mellem husets indre og udeluften danner et undertryk i huset således, at radonholdig jordluft suges ind

(advektion). Desuden påvirkes husenes naturlige luftskifte (ventilation) af ændringer i udetemperaturen. Årstids- og døgnsvingninger i udetemperaturen betyder, at radonkoncentrationen normalt har årsmaksimum om vinteren og døgnmaksimum tidligt om morgenen [A97a]. Forskellene mellem de to landsdækkende radonundersøgelser kunne således skyldes temperaturforskelle. Figur 64 viser imidlertid, at der ikke forekommer væsentlige afvigelser mellem temperaturerne i de to undersøgelser. Faktisk er årsmiddelværdien for begge undersøgelser lig 6.7 °C. For fuldstændighedens skyld kan det bemærkes, at begge landsdækkende undersøgelser dog er foretaget i perioder med temperaturer lidt under dem, som gælder for et "normalår" (her defineret som gennemsnittet for årene 1961–90).

Det er ikke undersøgt, om der er andre forskelle mellem de to landsdækkende undersøgelser (f.eks. mht. vind, solindstråling, nedbør, jordfugt, grundvandsstand, atmosfæretryk m.v.) idet indflydelsen af sådanne forhold er dårligt belyst.



Figur 64. Gennemsnitstemperaturer for de enkelte måneder i denne undersøgelse, i den gamle landsdækkende undersøgelse [St87a], samt for et normalår (gennemsnit af perioden 1961–1990). Årsmiddelværdien for hver af de to undersøgelser er lig 6.7 °C. Årsmiddelværdien for perioden 1961–90 er lig 7.7 °C. Forskellen skyldes primært, at begge landsdækkende undersøgelser havde vintertemperaturer væsentligt lavere end dem, der gælder i et "normalår".

Andre forhold

I afsnit 6.7 diskuteres betydningen af en række andre måletekniske forhold, som kan have bidraget til forskellen mellem de to undersøgelser.

Konklusion af sammenligningen

En af formålene med undersøgelsen er (se side 2): at undersøge om der er sket ændringer i radonniveauet i danske boliger siden den forrige landsomfattende undersøgelse, f.eks. som følge af bygningsforbedringer, forbedret nybyggeri eller oplysning til befolkningen om radonproblemet. Som det fremgår af den forudgående diskussion er der en signifikant forskel mellem resultaterne for de to landsdækkende undersøgelser: Tilsyneladende er det

gennemsnitlige radonniveau steget siden den første undersøgelse i 1987. Dette formodes imidlertid at skyldes forhold vedr. design af undersøgelserne og måleteknik snarere end, at radonkoncentrationen for de to boligmasser er ændret. Det er beskrevet, hvorfor den nye undersøgelse formodes at give et mere retvisende billede af de danske radonforhold. På side 67 belyses sammenhængen mellem husenes alder og radon.

6.3 Områder med og uden radonproblemer

Undersøgelsen har tilvejebragt en kortlægning af radonforholdene i Danmark. Hovedresultatet er et kort, som viser andelen af huse med radonkoncentrationer over 200 Bq/m³ i landets 275 kommuner (se side 17). Kortet suppleres af datablade, der angiver datagrundlag og vurderinger for alle kommuner og amter (se Bilag J).

Kortlægningen viser, at man for så vidt kan finde huse med værdier over 200 Bq/m³ overalt i Danmark, men at sådanne huse ikke forekommer med samme hyppighed. Kortet har således en statistisk natur. Kortet viser eksempelvis, at andelen af huse med niveauer over 200 Bq/m³ er mindre end 1 % for hovedparten af kommunerne i Ribe, Ringkøbing og Nordjyllands amter. Radonmæssigt er problemerne i disse områder således små. De mest radonbelastede områder findes på Bornholm samt i morænelersområder på Fyn, Sjælland og de omkringliggende øer samt i det syd-østlige Jylland. For omkring 20 kommuner vurderes det, at mere end 10 % af husene har niveauer over 200 Bq/m³. I to tilfælde vurderes det, at mere end 20 % af husene ligger over 200 Bq/m³. Det drejer sig om Ringe Kommune på Fyn og Nexø Kommune på Bornholm.

Det skal pointeres, at kommunevurderingerne er forbundet med stor usikkerhed. Dette fremgår direkte af databladene i Bilag J, hvor der er anført konfidensintervaller for alle vurderinger. Der vil med sikkerhed være enkelte kommuner i undersøgelsen, som er væsentligt fejlvurderet. Dette er uundgåeligt ved små stikprøver. Resultaterne fra kommunekortet skal altså anvendes med en vis forsigtighed. Det skal her fremhæves, at formålet med den statistiske model, som ligger bag vurderingerne, netop har været at minimere indflydelsen af sådanne tilfældige fejl. Hvis man ønsker en simpel kontrol af resultatet for en given kommune, kan man foretage en sammenligning med resultaterne for nabokommunerne. Hvis kommunen markant skiller sig ud, kan man videre undersøge, om årsagen kan henføres til geologiske forskelle mellem kommunerne. En relativ nem og billig mulighed for at indhente jordartsinformationer er at anvende GEUS's 1:200 000 jordartskort på CD-Rom [He99]. I sidste instans er der dog kun én reel mulighed for at opnå en mere sikker viden: Der må foretages yderligere målinger i kommunen.

Som privatperson kan man opfatte kommuneestimerne som et udtryk for at risikoen for at bo i et hus med radonproblemer er forskellig fra kommune til kommune. Således kan kortet være af interesse ved huskøb eller nybyggeri. Fra et myndigheds-synspunkt hjælper kortet til at identificere områder, hvor der er behov for informations- og målekampagner eller andre tiltag mod høje radonniveauer. Omvendt kan man sige, at kortet viser, hvor der ikke er sådanne behov. Kortlægningen kunne således give anledning til en mere differentieret indsats mod radon. For nærværende er der ingen radonmæssig forskel på krav eller anbefalinger til nybyggeri i Skagen og Ringe kommuner til trods for, at radonforholdene de to steder er vidt forskellige. Alle huse skal udføres med "radonsikker" gulvkonstruktion.

Hovedformålet med kortlægningen er af sundhedsmæssig karakter pga. den forøgede lungekræftrisiko, som er forbundet med radon i indendørsluft. Det skal dog påpeges, at kortlægningen også kan have andre anvendelser (som ganske vist også har med sundhed at gøre). I forbindelse med byggeri på forurenede byggegrunde (f.eks. nedlagte benzinstationer) eller tæt på lossepladser kan der være behov for at dokumentere, at der ikke trænger jordluft ind i nærliggende huse [B93] f.eks. fordi husene er bygget "radonsikkert" [B88, Bo98]. Radon kan her anvendes som sporgas, da radon normalt forekommer i høje koncentrationer i jorden under husene. Hvis det kan dokumenteres, at de undersøgte huse har et lavt radonniveau (f.eks. mindre end 40 Bq/m³) så kan det betyde, at der ikke

Kommunekort

Usikkerhed

Anvendelser

Andre anvendelser

trænger væsentlige mængder jordluft ind i husene. Imidlertid afhænger følsomheden af sådanne tests af, om jorden har et højt eller lavt radonpotentiale. Kommunekortet viser, at der er områder i Danmark, hvor sådanne tests er mindre egnede, idet hovedparten af husene har lave radonniveauer uanset om de er bygget "radonsikkert" eller ej. Dette gælder eksempelvis for en stor del af kommunerne i Ribe, Ringkøbing og Nordjyllands amter.

Validering

Kvaliteten af kommunekortet kan afprøves ved sammenligning med resultater fra andre undersøgelser. Det mest nærliggende grundlag udgøres af det såkaldte Radon-95 projekt [A97a], hvor der blev foretaget i alt 270 radonmålinger i tre områder: Et morænelersområde i Ramsø Kommune, et kalkområde i Thisted Kommune, og et granitområde i Allinge-Sandvig Kommune. Problemet med sammenligningen er dog, at Radon-95 projektet netop kun omfatter radonmålinger i disse delområder i de tre kommuner, og at områderne fra en geologisk synsvinkel forventes at have et højt radonpotentiale. Eksempelvis er målingerne i Thisted næppe repræsentative for Thisted Kommune som helhed. I Tabel 14 er Radon-95 resultaterne sammenstillet med de kommunevurderinger, som nærværende projekt giver anledning til (jf. Bilag J). For Ramsø Kommune giver de to undersøgelser samme resultat. For Thisted og Allinge-Sandvig ligger Radon-95 resultaterne over de centrale kommuneestimer. Dette stemmer for så vidt godt med, at Radon-95 områderne netop blev udvalgt som områder, hvor radonniveauerne kunne være særligt høje. Sammenligningen giver således ikke grundlag for at hævde, at der er nogen modstrid mellem kommunevurderingerne i nærværende undersøgelse og resultaterne fra Radon-95 projektet.

En mere formel afprøvning af undersøgelsesresultaterne kræver, at der foretages repræsentative undersøgelser i et mindre antal kommuner.

Tabel 14. Sammenligning mellem kommunevurderinger fra denne undersøgelse (se data-bladene i Bilag J) og observerede andele over 200 Bq/m³ (f_{200}) i Radon-95 projektet [A97a]. Tallene i kantede parenteser angiver 68 %-konfidensintervaller.

	Kommuneværdier			Radon-95 delområder	
	N	$f_{200}(\text{model})$		N	$f_{200}(\text{observeret})$
Thisted	9	4.6	[2.1, 7.1]	90	8.9
Ramsø	13	11.5	[6.9, 16]	100	11.0
Allinge-Gudhjem	16	10.7	[5.9, 16]	80	16.3

N : Antal målinger
 f_{200} : %-del med værdier > 200 Bq/m³

6.4 Forudsigelser for specifikke huse

Kælderforhold

Hvis man ejer et hus (eller påtænker at anskaffe sig et), hvor der ikke er målt radon, kan det naturligvis være interessant at foretage en simpel vurdering af radonniveauet. Først kan man undersøge områdets generelle radonforhold vha. kommunekortet side 17, men nærværende undersøgelse bidrager desuden med et andet værktøj. Metoden bygger på en såkaldt regressionsanalyse. Som beskrevet side 48 kan man ud fra oplysninger om geologi og huskonstruktion få en simpel vurdering af husets radonniveau. I denne vurdering spiller husets kælderforhold en afgørende rolle. Eksempelvis er der en minimal risiko for at have et højt radonniveau i "stueetagen" i et kælderhus. Dette afspejler, at kun et enkelt af undersøgelsens 335 kælderhuse havde et radonniveau over 200 Bq/m³. Hvis man således bor i et kælderhus i et område med lav radonbelastning (f.eks. Nordjylland), så er der altså en meget lille risiko for at have et højt radonniveau. Hvis man omvendt bor i et hus, hvor man på forhånd kan se, at risikoen er relativ stor, så kan der være et større

incitament til faktisk at få bestemt husets radonniveau ved en regulær måling.

6.5 Mekanismer

Kilder

Tidligere undersøgelser har vist, at jorden under husene er den primære kilde til radon i danske enfamiliehuse [St87a, A97a]. Dette bekræftes af denne undersøgelse. Følgende forhold skal fremdrages:

- Der er en meget klar sammenhæng mellem geologiske forhold og radon i enfamiliehuse (se bl.a. afsnit 4.3). Årsagen er formodentlig, at der er forskelle fra jordart til jordart mht. (1) radonemanationsrate (dvs. den hastighed, hvormed der dannes radon i jordens porer) [D85, Gr96, Gr99] og (2) transportegenskaber (gaspermeabilitet og diffusivitet) [Rog91, A92, Ho97].
- Sammenhængen mellem radon og (1) kælderforhold, (2) antallet af etager og (3) hustype (en- eller flerfamiliehuse) peger også på, at jorden er en vigtig kilde: De nævnte forhold vedrører nemlig den del af huskonstruktionen, som danner grænse mod jorden. Det er indlysende, at det er lettere for radonholdig jordgas, at trænge ind i stuen i et terrændækhuse i forhold til en lejlighed i 2. sals højde. Radonkoncentrationen i de fleste lejligheder er meget lav, da jordluften skal passere en række ventilerede zoner, før den når frem til boligen.
- Undersøgelsen viser, at jo højere grundvandet står, jo mindre bliver radonkoncentrationen i husene (se afsnit 4.5). Dette formodes at skyldes, at det gasreservoir, som er til rådighed for huset, begrænses nedad af vandmættede jordlag.
- Hvis jorden er så vigtig en kilde, kan det måske undre, at husets bygningsareal tilsyneladende ikke spiller nogen rolle for radonkoncentrationen i enfamiliehuse (se afsnit 4.10). Forklaringen formodes at være, at den øgede indtrængning af radonholdig jordgas til huse med et stort bygningsareal opvejes af at disse har et tilsvarende stort volumen: Den indtrængende radon fordeles over et større volumen således, at radonkoncentrationen bliver uafhængig af det bebyggede areal.
- Byggematerialer og radon i udeluften bidrager i gennemsnit med omkring 10 til 20 Bq/m³ radon i indendørsmiljøet. Dette fremgår af at radonkoncentrationen i flerfamiliehuse ligger på det niveau. Undersøgelsen viser, at for enfamiliehuse er radonniveauet lavest i huse med ydervægge af træ. Derudover kan der ikke påvises nogen sammenhæng mellem byggematerialer og indendørs radon. På baggrund af målte afgasningsrater for byggematerialer [J76, J80, A99a] kan det måske undre, at der ikke er større forskel mellem f.eks. mursten- og betonhuse, idet mursten (ligesom træ) har en meget lav afgasningsrate. Årsagen formodes at være, at der normalt indgår flere forskellige materialer i et husbyggeri således, at man ikke kan tale om rene murstenshuse eller rene betonhuse. Eksempelvis vil terrændæk altid være udført i beton.

Byggematerialer

Revnedannelse

Undersøgelsen bidrager inddirekte til at belyse sammenhængen mellem revner i gulvkonstruktionen og radon. Hvis der eksempelvis var en direkte (lineær) sammenhæng mellem revnedannelse og radonkoncentration, kunne man forvente, at radonkoncentrationen skulle stige med husenes alder (pga. sætningsrevner m.v.). En sådan alderseffekt skulle være særlig let at observere for nyere huse, da bygningsmyndighederne siden 1988 har anbefalet, at huse skal udføres, så de er lufttætte mod jord [B88]. Imidlertid kan der ikke i undersøgelsen påvises nogen sammenhæng mellem radon i enfamiliehuse og husenes alder.

Alderseffekt

“Radonsikre huse”

I sagens natur vides det ikke, om husene bygget efter 1988 faktisk er udført iht. anbefalingen om at bygge “radonsikkert”. Ud fra målingerne kan det blot konstateres, at omkring 77 % af disse huse har radonniveauer over 40 Bq/m^3 . Dette kan opfattes som et relativt sikkert tegn på, at der tilgår jordluft til husene. Undersøgelsen giver således ikke anledning til at tro, at en væsentlig del af nyere danske enfamiliehuse har en lufttæt konstruktion mod jord, selvom husene muligvis er udført iht. anbefalingerne om at bygge radonsikkert.

Teoretisk baggrund

De observerede forhold stemmer med følgende teoretiske model: Det formodes, at radonholdig jordluft primært trænger ind i enfamiliehuse via revner i gulvkonstruktionen (betondæk m.v.). Denne indtrængning drives af det (lille) undertryk, som der normalt vil være i huset [A96]. En mindre del af indtrængningen formodes at foregå som diffusion igennem den intakte del af betondækket [A99c]. Det vides, at antallet og placeringen af revner på kompliceret vis influerer på, hvor meget radon der trænger ind i huse [Ro95]. Imidlertid er der meget, som taler for, at man kan nøjes med skelne mellem to situationer: Enten er gulvkonstruktionen helt tæt, eller også er den det ikke. Hvis man eksempelvis bebor et hus med synlige revner i terrændækket, kan man ikke forvente, at radonkoncentrationen i huset falder væsentligt, fordi man tætner halvdelen af revnerne. Man kan først forvente en væsentlig nedgang, når *alle* revner er fjernet. Hvis der blot er enkelte revner med en bredde over en brøkdel af en millimeter, så kan gulvkonstruktionen anses for at være “punkteret”. Disse ulineære forhold skyldes bl.a., at det kapillarbrydende lag under terrændækket tilvejebringer en god “sammenkobling” mellem revner i betondæk og revner og højpermeable inhomogeniteter i jordlag umiddelbart under huset. Det formodes at være forbundet med betydelig vanskelighed at etablere en helt lufttæt gulvkonstruktion.

Luftskifte

Undersøgelsen viser, at anvendelse af mekanisk ventilation i gennemsnit sænker radonkoncentrationen med 20 % (se afsnit 4.15). Derimod kan der ikke påvises nogen væsentlige sammenhænge mellem beboernes rapporterede udluftningsvaner og radon (se afsnit 4.16 og 4.17). Årsagen formodes at være, at luftskiftet ikke umiddelbart kan måles vha. spørgeskemaer med svarmuligheder af typen “daglig udluftning” og “udluftning af og til”. Til sammenligning kan det nævnes, at det bl.a. i en tidligere dansk radonundersøgelse [A97b], hvor luftskifterne faktisk blev målt (vha. en sporgasteknik), kunne påvises, at huse med luftskifter over 0.5 h^{-1} havde en gennemsnitlig radonkoncentration, som var halvt så stor som gruppen af huse med lavere luftskifter.

Hvad bestemmer radonkoncentrationen i et hus?

Undersøgelsen viser, at en række bygningstekniske og geologiske faktorer indvirker på radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse. Som vist i afsnit 4.21 kan regressionsmodellen imidlertid kun redegøre for en mindre del af variabiliteten fra hus til hus (35 %). Betyder det, at vi ikke kender de faktorer, som bestemmer radonkoncentrationen i danske boliger? Næppe. Årsagen formodes at være, at de faktorer, som faktisk indgår i undersøgelsen, ikke giver et fuldt dækkende billede af forholdene for det enkelte hus. Eksempelvis indeholder undersøgelsen ikke noget troværdigt mål for de enkelte huses luftskifte (se det forudgående afsnit), selvom det vides, at en væsentlig del af variabiliteten fra hus til hus netop skyldes forskelle i luftskifte [A97b]. Tilsvarende indgår der ikke direkte parametre, som separat beskriver jordarternes gaspermeabilitet og emanationsrate (dvs. hastigheden, hvormed der dannes radon i jorden).

Udenlandske undersøgelser

Det skal fremhæves, at den “forklarede” variabilitet (R^2) for denne undersøgelse ligger i den øvre ende af, hvad der er observeret i tilsvarende udenlandske undersøgelser. En engelsk undersøgelse omfattende omkring 2000 husmålinger og en regressionsmodel med 8 faktorer kunne kun redegøre for 22 % af variabiliteten [Gu92]. I en fransk undersøgelse kunne en tilsvarende model forklare 28 % af variabiliteten for 1700 boliger [V94]. En

tysk undersøgelse giver R^2 fra 15–31 % afhængig af om modellen anvendes på målinger i stue eller soveværelse i øst eller vest [G00]. Den højeste forklaringsgrad synes at være for en finsk undersøgelse af 84 enfamiliehuse indenfor et mindre område. I det tilfælde var R^2 68 % [Mä98]. For Finland som helhed viser en undersøgelse med 14 000 boliger, at en tilsvarende regressionsmodel kun kan redegøre for 30 % af variabiliteten [Mä90].

6.6 Geologiske forhold

De geologiske forhold spiller en vigtig rolle for radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse. Undersøgelsen viser eksempelvis, at hvis huset ligger på moræner, så er der en væsentlig større sandsynlighed for at huset får et højt radonniveau, end hvis huset ligger på flyvesand. Tilsvarende er den radonmæssige betydning af de andre vigtigste danske jordarter kortlagt (se afsnit 4.3). I den landsdækkende radonundersøgelse fra 1987 [St87a] blev sammenhængen mellem radon og geologi også undersøgt. Dengang var den geologiske klassifikation dog mere enkel og slutresultaterne måtte primært begrænses til de to grupper: *overvejende moræner* og *overvejende sand og grus*. Den ny undersøgelsen har således tilvejebragt et mere nuanceret billede af de geologiske forholds betydning for radonkoncentrationen i danske boliger. Følgende forhold skal fremhæves:

- Undersøgelsen viser, at jordarterne radonmæssigt opfører sig forskelligt fra landsdel til landsdel og fra amt til amt. Eksempelvis har moræner i Viborg Amt et anderledes radonpotentiale end moræner i Vestsjællands Amt. Dette forhold gælder også for andre jordarter (f.eks. smeltevandssand og ferskvandstørv). Dette påvises i figur 17 samt i regressionsanalysen, hvor vekselvirkningsleddet mellem landsdel og jordart er stærkt signifikant (se Tabel 11). Man kan sige, at den anvendte GEUS-klassifikation ikke er optimal (dvs. detaljeret nok) for vurdering af radonforholdene. Faktisk viser regressionsanalysen, at dersom man skal forudsige radonkoncentrationen i et givet hus, så er det generelt bedre at vide hvilken landsdel huset er lokaliseret i fremfor hvilken jordart, det ligger på (se side 49).
- Tilsvarende viser undersøgelsen, at der er tendens til at jordarternes radonmæssige betydning følges ad fra landsdel til landsdel. Hvis eksempelvis moræner har et højt radonpotentiale i et givet amt, så er der en tendens til, at smeltevandssand også har det (se Figur 18).

Disse observationer tyder på at faktorerne *landsdel* og *amt* her skal opfattes som indikatorer for geologisk information vedr. jordarternes fælles oprindelse (herunder deres indhold af radium og andre radioaktive elementer). Det vurderes, at andre forskelle mellem landsdelene (f.eks. meteorologiske forskelle) er uden væsentlig betydning i denne sammenhæng. Der kommer en tæt relation mellem jordarter, fordi de er dannet ud fra samme materiale. I nogle amter er de kvartære aflejringer præget af de prækvartære aflejringer (f.eks. kalk i Viborg Amt), og dette kan være årsag til de ensartede lave niveauer.

Undersøgelsens resultater leder frem til spørgsmålet: Skyldes den observerede sammenhæng mellem indendørs radon og jordart primært forskelle i jordarternes radonemission (dvs. kildestyrke)? Det ville i givet fald betyde, at forskelle i gaspermeabilitet fra jordart til jordart spiller en mindre rolle for gasindtrængningen til huse. En undersøgelse af disse forhold (eksempelvis på grundlag af publicerede emanationsrater for danske jordarter [D85, Gr96, Gr99]) kunne hjælpe til at belyse, om indtrængningen af radon til danske enfamiliehuse primært foregår ved trykdriven jordgastransport (advektion) eller ved diffusion.

6.7 Måletekniske forhold

I det følgende diskuteres nogle rent måletekniske forhold.

Vintereksposering

Radonmålingerne antages at repræsentere årsmiddelværdier. Imidlertid blev dosimeterne ikke alle returneret eksakt efter et år. Dette fremgår af Figur 65. For enfamiliehusene er den gennemsnitlige eksponeringstid 369 dage, men dosimetre med eksponeringstider fra 319 til 534 dage indgår i undersøgelsen. De variable eksponeringstider formodes at give anledning til en vis fejlmåling. Problemet er, at radonkoncentrationen erfaringsmæssigt ikke er konstant igennem året [M92]. Normalt er radonkoncentrationen størst om vinteren. Da den nominelle årsmiddelværdi omfatter perioden 28. november og et år frem, vil en eksponeringstid over 365 dage således normalt give anledning til, at husets årsmidlede radonkoncentration overestimeres, idet der vil indgå for mange vinderdage i måleperioden.

I Radon-95 projektet [A97a] var forholdet mellem vintermålinger og årsmiddelværdier i gennemsnit omkring 1.20 (det vil sige, at radonkoncentrationen på vinterdage i gennemsnit var 20 % højere end årsmiddelværdien). For at vurdere problemets størrelse betragtes et hus, hvor eksponeringstiden var 1 år plus 50 dage (altså 415 dage). Hvis husets sande årsmiddelværdi er 100 Bq/m^3 , da vil vores måling i dette tilfælde give resultatet:

$$C_{\text{observeret}} = \frac{365 + 1.20 \cdot 50}{365 + 50} \cdot 100 \text{ Bq/m}^3 \quad (9)$$

$$= 1.024 \cdot 100 \text{ Bq/m}^3 \quad (10)$$

$$\approx 102 \text{ Bq/m}^3 \quad (11)$$

For hovedparten af husene formodes det således, at fejlen fra eksponeringstiden er mindre end 2.4 %. I alt indgår der 31 enfamiliehuse i undersøgelsen, som har eksponeringstider over 415 dage. Tilsvarende indgår der kun 7 huse med en eksponeringstid under 350 dage. Hvis man korrigerer alle radonmålinger på baggrund af ovenstående udtryk ændres landsværdien for den uvægtede aritmetiske middelværdi fra 80.8 til 80.6 Bq/m^3 . Den gennemsnitlige korrektionsfaktor er 0.9977. Hvis radonkoncentrationen på vinterdage antages at være dobbelt så stor som årsmiddelværdien, opnås en gennemsnitlig korrektionsfaktor på 0.9890.

Fordelingen af eksponeringstider for flerfamiliehuse svarer til den, der blev observeret for enfamiliehuse. Eksempelvis er middelværdien også i dette tilfælde 369 dage. Indflydelsen forventes dog at være endnu lavere end for enfamiliehuse, da radonkoncentrationen i flerfamiliehuse i mindre grad varierer igennem året.

Sammenfattende kan det siges, at det skitserede problem vedr. eksponeringstiderne kun formodes at have en marginal indflydelse på undersøgelsens resultater.

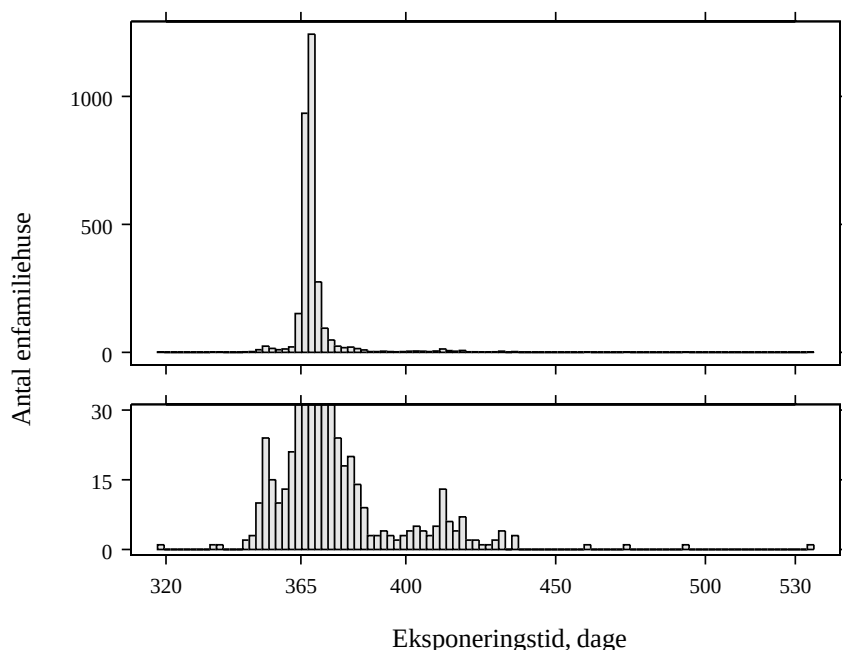
Målested

Stuemålinger

Hovedformålet med undersøgelsen har været at foretage en kortlægning af de danske radonforhold. Under planlægningen af undersøgelsen blev det besluttet at nøjes med stuemålinger (altså en måling pr. hus) i de enkelte huse fremfor dobbeltmålinger (en måling i både stue og soveværelse), da der ellers kun kunne måles i halvt så mange huse. Denne disposition forekommer (stadig) at være hensigtsmæssig, da radonkoncentrationen udviser større variation fra hus til hus end fra rum til rum i det enkelte hus. En vigtig omkostning ved valget er dog, at "husværdierne" (dvs. middelværdien af radonkoncentrationen i stue og soveværelse) må beregnes under anvendelse af en korrektionsformel, og at denne korrektion er forbundet med betydelig usikkerhed (se Bilag F). Betydningen af dette behandles i det efterfølgende afsnit.

Stuens placering

Målingerne er foretaget i husenes primære opholdsstue uanset om denne ligger i kæl-



Figur 65. Fordeling af eksponeringstiden for radonmålingerne i de 3019 enfamiliehuse. Hovedparten af målingerne tog et år (svarende til 365 dage). En del målinger afveg dog en del herfra, hvilket fremgår af det nederste plot, som er begrænset til kun at vise data for grupper med mindre end 30 huse i hver.

deren, i det såkaldte stueplan eller på første sal. Dette valg blev foretaget for at få det bedst mulige billede af radonforholdene, hvor beboerne faktisk opholder sig. Det kan hævdes, at sammenligningen mellem forskellige enfamiliehuse ville have været lettere, dersom målestedet var standardiseret til altid kun at være i stueplanet. Disse forhold tages der imidlertid højde for i faktoranalysen (se afsnit 4.14).

Måleusikkerhed

Der er naturligvis usikkerhed behæftet med de gennemførte radonmålinger, og der er gennemført usikkerhedsberegninger for hver enkelt måling iht. proceduren beskrevet i Radon-95 projektet [A97a, s. 80]. Den typiske usikkerhed for en husværdi omkring 20 Bq/m^3 er 6 Bq/m^3 . For en husværdi omkring 400 Bq/m^3 er usikkerheden 90 Bq/m^3 . De angivne usikkerheder udtrykkes (her såvel som i det følgende) som en enkelt standardafvigelse på resultatet. Beregningen omfatter alle kendte fejlkilder såsom:

Systematiske fejl ved de opgivne referenceværdier Som beskrevet side 97 er kalibreringen af det anvendte målesystem sporbar til NRPB i England, som videre er sporbar til standarden på NPL (*National Physical Laboratory*). Referenceværdierne kan imidlertid ikke garanteres til at være bedre end omkring 5 % (udtrykt som en standardafvigelse). Det betyder eksempelvis, at denne kilde til usikkerhed forholdsvis let kan give anledning til en systematisk 5 %-fejl på alle målinger således, at gennemsnittet af alle målinger er 5 % for lille eller 5 % for stort. Denne fejlkilde kunne således bidrage til at forklare forskellen mellem den nye og den gamle landsdækkende radonundersøgelse.

Tællestatistik Denne fejlkilde er af statistisk natur og vil kun bidrage væsentligt for huse med meget lave koncentrationer, hvor der er lille forskel mellem huseksponering og baggrundseksponering.

Måleprocedure Denne fejlkilde omfatter en række tilfældige fejl såsom materialevarianabilitet for de enkelte folier og forskelle i ætsbetingelser.

Transittid Hvis dosimetrene er lang tid undervejs (fra de nedtages af beboerne, til de modtages på SIS eller Risø), udsættes de for en ukendt eksponering. I denne undersøgelse vurderes denne fejlkilde dog at være af helt marginal betydning pga. den lange eksponeringstid i husene.

Husværdiberegning De målte stuekoncentrationer omsættes til vurderede husværdier som beskrevet i afsnit 2.2 og Bilag F. Denne omsætning bidrager med en betydelig usikkerhed for huse med høje radonniveauer (idet sådanne huse kan have vidt forskellige radonkoncentrationer i stue og soveværelse). Korrektionen beror på, hvordan forholdet er i gennemsnit. Af disse årsager er usikkerheden ved (høje) stuemålinger betydeligt mindre end de beregnede husværdier.

De beskrevne fejlkilder kan naturligvis bidrage til at resultaterne for denne undersøgelse, som beskrevet i afsnit 6.2, afviger signifikant fra resultaterne i den gamle undersøgelse. Eksempelvis kan det ikke afvises, at samtlige målinger i denne undersøgelse systematisk er 5 % for høje, mens alle målinger i den gamle undersøgelse er 5 % for lave. Imidlertid er der ikke måletekniske grunde til at tro at den nye undersøgelse på nogen punkter er af ringere kvalitet i forhold til den gamle. Derimod kan det påvises, at der er en række andre forhold, som klart taler for at den nye undersøgelse giver det mest retvisende billede af de danske radonforhold (se side 61).

Betydning af tilfældige fejl

Det skal pointeres, at tilfældige fejl (f.eks. som følge af tællestatistik) primært er af betydning for resultaterne for de enkelte boliger. De repræsentative statistikker vil derimod være påvirket i mindre grad idet fejlene vil tendere mod at ophæve hinanden. Imidlertid kan det ikke forventes, at fejlene helt udslukker hinanden for statistikker som den geometriske middelværdi eller andelen af huse over 200 Bq/m^3 [Mi94]. Dette skyldes, at disse statistikker ikke afhænger lineært af målingerne. For nærværende undersøgelse kan det vises [A99b], at de beregnede tilfældige fejl kan give anledning til, at den beregnede andel af husværdier over 200 Bq/m^3 overestimeres med 0.8 %-point. Tilsvarende forhold vil gælde for den gamle undersøgelse.

7 Konklusion

Der er gennemført en kortlægning af radonforholdene i danske boliger. Koncentrationen af radon-222 er målt i 3019 enfamiliehuse og 101 flerfamiliehuse (etageboliger) med den såkaldte sporfoliemetode. Undersøgelsens hovedkonklusioner er som følger:

- Det gennemsnitlige radonniveau (aritmetisk middel) er 77 Bq/m^3 for enfamiliehuse og 18 Bq/m^3 for flerfamiliehuse.
- Omkring 4.6 % af de danske enfamiliehuse (dvs. 65 000 huse) har et indendørs radonniveau over 200 Bq/m^3 . Radonproblemet i danske enfamiliehuse er således større end hidtil antaget. Der forekommer ikke væsentlige radonmæssige problemer i danske flerfamiliehuse.
- Kortlægningen viser, at der er en betydelig variation i de gennemsnitlige radonniveauer fra sted til sted. Undersøgelsens hovedresultat er et danmarkskort, som viser landets 275 kommuner inddelt i fem klasser. I den laveste klasse har mindre end 0.3 % af enfamiliehusene værdier over 200 Bq/m^3 . I den højeste klasse overstiger andelen 10 %.
- Undersøgelsen viser, at mange faktorer er bestemmende for radonkoncentrationen i danske boliger. For enfamiliehuse er de tre vigtigste faktorer:
 1. Husets kælderforhold (terrændæk giver mest radon)
 2. Landsdel (Sjælland, Øerne og Bornholm giver mest radon)
 3. Jordart (moræneler, smeltevandsgrus og morænesand giver mest radon)
- Der er udviklet en matematisk model, så man kan vurdere radonkoncentrationen i et hus på baggrund af simple oplysninger om huskonstruktion og geologi. Modellen er dog relativ usikker, og den kan således på ingen måde erstatte en egentlig husmåling.
- Undersøgelsen bekræfter, at jorden under husene er den vigtigste kilde til radon i danske enfamiliehuse.
- Der kan ikke påvises væsentlige sammenhænge mellem indendørs radon og anvendte byggematerialer ud over, at enfamiliehuse med ydervægge af træ har en tendens til at have et lavere radonniveau end tilsvarende huse med ydervægge af mursten eller beton.
- Undersøgelsen viser, at mekanisk ventilation i gennemsnit giver anledning til en reduktion af radonkoncentrationen i enfamiliehuse på omkring 20 %. Der kan ikke påvises nogen sammenhæng mellem indendørs radon og beboernes udluftningsvaner registreret vha. spørgeskemaundersøgelse.
- Undersøgelsen giver ikke anledning til at tro, at en væsentlig del af nyere danske enfamiliehuse har en lufttæt konstruktion mod jord. Der indgår 103 enfamiliehuse i undersøgelsen fra perioden 1988–1995.
- Den radonmæssige betydning af de vigtigste danske jordarter er kortlagt. Moræneler, smeltevandsgrus og morænesand giver mest radon i enfamiliehuse, og flyvesand, saltvandssand og ferskvandstørv giver mindst. Den radonmæssige betydning af jordarterne varierer mellem landsdelene, og denne variation har en tendens til at følge et fælles mønster jordart for jordart. Hvis moræneler eksempelvis giver anledning til høje radonkoncentrationer i en bestemt landsdel og lave radonkoncentrationer i en anden, så er der en tendens til at smeltevandssand (i de samme landsdele) også gøre det.

Undersøgelsens resultat er et forbedret informationsgrundlag for befolkning, byggebranche samt centrale og lokale myndigheder. Undersøgelsen er samtidig et godt grundlag for en fremtidig indsats for at nedbringe radonniveauet i eksisterende og kommende danske boliger.

Bidrag til undersøgelsens gennemførelse

Radonundersøgelsen har kun kunnet gennemføres takket være stor forståelse og hjælp fra mange sider. Der skal rettes en særlig tak til:

- Sundhedsministeriet for finansiering af undersøgelsen.
- Beboere og kommuner for medvirken i undersøgelsen.
- Steffen Bendix (Boligministeriet) for udtræk af statistisk repræsentative boliger fra BBR (Bolig- og Bygningsregisteret).
- Peter Grøn (SIS) for etablering, vedligeholdelse og brug af undersøgelsens access-database.
- Lis Sørensen (Risø) for den omhyggelige håndtering af de mere end 3000 radondosimetre.
- SIS- og Risø-medarbejdere for hjælp med afsendelse og modtagelse af diverse korrespondance og radondosimetre samt for korrekturlæsning.
- Morten Lind, Mogens Jeppesen, Jette Christensen og Peter Laulund (Produktudviklingskontoret, Kort & Matrikelstyrelsen) for identifikation af husenes UTM-koordinater.
- Peter Roll Jakobsen og Frants von Platen (GEUS) for medvirken ved analyse af geologiske kortlægningsdata.
- Peter Kirkegaard (Risø) for bidrag til den statistiske kommunemodell.

A Sammenfatning

A.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. Meget tyder på at radon i indendørsluften forøger risikoen for lungekræft. Bygningsmyndighederne anbefaler, at man med simple tiltag søger at nedbringe radonkoncentrationen i huse med niveauer over 200 Bq/m^3 . Af geologiske årsager varierer radonkoncentrationen fra sted til sted, og det er derfor meningsfyldt at kortlægge de danske radonforhold. Det er vigtigt at vide, hvor mange huse, som har høje niveauer, og det er vigtigt at vide, hvor disse huse befinder sig. Tilsvarende er det også af interesse at have viden om huse med lave niveauer, hvor der ikke er grund til bekymring eller særlig indsats.

Første landsdækkende undersøgelse

I 1985–86 blev den første landsdækkende undersøgelse af naturlig stråling i danske boliger gennemført. Herunder blev der foretaget radonmålinger i 348 enfamiliehuse og 150 flerfamiliehuse. Undersøgelsen viste, at gennemsnitsdanskere har en radonkoncentration i sin bolig på omkring 50 Bq/m^3 . Samtidig er der en betydelig variation fra bolig til bolig. I Danmark er der målt årsmiddelværdier fra omkring 5 til 1000 Bq/m^3 . Selv for gennemsnitsdanskere udgør radon den dominerende strålingskilde. Det vurderes, at radon i Danmark medfører omkring 300 lungekræfttilfælde om året. Radon formodes næst efter rygning at være den vigtigste årsag til lungekræft.

Formål

Formålet med den nye landsdækkende undersøgelse har været:

- at bestemme den nuværende repræsentative fordeling af radonkoncentrationer i danske boliger, herunder at bestemme den "høje ende" af fordelingen med betydelig større sikkerhed end den tidligere landsdækkende radonundersøgelse fra 1985–86,
- at klarlægge geografiske forskelle i fordelingen af radonkoncentrationen og om muligt sammenholde disse med viden om den lokale geologi, samt
- at undersøge, om der er sket ændringer i radonniveauet i danske boliger siden den forrige landsomfattende undersøgelse f.eks. som følge af bygningsforbedringer, forbedret nybyggeri eller oplysning til befolkningen om radonproblemet.

A.2 Måleprogram

Det gennemførte måleprogram kan resumeres på følgende måde:

- Der blev målt radon i 3019 enfamiliehuse. For hver dansk kommune foreligger der en tilfældigt udtrukket stikprøve med 3–23 huse.
- Der blev målt radon i 101 flerfamiliehuse. For hvert amt foreligger der en tilfældigt udtrukket stikprøve med 4–11 huse.
- For hver bolig er der kun foretaget én måling (nemlig en måling i stuen). Disse stuemålinger omregnes til såkaldte husværdier under hensyntagen til, at der erfaringsmæssigt er mindre radon i soveværelset end i stuen. Rapporten bygger næsten udelukkende på disse beregnede husværdier.

- For hovedparten af boligerne foregik radonmålingerne fra den 28. november 1995 og et år frem. Målingerne er således årsmiddelværdier.
- Der blev indsamlet supplerende information om huskonstruktion og geologi. Disse oplysninger danner grundlag for undersøgelsen af hvilke faktorer, som har betydning for om der er meget eller lidt radon i et hus.

A.3 Resultater

Landsværdier

Det gennemsnitlige radonniveau (aritmetisk middel) er 77 Bq/m³ for enfamiliehuse og 18 Bq/m³ for flerfamiliehuse.

Undersøgelsen viser, at omkring 4,6 % af danske enfamiliehuse har radonniveauer over 200 Bq/m³. Det svarer til omkring 65 000 huse. Undersøgelsen viser således, at radonproblemet i Danmark er mere omfattende end hidtil antaget, idet antallet af huse med værdier over 200 Bq/m³ i den første landsdækkende undersøgelse blev vurderet til at være omkring 45 000.

Ingen af flerfamiliehusene i undersøgelsen havde værdier over 200 Bq/m³. Undersøgelsen fokuserer derfor på radonforholdene for enfamiliehuse.

Amtsværdier

Der er stor forskel på radonforholdene fra amt til amt. Bornholms Amt er det amt, hvor andelen af enfamiliehuse over 200 Bq/m³ er størst (16,5 %). Dernæst kommer de sjællandske amter og Fyn, hvor 6 til 8 % af enfamiliehusene er over 200 Bq/m³. I bunden af skalaen findes Ribe, Nordjyllands og Ringkøbing amter, hvor andelen er under 1 %. Tabel 5 på side 14 i hovedteksten giver en komplet oversigt over amtsværdierne.

Kommuneværdier

Typisk er der kun foretaget målinger i 10 huse i hver kommune. For på det grundlag at opnå det bedst mulige kommuneestimat af andelen af huse med niveauer over 200 Bq/m³ er der udviklet en statistisk model. Modellen gør bl.a. brug af supplerende geologiske data i form af forekomsten af sand og grus i de enkelte kommuner.

Et af undersøgelsens hovedresultater er kommunekortet over andelen af huse over 200 Bq/m³ (se side 17). Kortet viser landets 275 kommuner inddelt i fem klasser. Der er 21 kommuner i klasse 0. For disse kommuner vurderes det, at mindre end 0,3 % af husene er over 200 Bq/m³. Disse kommuner er markeret på kortet med den lyseste farve. I den anden ende af skalaen findes 24 kommuner i klasse 4. Disse kommuner er på kortet vist med den mørkeste farve. For disse kommuner vurderes det, at mere end 10 % af husene har niveauer over 200 Bq/m³. Hovedparten af kommunerne (i alt 116 stk.) er i klasse 3. Denne klasse svarer til, at mellem 3 og 10 % af husene ligger over 200 Bq/m³.

Det skal understreges, at kommunevurderingerne er forbundet med betydelig usikkerhed. Dette fremgår direkte af databladene i Bilag J. Der vil med sikkerhed være kommuner i landet, som er væsentligt fejlvurderede. Dette skyldes, at der kun er foretaget omkring 10 målinger i hver kommune. Forbedrede kommunevurderinger kan reelt kun tilvejebringes ved at foretage yderligere husmålinger.

Som privatperson kan man opfatte kommuneestimatene som et udtryk for at risikoen for at bo i et hus med radonproblemer er forskellig fra kommune til kommune. Således kan kortet være af interesse ved huskøb eller nybyggeri. Fra et myndighedssynspunkt hjælper kortet til at identificere områder, hvor der er behov for informations- og målekampagner eller andre tiltag mod høje radonniveauer. Omvendt kan man sige, at kortet viser, hvor der ikke er sådanne behov. Kortlægningen kunne således give anledning til en mere differentieret indsats mod radon. For nærværende er der ingen radonmæssig

forskel på krav eller anbefalinger (f.eks. vedr. måling eller radonsikring af nybyggeri) i Skagen og Ringe kommuner til trods for, at radonforholdene de to steder er vidt forskellige.

Faktorer

Undersøgelsen påviser, at en række bygningstekniske og geologiske faktorer påvirker radonkoncentrationen i enfamiliehuse. De tre vigtigste faktorer er 1) kælderforhold, 2) landsdel og 3) jordart. Eksempelvis er der i gennemsnit væsentligt mindre radon i stueetagen i huse med fuld kælder fremfor "stueetagen" i huse med terrændæk. Tilsvarende kan det eksempelvis påvises, at der i gennemsnit er væsentligt mindre radon i huse på flyvesand end huse på moræneler. Undersøgelsen bekræfter, at jord er den væsentligste kilde til radon i danske enfamiliehuse. Byggematerialer er af mindre betydning.

Faktorernes betydning er undersøgt vha. regressionsanalyse, og der er udviklet en model, så man for givne huse kan foretage en simpel vurdering af radonkoncentrationen. Først svarer man på ni spørgsmål af typen:

- I hvilken landsdel ligger huset?
- Hvilken slags hus er det?
- Hvor mange etager har huset?
- Er der et mekanisk ventilationsanlæg?

Dernæst omsættes svarene til tal vha. en tabel (se side 50). Produktet af disse tal giver husets radonkoncentration. Sådanne estimater er dog meget usikre, og kan på ingen måde erstatte en egentlig radonmåling.

Radon i nyere enfamiliehuse

Siden 1988 har bygningsmyndighederne anbefalet, at huse udføres med lufttæt konstruktion mod jord. Med 1998 bygningsreglementet for småhuse er dette gjort til et krav. Husene skal bygges "radonsikkert". Undersøgelsen påviser, at der ikke er nogen radonmæssig forskel mellem huse bygget før eller efter 1987, som skyldes husenes alder. Det kan påvises, at der med stor sikkerhed trænger jordluft ind i hovedparten af nyere danske enfamiliehuse. Der indgår 103 enfamiliehuse i undersøgelsen fra perioden 1988–1995.

B Summary

Report title: *Radon in Danish dwellings. Mapping of state, county and municipality values.*

B.1 Abstract

A survey of radon in Danish dwellings has been carried out. The concentration of radon-222 has been measured in 3019 single-family houses and 101 multi-family houses (apartment complexes) with the so-called alpha-track technique (CR-39). On this basis, a map has been established. This map shows the percentage of single-family houses in each of the 275 municipalities with levels above 200 Bq/m³ (i.e. the action level recommended by the Danish building authorities for simple radon remediation). For Denmark as a whole, 4.6 % of the single-family houses are above 200 Bq/m³. That corresponds to 65 000 houses. In certain parts of the country (e.g. northern Jutland) less than 1 % are above 200 Bq/m³. In other places (e.g. certain parts of Funen and Bornholm) the value is above 10 %. In the survey, 15 houses had levels above 400 Bq/m³. The relationship between radon and various factors has been investigated with regression analysis. The three most important factors are type of basement, province, and soil type. The analysis confirms that the soil below the houses is the most important source of radon in Danish single-family houses. The study also provides a more detailed picture of the relation between geology and indoor radon. For example, it is shown that clayey till generates different indoor radon levels in the different parts of the country. The study does not indicate that a substantial part of newer Danish houses have an airtight house-soil interface.

B.2 Introduction

Radon is believed to cause an increased risk of lung cancer [UN00] and it is therefore of interest to identify houses with high levels of indoor radon. It is important to know how many houses that have “high” levels (e.g. annual levels above 200 or 400 Bq/m³), and it is important to know where these houses are located. Likewise, it is also of interest to know about the low-radon houses where there is no cause for alarm. This document reports on a new Danish survey of indoor radon designed to tackle these problems. The survey is much larger than the first one from 1985/86 [St87a, U88] and houses have been selected in a different way. The objective of this English summary is to highlight some main results. A more detailed account on the statistical model used for the municipality map is given elsewhere [A99b].

First national survey

In 1985–86 the first national survey of indoor radon was carried out in Denmark [St87a, U88]. That survey comprised 498 dwellings. Radon concentrations were in the interval from 5 to 600 Bq/m³, and the arithmetic mean was about 50 Bq/m³.

Danish requirements and recommendations

Since the first national survey, the building authorities have issued the following pamphlets about radon:

- Radon in dwellings (1987)
- Radon in new houses (1988, revised 1993)
- Radon in single-family houses (1997)

Since 1988 the building authorities have recommended that new houses are built “radon safe”. This means that houses should be built with an airtight floor construction such that radon cannot enter from the ground. The 1998 building code requires that all single-family houses are built radon safe [Bo98]. Furthermore, this code recommends that simple and inexpensive measures against radon are taken if radon levels are between 200 and 400 Bq/m³, and that more effective measures are taken for levels above 400 Bq/m³. The building authorities tell homeowners that it is possible to measure for radon, but homeowners are not directly advised to do so.

Working group

The new national survey of indoor radon has been carried out by:

- Risø National Laboratory,
- National Institute of Radiation Hygiene (SIS), and
- Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS)

The survey is financed by the Danish Ministry of Health.

Purpose

The purpose of the survey is as follows:

- to determine the current representative distribution of radon concentrations in Danish dwellings. The high-concentration tail of the distribution should be determined with significantly improved accuracy compared to the previous national survey [St87a, U88].
- to expose geographically based differences in radon concentration levels and if possible to link such differences to knowledge about local geology.
- to assess if the radon level in Danish dwellings has changed since the previous national survey, for example, as a result of remediation, improved building practice or public information about the radon problem.

B.3 Materials and methods

Demographic information

In the survey, Denmark is divided into 15 counties (in Danish: *amter*). One of these is an artificial “county” consisting of Copenhagen and Frederiksberg municipalities. Each county consists of a number of smaller municipalities (in Danish: *kommuner*). In total there are 275 municipalities and about $1.4 \cdot 10^6$ single-family houses in Denmark. The population of Denmark is about $5.2 \cdot 10^6$.

Surface geology information

For Denmark as a whole, about 43 % is clay (40 % clayey till and 2 % limnic clay) and 56 % is sand (27 % meltwater sand and 12 % marine and eolian sand). The island *Bornholm* is the only place in Denmark with a granitic surface geology.

Selection of single-family houses

Within each municipality, single-family houses have been selected randomly by the Building and Dwelling Register (BBR). There are from 3 to 23 house measurements per municipality. The median number is 11. The variability in the number of measurements

per municipality mainly reflects how many house occupants agreed to participate in the survey.

Selection of multi-family houses

Within each county, multi-family houses have been selected randomly by the Building and Dwelling Register.

Radon measurements

One-year alpha track measurements (CR-39) were done in 3019 single-family houses and 101 multi-family houses. Almost all measurements started November 29, 1995. The measurements were conducted by Risø. Detectors were placed in living rooms. The raw living-room radon concentrations are converted to *house radon concentrations* on the basis of results from the previous national survey where measurements were carried out in both living-rooms and bedrooms. The idea is to compensate for the observation that radon levels are normally lower in bedrooms than in living rooms. However, this is not always so, and house radon concentrations are therefore more uncertain than the (raw) living-room measurements. Unless explicitly stated, radon concentrations given in the report are *house radon concentrations*.

Supplementary information

Each radon measurement is supplemented by information on exact house coordinates, surface geology and house construction. Information is also available from questionnaires answered by house occupants.

Municipality model

One important outcome of the survey is the prediction of the fraction of houses with an annual average radon concentration above 200 Bq/m³. To obtain the most accurate estimates and to assess the associated uncertainties, a statistical model has been developed. The model is based on a transformation of the data to normality and on bias-adjusted estimators of the quantities of interest. Bayesian statistics are used to minimize the effect of small sample size. In each municipality, the correction is dependent on the fraction of the area that has a dominating surface geology of sand and gravel. The uncertainty analysis is done with a Monte Carlo technique. Further details can be found elsewhere [A99b].

Regression analysis

To identify relationships between indoor radon in single-family houses and building and soil related factors, we apply a model of the form:

$$Rn = \beta_0 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 \cdot \beta_5 \cdot \beta_6 \cdot \beta_7 \cdot \beta_8 \cdot \beta_9 \quad (B.1)$$

where Rn is the house radon concentration and β_0 is a constant (a baseline value independent of the house in question), and where the regression coefficients β_1 – β_9 depend on the nine factors included in the model: (1) type of basement, (2) province, (3) soil type, (4) type of house, (5) number of house floors, (6) distance to the ground water table, (7) location of dosimeter (floor number), (8) mechanical ventilation, and (9) wood as a building material. The factor *type of basement* hence controls the value of β_1 , just like the factor *province* controls β_2 etc.

This particular model has been fitted to the measurements with linear regression analysis (least-squared method [Mat00]) of log-transformed radon concentrations and dummy variables. The method has previously been used in other countries [Mä90, Gu92, V94,

Mä98]. Symbolically, the purely additive regression model can be expressed as:

$$\log(\text{Rn}) \sim \text{Basement type} + \text{Province} + \text{Soil type} + \dots \quad (\text{B.2})$$

For reasons of simplicity, no interactions are included in the model. It can, however, be demonstrated that first-order interaction exists between (at least) province and soil type.

B.4 Results

National values

Table B.1 shows the main results for Denmark as a whole. It can be seen that about 4.6 % of all Danish single-family houses are estimated to have an annual average radon concentration above 200 Bq/m³. Multi-family houses have very low radon concentrations. None of the surveyed multi-family houses had levels above 200 Bq/m³.

Table B.1. Representative values for Denmark. 68 % confidence intervals are marked in brackets. All radon measurements were carried out in living rooms. The stated house values estimate the average level in the living-room and the bedroom.

	AM	ASD	GM	GSD	f_{200}	f_{400}	Min	Max
<u>Single-family houses</u>								
Living-room values	89.5 [87.5 – 90.9]	83.2 [78.0 – 84.9]	63.6 [63.2 – 65.5]	2.44 [2.37 – 2.46]	8.4 [7.9 – 9.0]	0.88 [0.69 – 1.08]	2	790
House values	77.3 [75.9 – 78.5]	65.4 [61.6 – 66.4]	57.7 [57.4 – 59.3]	2.28 [2.22 – 2.30]	4.6 [4.2 – 5.1]	0.38 [0.27 – 0.48]	2	590
<u>Multi-family houses</u>								
Living-room values	19.3 [17.8 – 21.6]	20.0 [17.4 – 22.9]	13.2 [12.0 – 14.3]	2.40 [2.24 – 2.65]	0	0	1	104
House values	18.0 [16.6 – 19.7]	15.5 [13.6 – 17.4]	13.6 [12.6 – 14.7]	2.12 [2.00 – 2.31]	0	0	1	80
AM : Arithmetic mean, Bq/m ³ ASD : Arithmetic standard deviation, Bq/m ³ GM : Geometric mean, Bq/m ³ GSD : Geometric standard deviation								
f_{200} : Observed percentage with values > 200 Bq/m ³ f_{400} : Observed percentage with values > 400 Bq/m ³ Min : Minimum, Bq/m ³ Max : Maximum, Bq/m ³								

County values

The results for single-family houses in each county are given in Table 5 (page 14) in the main text. The symbols N_{200} and N_{400} give the total number of houses estimated to be above 200 and 400 Bq/m³, respectively. There is no significant difference among the mean county values for radon in multi-family houses.

Municipality values

On the basis of the statistical model, we have estimated the fraction of houses above 200 Bq/m³ (f_{200}) for each of the 275 municipalities. Depending on the f_{200} -estimates, each municipality is then classified as follows:

Class 0 : 0–0.3 %

Class 1 : 0.3–1 %

Class 2 : 1–3 %

Class 3 : 3–10 %

Class 4 : 10–30 %

21 municipalities are in class 0, 46 in class 1, 68 in class 2, 116 in class 3, and 24 in class 4. The geographical distribution of the classified municipalities are shown in Figure 7 (page 17). It can be seen that class 0 and 1 municipalities are primarily located in the western part of Denmark. Appendix J provides detailed results (including uncertainties associated with the f_{200} -estimates) for all municipalities.

Regression analysis

The factors investigated are listed in Table B.2. Nine factors indicated in the table are included in the main regression model. This model can account for 35 % of the house-to-house variability (R^2).

Table B.2. List of factors investigated in the survey.

Theme and factor name	Included in regression model	Source	Section in the main text
Geology			
County	No	BBR	4.1
Province	Yes	GEUS	4.2
Soil type	Yes	GEUS	4.3
Soil type	No	house occupants	4.4
Distance to groundwater	Yes	house occupants	4.5
House construction			
Type of basement	Yes	house occupants	4.6
Building material	Yes ^a	BBR	4.7
Building material	No	house occupants	4.8
Type of roof	No	BBR	4.9
House size			
Area, built on	No	BBR	4.10
Area, inhabited	No	BBR	4.11
Number of floors	No	BBR	4.12
Number of floors	Yes	house occupants	4.13
Location of dosimeter	Yes	house occupants	4.14
Ventilation			
Ventilation system	Yes ^b	BBR	4.15
Air exchange, bedroom	No	house occupants	4.16
Air exchange, living room	No	house occupants	4.17
Type of house etc.			
House type	No	BBR	4.18
House type	Yes	house occupants	4.19
Year of construction	No	BBR	4.20

^a In modified form: 1) Wood or 2) other materials.

^b In modified form: 1) Mechanical systems or 2) other systems.

In the main text, each factor is discussed in turn in individual sections. These sections all start with a so-called factor plot. As an example, Figure B.1 shows the factor plot for the factor *type of basement*. The idea is to present all important data relating to each factor in one single figure. The histogram in the middle shows how the surveyed houses are distributed among the various basement classes. It can be seen that most houses go into the category called *no basement* (i.e. they are slab-on-grade houses). The box plot [C93] to the left in the figure shows the distribution of radon measurements within each basement class. The whiskers mark the 5 and 95 % quantiles whereas the box marks the 25 and 75 % quantiles. The black dot is placed at the median level (i.e. at the 50 % quantile). The percentage of houses above 200 Bq/m³ in each category is written next to the 95 %-whisker. For example, the plot shows that only 0.3 % of the houses with a full-basement had levels above 200 Bq/m³. The plot to the right shows regression analysis results. One class is selected as reference. This is always the class with most houses (in

this case, the slab-on-grade houses). The reference class always has index 1. The indices for other classes give the relative main effects on the indoor radon level. For example, it can be seen from the plot that the index for *full basement* is about 0.4. This means that if a house is changed from slab-on-grade to full basement, then we predict the radon concentration (on the average) will decrease to 40 % of the original value. Classes that have an insignificant effect on the radon level (compared with the reference) are marked with open circles in the plot. The important feature of the index plot is that it (attempts) to show the isolated effect of the factor after correction for other factors (soil type, house type etc.). Such corrections are needed because the study is strongly unbalanced: There is not an identical number of observations in each class, as one would have in a well-designed laboratory experiment. It is therefore necessary, for example, to consider that houses with a basement are not equally common in the different parts of Denmark and on the various types of geology. Unfortunately, the correction provided by the regression model is not perfect. For example, this model can only account for a limited part of the house-to-house variability (35 %). Without further comment, we give the factor plots for the two next-most important factors controlling radon in Danish single-family houses: Province in Figure B.2 and type of soil in Figure B.3.

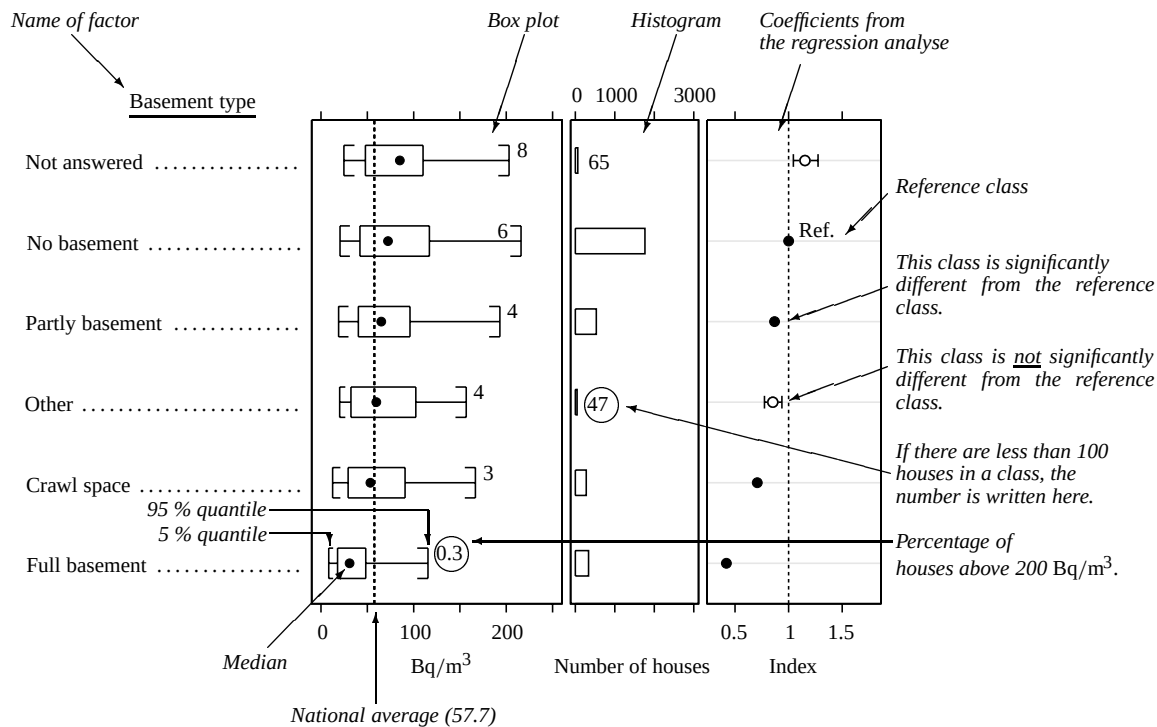


Figure B.1. Factor plot (with explanations) for the factor called basement type. The corresponding diagram (without explanations) is shown page 33.

Comparison with the old survey

The new survey shows that the problem of indoor radon is somewhat larger than indicated by the first survey [St87a, U88]. In the first survey it was estimated that about 45 000 houses had levels above 200 Bq/m³. The new survey shows that the number is about 65 000. The difference between the results from the two surveys is significant. There are four reasons why we believe that the new survey gives more accurate results:

- The new survey includes more measurements and is therefore less sensitive to random errors from small sample sizes.

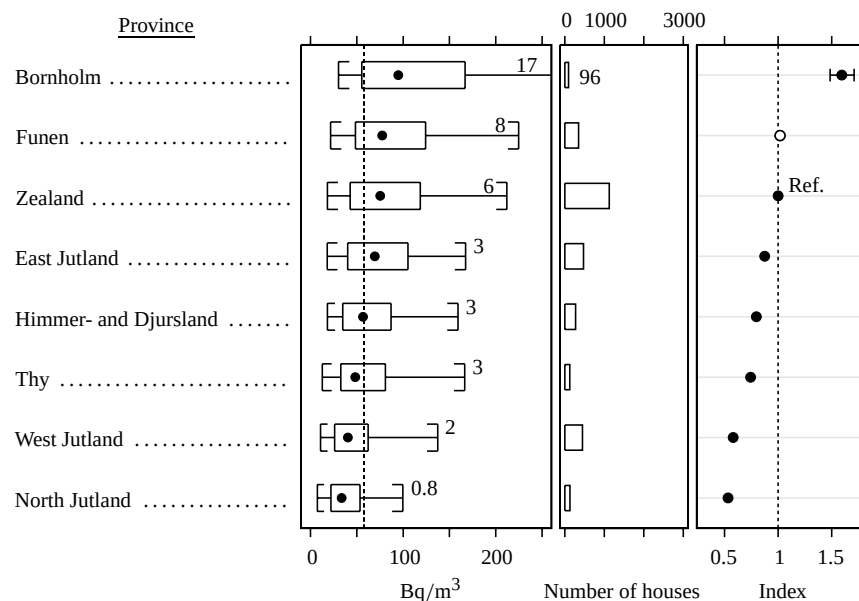


Figure B.2. Survey results for single-family houses classified by province.

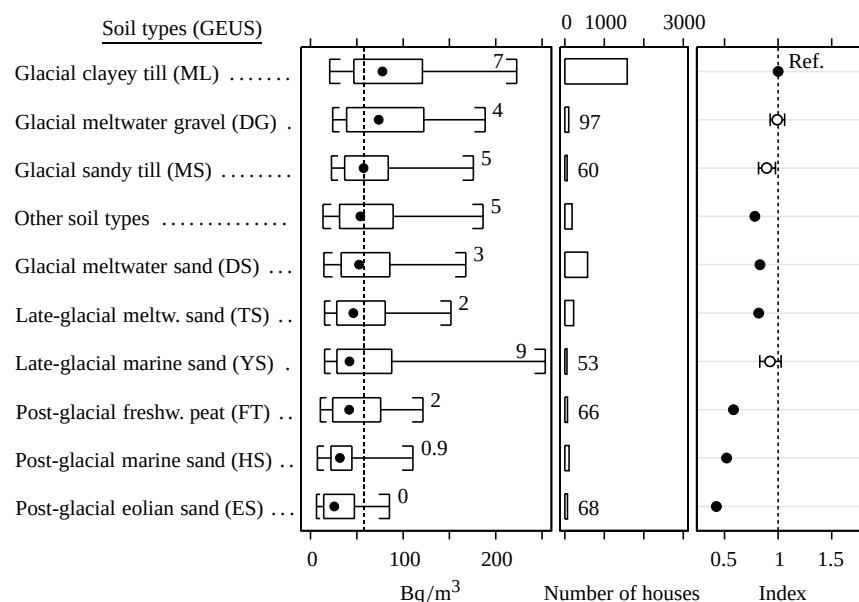


Figure B.3. Survey results for single-family houses classified by soil type.

- The new survey is based on a stratified design where houses were selected randomly within each municipality. It is therefore less likely that we have overlooked special geologies or house construction types. In general, stratified sampling tends to provide better estimates of population statistics (if reasonable homogeneous strata are selected) compared with the situation when one single random sample is selected [Co77].
- The new survey includes corrections for the fact that people in different parts of the country did not have the same willingness to participate in the survey. Such corrections were not included in the old survey.
- In the new survey, we have measured the annual radon concentration directly (one-year exposure time) whereas the old survey was based on six-month measurements and correction factors.

From one perspective, the old survey is better from the new one:

- The new survey is based only on radon measurements in living rooms whereas the old survey was based on measurements in both bedrooms and living rooms.

This point, however, can not explain the differences between the two surveys: If the comparison is restricted to living-room measurements only, the difference is even larger than when it is based on house values.

Conclusions

A survey of radon in Danish dwellings has been carried out. The concentration of radon-222 has been measured in 3019 single-family houses and 101 multi-family houses (apartment complexes) with the so-called alpha-track technique. The main conclusions are:

- The average radon level (arithmetic mean) is 77 Bq/m³ for single-family houses and 18 Bq/m³ for multi-family houses.
- About 4.6 % of the Danish single-family houses (i.e. 65 000 houses) have an indoor radon level above 200 Bq/m³. Hence, the radon problem in Danish single-family houses is larger than assumed previously. No important radon problems seem to exist in Danish multi-family houses.
- The survey demonstrates the existence of a significant variability in average indoor radon levels from place to place. The main outcome of the survey is a map of Denmark that shows the 275 Danish municipalities grouped into five classes, according to the fraction of houses with radon levels above 200 Bq/m³. The lowest class represents areas where less than 0.3 % of the single-family houses have radon levels above 200 Bq/m³. The highest class represents areas where the fraction is above 10 %.
- The survey shows that many factors control the radon levels in Danish dwellings. For single-family houses the three most important factors are:
 1. Type of basement (slab-on-grade constructions give most radon)
 2. Province (Zealand, the Islands and Bornholm give most radon)
 3. Soil type (glacial clayey till, glacial meltwater gravel, and glacial sandy till give most radon)
- A regression model has been developed so that the radon concentration can be estimated on the basis of simple information on house construction and geology. The model is relatively uncertain, and can in no way substitute for a real house measurement.
- The survey confirms that the soil below the houses is the most important source of radon for Danish single-family houses.
- No significant associations between indoor radon and building materials can be established except that single-family houses with wooden outer walls have a tendency to have a lower radon level than similar houses with brick or concrete outer walls.
- The survey shows that mechanical ventilation on the average causes a reduction in indoor radon of about 20 %. No significant association can be established between indoor radon and the airing habits of the house occupants, as registered through questionnaires.
- The survey does not indicate that a substantial fraction of newer Danish houses have an airtight house-soil interface. In total 103 single-family houses from the period 1988–1995 were part of the survey.

- The importance of the main Danish soil types for indoor radon has been mapped. Glacial clayey till, glacial meltwater gravel, and glacial sandy till give most radon in single-family houses, and post-glacial eolian sand, post-glacial marine sand, and post-glacial freshwater peat give the least radon. The importance of the soil types for indoor radon is different from province to province, and this variability tends to follow a common pattern. If glacial clayey till, for example, give high radon levels in one province and low levels in another one, then glacial meltwater gravel also tends to do so (in the same provinces).

The survey has resulted in an improved base of information for the population, the building industry as well as central and local authorities. The survey is also a good foundation for future efforts towards reducing the radon level in existing and new Danish dwellings.

C Geologisk redegørelse

De geologiske forhold indenfor de øverste 5–10 m af jordlagene kendes fra geologiske kort, profiler og udgravninger og boringer samt stedvis ud fra geofysiske opmålinger. Sammensætningen af jordarterne indenfor den øverste meter er baseret på Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelses (GEUS) systematiske kvartærgeologiske kortlægning, som startede i 1888 og stadig er i gang. De kvartære aflejringer dominerer helt indenfor den øverste meter. Kortene viser, at moræneler udgør ca. 40 % af overfladen [Gr97], mens smeltevandssand udgør ca. 28 %, postglacialt og senglacialt marint sand og flyvesand ca. 12 % og morænesand ca. 3 %. Resten af de kvartære jordarter udgør ca. 15 %, mens de prækvartære jordarter udgør omkring 0.5 % indenfor den øverste meter. Forholdene indenfor den øverste meter afspejler kun delvis forholdene videre ned til 10 m under jordoverfladen, hvor de prækvartære aflejringer og bjergarter godt kan have en større udbredelse. Informationer om dette intervals jordartsfordeling fås især fra boringer. Der findes ca. 270 000 boringer i GEUS Borearkiv svarende til ca. 7 punktinformationer pr. km², hvorfor detaljeret kendskab til de dybereliggende geologiske forhold er begrænset. Den geologiske variabilitet indenfor de kvartære aflejringer og de øverste dele af de prækvartære lag er meget stor og helt betinget af de naturlige forhold. De enkelte aflejringers heterogenitet består i en variation i kornstørrelse, interne strukturer og mineralogisk-geokemisk sammensætning. Store variationer kan forekomme indenfor meget korte afstande i både horisontal som vertikal retning, og den rumlige fordeling af parametrene gør det meget vanskeligt at forudsige et områdes geologiske forhold. Dertil kommer det overpræg af tektonisk (glacial og anden) aktivitet, som karakteriserer mange danske aflejringer, og som altid bringer aflejringerne bort fra deres oprindelige position i lagsøjlen. Den geologiske variabilitet beskriver de vanskeligheder, der skal overvindes og karakteriseres i forhold til f.eks. udvælgelse af feltlokaliteter og ved tolkning af forsøgsresultater.

Udarbejdelse af det geologiske materiale

Kortlægningen udføres ved feltarbejde, hvor der foretages en række små boringer til 1 meters dybde med et karteringsspyd. Der stikkes med 200 meters mellemrum og optages en lille jordartsprøve, som beskrives på stedet. Resultaterne heraf indtegnes på Kort- og Matrikelstyrelsens kort i målestoksforhold 1:25 000. Der optegnes også profiler fra daglokaliteter: Råstofgrave, kystklinter, vejskæringer m.v., og der udtages større prøver til laboratorieanalyser. Desuden foretages ofte boringer, så forholdene på større dybde også kan inddrages.

Alle resultaterne rentegnes på kort i 1:25 000, således at områder med samme jordart i 1 meters dybde adskilles fra områder med andre jordarter. Jordarterne tildeles et geologisk jordartssymbol, og desuden er der vedtaget en farvekode for jordarterne, som dækker fladerne. Kortlægningen er færdiggjort for ca. 80 % af landet, og en del af dette areal foreligger trykt i målestok 1:40 000 eller 1:50 000 (f.eks. [Pe95]) og/eller i sort/hvid i målestok 1:25 000. GEUS har digitaliseret de kortlagte områder og udgivet dem på CD-ROM ([He98]). De sidste ca. 20 % af landet mangler at blive kortlagt i felten. For at afhjælpe denne mangel er der fremstillet et landdækkende jordartskort i 1:200 000, hvor de ikke-kortlagte områder er fremstillet ved hjælp af alle andre tilgængelige geologiske data som f.eks. boringer og råstofgravbeskrivelser [Pe89]. Dette kort er blevet scannet og er ligeledes udgivet på CD-ROM [He99].

CD-ROM

C.1 Geologisk gennemgang af hvert amt

De geologiske forhold indenfor hvert amt er beskrevet i det følgende. Kendskabet til de radioaktive forhold (radium og radon) i jordarter og bjergarter er resumeret i slutningen af

hver amtsbeskrivelse. Indholdet af uran og thorium er beskrevet af Engell-Jensen, Korsbech og Madsen [E84].

Nordjyllands Amt

Himmerland

I Nordjylland nord for Limfjorden består aflejringerne indenfor de øverste meter af jordoverfladen især af saltvandsler og sand (marine aflejringer) fra tiden efter istiderne (Senglacial og postglacial). Lerlagene består af siltet og fedt, stenfrit ler og silt, mens sandet overvejende er fint til mellemkornet. Det senglaciale ler indeholder stedvis kalkklaster. Fra det postglaciale tidsnit kendes desuden grovkornet sand, grus og sten i strandvolde og fin-mellemkornet flyvesand. De marine aflejringer ligger typisk oven på istidsaflejringer, især på smeltevandssand og smeltevandssler. I Store Vildmose træffes postglaciale ferskvandsaflejringer som tørv og gytje, men også sand og leraflejringer træffes. Højtliggende morænelersaflejringer fra istiderne (Kvartær) findes i de centrale dele af Nordjylland. Moræneleret er siltet og ret fedt, og ofte er grus og stenindholdet meget beskedent. Desuden kan træffes højtliggende interglacialt ler bl.a. bragt ud af dets oprindelige beliggenhed på grund af glacialtektonisk virksomhed. Ældre aflejringer fra før istiderne (prækvartære aflejringer) ligger relativt dybt i området, bortset fra nær Limfjorden, hvor der træffes skrivekridt fra Kridt Perioden med tynde lag af moræneler og morænesand over. Himmerland domineres af grovkornede smeltevandssaflejringer i overfladen med mindre områder med moræneler. Indenfor de øverste 5 m findes også udstrakte lag af fedt smeltevandssler fra en ældre istid. Desuden er der ud mod Limfjorden og de indre danske farvande postglacialt ler og sand med grovkornede strandvolde. Langs kysten til Kattegat fra Mou til Randers træffes marint postglacialt sand med enkelte strandvolde. Flyvesand findes i mindre isolerede områder. I Lille Vildmose er store områder med tørv og gytje, og andre ferskvandsaflejringer findes i mindre ånære områder. De ældre aflejringer består af skrivekridt fra Kridt Perioden, Danien kalk samt palæocæne og eocæne lerarter. Mellem Aalborg og Støvring og fra Hassing til Sejlflod findes højtliggende skrivekridt med tyndt eller intet kvartært dække. Kendskabet til indholdet af radioaktive elementer i jordarterne i dette område er beskedent, men radonniveauet er generelt lavt. Dog er der funder smeltevandssler og senglacialt marint ler med et overraskende højt indhold af radium og radon [Gr99].

Viborg Amt

Thy-Mors-Salling området består af en lang række jordarter, som ofte er tektonisk forstyrrede af istidernes gletschere. De ældre aflejringer fra Kridt (skrivekridt) og Tertiær Perioderne (Danien: kalk, Palæocæn: sort ler, diatomit, Eocæn: plastisk ler, Oligocæn: sort glimmerler, fedt ler) er således ofte presset op som flager sammen med istidslagene (f.eks. på Mors og Fur). Desuden har også forstyrrelser på grund af bevægelser i salthorstone i området betydning for jordartsfordelingen. Istidaflejringerne er ofte under 1 m tykke, som f.eks. i Thisted og Hanstholm, hvor Danien kalk og skrivekridt ligger i overfladen, men f.eks. umiddelbart syd for Thisted ved Silstrup træffes op mod 60 m tykke morænelerslag i en tektonisk oppresset zone. Desuden er morænelerslagene ofte stærkt præget af indhold af de underliggende ældre aflejringer. Moræneler er udbredt, men er sandet med overgang til morænesand mange steder. Hvor der er kalkunderlag, indeholder moræneaflejringerne finfordelt kalkslam og kalkklaster. Ældre interglaciale aflejringer findes nær overfladen ved kysterne og består af siltet, sort ler. Langs Nordsødkysten træffes postglaciale marine sand og leraflejringer med grovkornede strandvolde. Langs Limfjorden findes inddæmmede arealer med især postglaciale sandaflejringer. Et udbredt dække af fin-mellemkornet flyvesand træffes som øverste lag i området. Amtets sydøstligste område består dels af Karup Hedeslette og de store smeltevandssdale omkring Viborg og Bjerringbro og dels af det glacialt landskab med moræneler, morænesand og smeltevandssand og grus. Ved Daugbjerg og Mønsted er de kvartære lag underlejret af højtliggende Danien kalk og

skrivekridt. Derudover er det de tertiære lerarter, som underlejrer de kvartære lag i dette område. Indeholdt af radioaktive komponenter i jordarterne har været undersøgt i Thistedområdet [Gr96, A97a], i jordarterne på Mors [D89] samt i spredte jordartsprøver over området [D85, K85]. Kalkbjergarterne har lave radonniveauer, mens der i de sorte palæocæne lerarter og moler findes nogle af de højest registrerede radonniveauer i landet udenfor Bornholm. I moræner, morænesand og smeltevandssand og grus ligger indholdet relativt lavt ligesom i det meste af Østjylland [Gr99].

Ringkøbing Amt

Ringkøbing Amt ligger udenfor hovedopholdslinien for den sidste istids gletschere dvs. vest for en linie nord-syd fra grænsen til Tyskland til Hald sø og syd for en øst-vest linie fra Hald Sø til Vestkysten. Området har ikke været dækket af gletscher is i sidste istid. Det består af to terrænelementer: Bakkeøer og hedesletter. På Skovbjerg bakkeø, som er den største, findes udstrakte lag fra næstsidste istid af finkornede smeltevandssaflejringer (f.eks. fint sand) samt i mindre omfang moræneraflejringer, som ofte er stærkt sandede. Aflejringerne er ofte brunfarvede og præget af de underliggende tertiære aflejringer. Under hedesletternes flade overflade dominerer udstrakte lag af grovkornet smeltevandssand og grus, som ofte når stor tykkelse, mens lerlag er tynde eller fraværende. Over de glacialle aflejringer på bakkeøerne og hedesletterne findes mange forekomster bestående af finkornet flyvesand (såkaldte indesander). Under de kvartære aflejringer findes gennem hele området aflejringer fra Miocæn (Tertiær) bestående af sort og mørkebrunt glimmersand, -silt og ler og kvartssand med varierende kulindhold. Disse aflejringer når op til terræn ved f.eks. Fæsteholt og flere steder på Skovbjerg bakkeø. De marine miocæne leraflejringer træffes også f.eks. ved Lille Spåbæk og i mange borer. Langs vestkysten og omkring Ringkøbing, Stadil og Nisum Fjordene samt Limfjorden træffes tykke lag af postglacialt marint sand og flyvesand (i klitter) samt områder med marsk ler, silt og sand, mens ferskvandsaflejringer findes i åer og lavninger som f.eks. i Skjern Å deltaet. Det radioaktive indhold i jordarterne kendes få steder, hvor de tertiære glimmeraflejringer: Gram leret og Hodde leret, har et højt indhold af uran, radium og radon [Gr99].

Ribe Amt

De geologiske forhold i Ribe Amt ligner på mange måder dem i Ringkøbing Amt med både hedesletter og bakkeøer. Varde og Esbjerg bakkeøer er domineret af ældre smeltevandssand og grusaflejringer med mindre legemer af moræner og morænesand. Ved f.eks. Esbjerg findes den for amtet typiske aflejring af stærkt siltet og sandet, gulbrunt, iltet moræner. Derunder følger nogle steder reduceret, olivengråt moræner med kalkklaster, som på mange måder minder om en Østdansk moræner. Grindsted Hedeslette og de lange floddale f.eks. mellem Vejen og Ribe består af smeltevandssand og grus. Indesander af postglacialt flyvesand findes spredt over hele amtet, men især i den østlige del. Ældre kvartære ler og sandlag er meget udbredte, men ofte på lidt større dybde. Flyvesand og marine ler, silt, sand og grusaflejringer træffes langs kysten, og især på Kallemærsk Hede - Skallingen halvøen, Fanø og Mandø, mens marsk ler, silt og sand træffes fra Esbjerg over Ribe til Rejsby. De prækvartære aflejringer er alle miocæne, og består af både marine og ferskvandslag med højt indhold af glimmer og kvarts. En højtliggende forekomst af marint tertiært ler findes f.eks. i Måde ved Esbjerg. Undersøgelser af de radioaktive komponenter er foretaget ved Esbjerg i stærkt sandet, gulbrunt, iltet moræner og reduceret, olivengråt moræner med kalkklaster. Undersøgelserne viser generelt lave værdier af radium og radon i disse jordarter [Gr96].

Sønderjyllands Amt

Sønderjyllands Amt, som strækker sig tværs over Jylland, består af fire geologiske enheder: Bakkeøer, hedesletter og marine postglaciale lag samt morænelandskab øst for hovedopholdslinien for isen under sidste istid. Toftlund bakkeø strækker sig helt over til hovedopholdslinien og domineres af ældre smeltevandssand og grusaflejringer med sandede moræneaflejringer. Bakkeøerne syd for samt Rødding bakkeø domineres af morænersaflejringer med underordnede sandforekomster. Indesander med finkornet flyvesand findes på flere bakkeøer. Tinglev hedeslette strækker sig sydpå til grænsen til Tyskland og består af grovkornede sandaflejringer og grus. Øst for Skærbæk og Tønder findes finkornede marskaflejringer overlejrende hedeslettesandet. Mod vest ligger desuden Rømø med postglaciale flyvesands- og havaflejringer. Morænelandskabet øst for hovedopholdslinien består af forstyrrede morænerslag med underordnede sandlag, som det f.eks. ses i Halk Hoved Klinten. Forstyrrede aflejringer findes også på Als. Desuden findes relativt store forekomster af overfladenært smeltevandsler ved f.eks. Gråsten og Nybøl samt Guderup. De prækvartære aflejringer er overvejende glimmerholdige jordarter fra Miocæn. Højtliggende marint ler findes f.eks. ved Gram. Radioaktive komponenter i de kvartære aflejringer har generelt et lavt niveau. Dette gælder både i de glaciære og de postglaciære lag. Der er ingen markant forskel på indholdet i aflejringerne på bakkeøerne (fra næstsidste istid), hedeslettene (sidste istid) eller i det østjyske område (sidste istid) [Gr99]. Det miocæne Gram ler har meget højere værdier end de kvartære lag har.

Vejle Amt

Det meste af Vejle Amt ligger geologisk set øst for hovedopholdslinien. Den østlige del af amtet består af moræner med spredte forekomster af smeltevandssand og grus bl.a. i smeltevandsdale og på små hedesletter, som f.eks. ved Vamdrup. Længs østkysten er lagene tektonisk forstyrrede og mange steder findes oligocæne og miocæne aflejringer skubbet op sammen med de kvartære lag i klinterne (f.eks. Trelde Næs). Postglaciære marine aflejringer træffes f.eks. ved Rands Fjord, Juelsminde og Horsens. I amtets vestlige dele findes grovkornede hedesletteaflejringer ofte overlejret af indesander med finkornet flyvesand. De prækvartære aflejringer består overvejende af miocæne lag som glimmerler og sand og kvartssand, og desuden findes oligocænt glimmerler og eocænt plastisk ler. Ved Addit kommer kvartssandslagene f.eks. helt op til jordoverfladen. I dalene ved f.eks. Vejle, Horsens og Tørring findes store områder med postglaciære ferskvandsaflejringer. Kendskabet til de radioaktive forhold er meget beskedent.

Århus Amt

Århus Amt ligger øst for hovedopholdslinien for den sidste istids gletscherudbredelse. Aflejringerne er almindeligvis tektonisk forstyrrede af gletscherisen. Moræner er vidt udbredt i de øverste lag og er ofte indenfor de øverste 5 meter sandet, forvitret og iltet for derefter at forsætte i mere siltet og ret fedt moræner. Smeltevandssand og grus ligger som store horisontalt udbredte legemer dækket af moræner, men geologiske vinduer eller huller i morænersdækket giver mange steder adgang til de underliggende sand-gruslag. I området syd for Silkeborg er der udbredte lag af smeltevandssand ligesom i området syd for Mariager og Assens. Postglacialt marine aflejringer har stor udbredelse fra Limfjorden og sydpå til Randers Fjord og Allingåbro. Mod øst forsætter ferskvandsaflejringer i Nørre Å-systemet. De dybereliggende ældre tertiære aflejringer (Palæocæn, Eocæn, Oligocæn, Miocæn) består af plastisk ler eller glimmerler- og sand samt kvartssand. Det plastiske ler kommer op til terræn ved Ølst og Hinge, kvartssandet ved Salten og Danien kalk ved Assens. I de vestlige dele af amtet ligger der højtliggende miocæne sand og lerlag. De kvartære lag ligger tit i dybe begravede dale i de tertiære lerarter, hvor bunden først træffes i 200 m's dybde. Dalene er sandsynligvis anlagt før istiderne og er så

gennem istiderne blevet fyldt op med glacial aflejringer. Forstyrrede interglaciale lerlag fremstår i kystklinerne, hvor de er skubbet op til terræn. På Djursland findes forstyrrede lag i Mols Bjerger, men også uforstyrrede lag af smeltevandssand og grus på hedesletter som ved Tirstrup, Rosmus og Auning er udbredte. Marine sand- og lerlag fra Postglacial findes i Kolindsund og langs Djurslands kyst. På den nordlige del af Djursland træffes højtliggende Danien kalk dækket af sandet moræner, mens der på den sydlige del træffes både palæocæne og eocæne lerarter undertiden med vulkanske askelag. Radioaktive komponenter er undersøgt ved Assens kalkgrav, hvor Danien kalken har et lavt indhold af radium og radon.

Djursland

Fyns Amt

De ældre prækvartære aflejringer består af fedt tertiært ler (Palæocæn og Eocæn) på det meste af Fyn og det gælder også for de mindre øer, som ligger syd for. Ved Klintholm på Østfyn og det nordlige Langeland træffes Danien kalk. Istidsaflejringerne er domineret af tykke lag af moræner, der oftest er siltede og svagt sandede. Morænesand kan også forekomme. Lagene er undertiden forstyrrede som ved Røjle klint, hvor også eocænt ler indgår mellem de kvartære aflejringer. Smeltevandssand og grus udgør også en del af overfladen på Fyn, hvor der f.eks. ved Odense findes en større sammenhængende forekomst, men også mange andre steder på det vestlige Fyn træffes smeltevandssand og grus i overfladen. På den sydlige del af Fyn og de små øer syd for er istidslagene næsten altid forstyrrede og foldede, som det ses i Ristinge Klint. Derved kommer interglaciale marine aflejringer, især ler, frem i overfladen. I et strøg fra omkring Svendborg til Faaborg findes også kvartæssand fra den tidlige del af sidste istid højt oppe i lagserien. Issøler træffes i tykke lag ved Stenstrup og Tommerup, men talrige små forkomster findes over det meste af øen. På det nordlige Fyn er der langs kysten udbredte områder med postglaciale marine aflejringer. Disse aflejringstyper findes også på mange af de sydfynske øer. Fra dette amt er radium og radonniveauerne kendt i moræner, smeltvandssand og smeltevandssler, og sidstnævnte har overraskende høje værdier [Gr96, Gr99].

Vestsjællands Amt

Moræneaflejringerne er overvejende fra den yngre del af sidste istid (Weichsel) og moræner er den dominerende jordart. Moræner er leret, svagt sandet og gruset med få indslag af morænesand, som indenfor de øverste ca. 2 meter er gulbrunt og iltet, mens moræneret nedad er reduceret og olivengråt. Smeltevandssand træffes under moræneret og undertiden ligger grundvandsspejlet så dybt, at der er umættede forhold under moræneret. Hedesletteområder og talrige små bakker består også af smeltevandssand. I området mellem Åmosen, Jyderup og Saltbæk Vig findes større sammenhængende lag af smeltevandssand og grus. I Odsherred dominerer store områder med postglaciale sand og leraflejringer. De glacialtektonisk oppressede Odsherredbuer består af moræner og smeltevandssand. Generelt er de kvartære lag relativt tykke (mere end 10 m) i det meste af amtet. Postglaciale marine lag findes i Odsherred langs nordkysten sammen med flyvesand, i Saltbæk vig, ved Kalundborg samt en del andre steder langs kysten. Postglaciale ferskvandsaflejringer findes ved Højby, Regstrup, i Åmosen og ved Tissø. I dette område består aflejringerne fra før istiderne (Kridt, Danien, Palæocæn, Eocæn) af kalk, kridt og ler, hvor kalk og kridt har vist sig at have lave radonniveauer, mens leraflejringerne ikke er blevet undersøgt. Ved Flakkebjerg er påvist et højt indhold af radium og radon indhold i oxideret moræner [Gr99].

Storstrøms Amt

De overfladenære aflejringer indenfor amtet er helt domineret af siltet og ret fedt moræner med enkelte pletter af smeltevandssand i form af enkeltbakker og åsdannelser

(f.eks. Mogenstrup Ås). Postglaciale marine ler-, sand- og grusaflejringer findes mange steder langs kysterne, som ved Nakskov, Rødby Fjord, Bøtø Nor og Feddet, mens store ferskvandsområder er Holmegaards Mose, Lundby-Kasrup området og Borre Sømos. De kvartære lag er relativt tykke bortset fra på Stevns, hvor Danien kalk er dækket af tynde, ofte iltede morænelerslag. Skrivekridtet på Møn er ligeledes overlejret af tynde kvartære lag. De store kalk og kridt klinter er præget af glacialtektonik, som det tydeligt ses på Møns klint, hvor store skrivekridtflager er skudt op til næsten lodret position. Andre prækvartære aflejringer er Faxe Kalk og grønsandkalk på Sydsjælland og palæocænt/eocænt plastisk ler på Sydøstsjælland. Det radioaktive indhold er målt på moræner, plastisk ler og kalk med relativt lave værdier for radium og radon [D85, K85, Gr99].

Roskilde Amt

Siltet og ret fedt moræner dominerer overfladelagene indenfor amtet. Sammenhængende hedesletteaflejringer findes i Hedeland-Vindinge området, som strækker sig mod øst ind i Københavns Amt. Desuden træffes mange isolerede forekomster af smeltevandssand og -grus. Større legemer af smeltvandsler findes ved Skullerupholm og Viby. Marine postglaciale aflejringer findes især langs Køge Bugt, hvor de stedvis overlejres af flyvesand, og i Roskilde Fjord. De prækvartære aflejringer består af Danien kalk (og lidt skrivekridt) samt Palæocæn grønsandskalk og ler. Aflejringerne fra istiderne er blevet undersøgt for radium og radon indhold ved Viby, (Ramsø) [Gr96] og Risø [M88, A99d], og morænelerens værdier ligger i den høje ende af de målte værdier for moræner i Danmark.

Københavns Amt, København og Frederiksberg kommuner

Moræner er den mest udbredte jordart i området. Hedelands smeltevandssand og -grus findes i Københavns amts vestlige ende, og der er også udbredte sand-grusaflejringer i tunneldalene i amtets nordlige del. Postglaciale marine aflejringer findes langs kysten af Sjælland og Amager. De prækvartære aflejringer består af København Kalk fra Danien tidsafsnittet. De radioaktive komponenter i aflejringerne er ikke undersøgt.

Frederiksborg Amt

I Nordøstsjælland og Hornsherred består de prækvartære lag af Danien kalk, som er gennemsat af forkastninger, og flere steder er lagene nedsænkede langs forkastningerne. Her er smeltevandssand- og grus de mest dominerende aflejringer indenfor de øverste 10 m. Smeltevandssler kendes fra mange små områder spredt ud over amtet (f.eks. ved Nivå). Morænelersaflejringerne er ofte stærkt forstyrrede, som det f.eks. ses i klinterne ved Hundested. Postglaciale marine sand og lerlag og flyvesand findes langs kysterne og især er flyvesand udbredt ved Liseleje, Asserbo og Tisvildeleje. Der er foretaget en hel del målinger af det indhold af radium og radon i både moræner og smeltevandssand [D85, K85], og værdierne svarer til dem der er målt i aflejringerne indenfor Roskilde Amt.

Bornholms Amt

Bornholm adskiller sig geologisk en hel del fra det øvrige Danmark. Aflejringerne og bjergarterne ældre end istiderne består af prækambrisk granit og gnejs, palæozoisk sandsten, skifer og kalksten og mesozoisk sand, sandsten, grus, ler, lersten, kul og kalksten. Istidsaflejringerne består af moræner, -sand og -grus, som findes over hele øen, mens smeltevandssand, -grus og -ler findes som mere isolerede forekomster som f.eks. på hedesletten ved Rønne og i sand-grus bakkerne på Nordbornholm. Langs kysten findes marine sand-grusaflejringer fra senglacial og postglacial ofte overlejret af flyvesand, mens

postglaciale ferskvandsaflejringer som gytje, ler og tørv findes i moser og sprækkedale. De kvartære lag er normalt under 10 m tykke. I granitområdet er det almindeligt at granit og gnejs stikker igennem det kvartære dække. I sprækkedalene i granit-gnejsområdet kan der dog træffes kvartære lagserier på mere end 40 m's tykkelse. Indholdet af uran, thorium, radium og radon i udvalgte bjergarter har været undersøgt af Damkjær og Korsbech [D85], SIS [St96], Gravesen et al. [Gr96] og Gravesen et al. [Gr99]. De bjergarter/jordarter, som er blandt dem med det højeste indhold af radioaktive komponenter i landet, er Hammer, Alminding og Vang Granitterne og Alunskiferen. Desuden viser højt indhold af radon i grundvand ved Listed, at Svaneke Graniten også kan have et højt indhold af radioaktive stoffer [St87c]. Derudover har morænesand og grus og muld over granitterne højere værdier end tilsvarende jordartstyper i det øvrige land.

D Spørgeskemaer

Dette bilag gengiver de spørgeskemaer, som beboerne blev bedt om at udfylde (jf. Af-snit 2.6). På skemaerne var der også mulighed for at tilføje særlige bemærkninger (f.eks. om aflukning af huset i længere perioder under måleperioden).

Enfamiliehuse

Beboerne i enfamiliehusene fik tilsendt et afkrydsningsskema med følgende spørgsmål:

1. Ønsker De resultatet af radonmålingen i Deres bolig tilsendt?
 - (a) Ja
 - (b) Nej
2. Hvilken etage har radondosimetret været placeret på?
 - (a) 2. sal eller højere
 - (b) 1. sal
 - (c) Stueetagen
 - (d) Kælderen
3. Hvilken hustype?
 - (a) Fritliggende enfamiliehus
 - (b) Række-, kæde-, eller dobbelthus
4. Hvilken slags fundament har huset?
 - (a) Fuld kælder
 - (b) Delvis kælder
 - (c) Krybekælder
 - (d) Ingen kælder
 - (e) Andet:
5. I hvilken slags undergrund står husets fundament?
 - (a) Sand
 - (b) Sand, grus og sten
 - (c) Moræneler med sten
 - (d) Stenfrit ler
 - (e) Mose, dynd eller tørv
 - (f) Kalk
 - (g) Grundfjeld
 - (h) Andet:
 - (i) Ved ikke
6. I hvilken dybde står grundvandet normalt i undergrunden om vinteren?
 - (a) 0–1 m
 - (b) 1–2 m
 - (c) mere end 2 m
 - (d) Ved ikke
7. Hvor mange etager har huset, bortset fra en eventuel kælderetage?

- (a) 1 etage (dvs. kun stueplan)
 - (b) 2 etager (dvs. stueplan + 1. sal)
 - (c) Flere end 2 etager
8. Hvilket byggemateriale er huset hovedsageligt opført af?
- (a) Beton
 - (b) Tegl (mursten)
 - (c) Letbeton (gasbeton)
 - (d) Træ
 - (e) Andet:
9. Hvordan er huset ventileret?
- (a) Mekanisk ventilationssystem i de mest benyttede opholdsrum i huset
 - (b) Aftrækskanaler i stue, soveværelse, køkken (emhætte) og/eller badeværelse
 - (c) Kun aftrækskanaler i køkken (emhætte) og/eller badeværelse
 - (d) Ingen ventilationssystem eller aftrækskanaler
10. Hvor ofte udlufter De i stuen?
- (a) Daglig udluftning
 - (b) Udluftning af og til
11. Hvor ofte udlufter De i soveværelset?
- (a) Daglig udluftning
 - (b) Udluftning af og til

Flerfamiliehuse

Beboerne i flerfamiliehusene fik tilsendt et afkrydsningsskema med følgende spørgsmål:

1. Ønsker De resultatet af radonmålingen i Deres bolig tilsendt?
 - (a) Ja
 - (b) Nej
2. Hvilken etage har radondosimetret været placeret på?
 - (a) 3. sal eller højere
 - (b) 2. sal
 - (c) 1. sal
 - (d) Stueetagen
3. Hvilket byggemateriale er boligen hovedsageligt opført af?
 - (a) Beton
 - (b) Tegl (mursten)
 - (c) Letbeton (gasbeton)
 - (d) Træ
 - (e) Andet:
4. Hvordan er boligen ventileret?
 - (a) Mekanisk ventilationssystem i de mest benyttede opholdsrum i boligen
 - (b) Aftrækskanaler i stue, soveværelse, køkken (emhætte) og/eller badeværelse
 - (c) Kun aftrækskanaler i køkken (emhætte) og/eller badeværelse

(d) Ingen ventilationssystem eller aftrækskanaler

5. Hvor ofte udlufter De i stuen?

(a) Daglig udluftning

(b) Udluftning af og til

6. Hvor ofte udlufter De i soveværelset?

(a) Daglig udluftning

(b) Udluftning af og til

E Kalibrering og baggrundsbestemmelse

Dette bilag indeholder en beskrivelse af kalibrering og baggrundsbestemmelse for radonmålingerne. Målemetoden er beskrevet i afsnit 2.2.

Håndtering af folier

Sporfoliematerialet blev produceret af TASL, Bristol, England i efteråret 1995. Materialet fremstilles i form af et antal ark, der hver rummer 114 sporfolier, som blev udskåret og nummereret af TASL. Sporfolierne blev modtaget og oplagret i fryser på Risø den 12. oktober. I perioden 24. oktober til 16. november blev sporfolierne monteret i dosimetre, som løbende blev pakket i lagerposer, med ca. 110 dosimetre i hver pose. Lagerposerne er lufttætte, aluminiserede plastposer, som lukkes ved en sammensvejsning af plastmaterialet. Den 22. november blev lagerposerne med dosimetre transporteret til SIS, og den 28. november 1995 blev dosimetrene pakket og afsendt til de boliger, der deltog i radonundersøgelsen. Samtidigt blev der på tilfældig måde udtaget 8 dosimetre fra hver lagerpose, ialt ca. 260 dosimetre, til kalibrering og til baggrundsbestemmelse. Disse dosimetre blev delt i to lige store grupper. Gruppe A blev pakket i lufttætte lagerposer, som derefter blev opbevaret i en lufttæt stålbeholder fyldt med kvælstof (N_2). Gruppe B blev pakket i lufttætte lagerposer, som derefter blev opbevaret i et kontor i bygning 125 på Risø.

Kalibrering

Ved en eksponeringstid på ét år skal der tages hensyn til en mindre reduktion af sporfoliets følsomhed, som optræder når foliet i længere tid er udsat for atmosfærisk luft ved stuetemperatur [Ha96]. Korrektionen for dette ældningsfænomen blev indbygget i proceduren, idet kalibreringen blev gennemført midt i eksponeringsperioden: Den 10. juli 1996 blev kalibreringsdosimetrene udtaget fra gruppe A og sendt til National Radiological Protection Board (NRPB), England, til en kontrolleret eksponering, der omfattede 4 grupper med hver 10 dosimetre. Dosimetrene blev modtaget retur på Risø den 10. september og pakket i lufttætte lagerposer, som blev genplaceret i den lufttætte stålbeholder. Herfor blev kalibreringsdosimetrene indtil de blev ætset og optalt sammen med undersøgelsens øvrige dosimetre i perioden fra april til juni 1997. Kalibreringsdosimetrene har således været udsat for atmosfærisk luft ved stuetemperatur i samme periode som undersøgelsens dosimetre har været eksponeret i boligerne.

Tabel E.1 viser, at usikkerheden på kalibreringsfaktoren K domineres af bidraget fra usikkerheden på NRPBs data for eksponeringen. Det fremgår ligeledes, at K er en funk-

Kontrolleret eksponering

Tabel E.1. Resumé af kalibreringsdata for dosimetre eksponeret hos NRPB. Hver af de 4 eksponeringer omfattede 10 dosimetre. Baggrundsbidraget blev bestemt via en kontrolgruppe på 16 dosimetre, som fulgte med til NRPB, men som ikke blev eksponeret. Optællingen af sportæthed er gentaget 4 gange i løbet af optællingsperioden for undersøgelsen.

NRPB eksponering		Sportæthed		Kalibreringsfaktor	
kBqh/m ³	std.err. [%]	spor/cm ²	std.err. [%]	‡	std.err. [%]
451	5	1155	1.9	2.56	5.3
1655	5	3876	1	2.34	5.1
3456	7.5	7503	0.4	2.17	7.5
5188	7.5	9897	0.4	1.91	7.5

std.err. : Relativ standardafvigelse på middelværdien (standard error)

‡ : (spor/cm²)/(kBqh/m³)

tion af sportætheden, hvilket skyldes, at overlappende spor enten forkastes eller tælles som ét spor i den automatiske sportælling. De relativt store sportætheder, der opnås i løbet af ét års eksponering i huse med en høj radonkoncentration nødvendiggør derfor, at kalibreringsfaktoren udtrykkes som en funktion af sportætheden.

En lineær regressionsanalyse af data i Tabel E.1 giver følgende udtryk for K (med enheden: $(\text{spor}/\text{cm}^2)/(\text{kBqh}/\text{m}^3)$) som anvendes i undersøgelsen:

$$K = -7.02 \cdot 10^{-5} \cdot D + 2.64 \quad (\text{E.1})$$

hvor D er den baggrundskorrigerede sportæthed i spor/cm^2 .

Baggrundsbestemmelse

Baggrundsbidraget for de udsendte dosimetre har to komponenter:

- Et internt bidrag, som skyldes foliematerialets eget indhold af alfaaktivitet, spor som kan opstå på grund af mekaniske spændinger under fremstillingen af plastmaterialet, bidrag fra kosmisk stråling samt alfaaktivitet i miljøet under montering og afmontering af dosimetrene. Det interne bidrag vil afhænge af foliematerialets alder, men afhænger ikke af eksponeringen.
- Et eksternt bidrag fra en eventuel utilsigtet eksponering til radon i opbevaringsperioden fra returnering til ætsning.

Hertil kommer et transitbidrag fra radoneksponering af dosimetrene under forsendelsen. Dette bidrag vurderes særskilt på grundlag af de enkelte dosimetres forsendelsesdatoer og en antaget radonkoncentration på $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$ under transporten. Med en ideel opbevaringsmetode for dosimetrene i perioder, hvor de ikke skal eksponeres, ville de udsendte dosimetre kun have det interne baggrundsbidrag, som ville være lig med den sportæthed, der registreres for baggrundsdosimetrene.

Tabel E.2 viser resultaterne for baggrundsdosimetrene. Gruppe A blev opbevaret i lufttætte lagerposer i en lufttæt stålbeholder med N_2 , medens gruppe B blev opbevaret i lufttætte lagerposer i et kontor i bygning 125 på Risø. Opbevaringstiden for begge grupper var 16.5 måneder.

Det fremgår af Tabel E.2, at gruppe B giver et større baggrundsbidrag end gruppe A. Det betyder at gruppe B ikke har været totalt isoleret fra den omgivende luft. Da de udsendte dosimetre har været opbevaret på samme måde som gruppe B i en periode på 5.3 måneder fra returneringen til ætsningen, skal de udsendte dosimetre baggrundskorrigeres både for et internt og et eksternt bidrag. Såfremt gruppe A har været totalt isoleret fra den omgivende luft i opbevaringsperioden, vil sportætheden for denne gruppe alene stamme fra det interne bidrag. Det kan dog ikke udelukkes, at isoleringen af gruppe A ligeledes ikke har været total. Det interne og det eksterne baggrundsbidrag for de udsendte dosimetre er derfor bestemt ved en alternativ analyse af de dosimetre, der blev anvendt til kalibreringen på NRPB samt 18 baggrundsdosimetre fra gruppe B.

Alternativ analyse

Den alternative analyse er baseret på at bagsiden af sporfolierne også eksponeres til den alfaaktivitet, der findes i dosimeterkapslen. Der dannes derfor også alfaspør på foliernes bagside, omend med en væsentlig lavere effektivitet end spordannelsen på forsiden. Vi har således følgende to udtryk for sportæthederne:

$$\text{Forsiden : } S_F = K \cdot E + C \quad (\text{E.2})$$

$$\text{Bagsiden : } S_B = K_B \cdot E + C \quad (\text{E.3})$$

hvor E er eksponeringen i kBqh/m^3 , C er det interne baggrundsbidrag i spor/cm^2 , K er kalibreringskonstanten for forsiden ($2.64 (\text{spor}/\text{cm}^2)/(\text{kBqh}/\text{m}^3)$), og K_B er den ukendte kalibreringskonstant for bagsiden.

For et givet folie fås heraf :

$$C = \frac{S_B - (K_B/K) \cdot S_F}{1 - (K_B/K)} \quad (\text{E.4})$$

Tabel E.2. Data for baggrundsdosimetre. Forskellen på middel-sportæthederne for gruppe A og B er signifikant. (t-test, $P < 0.005$)

Baggrundsdosimetre	N	AM	ASD
Gruppe A (lagerposer i stålbeholder)	80	296	43
Gruppe B (lagerposer i kontor)	126	332	45

N : Antal
AM : Aritmetisk middelværdi, spor/cm²
ASD : Aritmetisk standardafvigelse, spor/cm²

Tabel E.3. Bestemmelse af det interne og eksterne baggrundsbidrag på basis af 18 dosimetre fra gruppe B.

Bidrag		AM	ASD	std.err.
Forside	Internt	70	29	7
-	Eksternt	273	40	10
-	I alt	343	44	11
Bagside	I alt	92	44	11

AM : Aritmetisk middelværdi, spor/cm²
ASD : Aritmetisk standardafvigelse, spor/cm²
std.err. : Standardafvigelse på middelværdien (standard error), spor/cm²

Analysen af kalibreringsdosimetrene viste, at K_B er (8.2 ± 1.7) % af K .

For en serie på 18 dosimetre fra gruppe B er sportæthederne på foliernes for- og bagsider bestemt og det interne og eksterne baggrundsbidrag er beregnet. Tabel E.3 viser det beregnede eksterne baggrundsbidrag efter 16.5 måneders opbevaring i lufttætte lagerposer. De udsendte dosimetre var opbevaret på denne måde i 5.3 måneder, og disse dosimetres eksterne baggrundsbidrag beregnes derfor til $273 \cdot (5.3/16.5) = 88$ spor/cm². Lægges hertil det interne bidrag på 70 spor/cm², fås det samlede baggrundsbidrag for de udsendte dosimetre til: 158 ± 8 spor/cm², hvilket svarer til et års eksponering ved 7 Bq/m³.

Det fundne baggrundsbidrag på 158 spor/cm² er benyttet ved beregningen af middel radonkoncentrationerne for de deltagende boliger. Transittidskorrektion og usikkerhedsberegning er gennemført som i det såkaldte Radon-95 projekt [A97a].

F Beregning af husværdier

Under hensyntagen til at der normalt tilbringes mest tid i stue og soveværelse er der en vis tradition for at man definerer en boligs gennemsnitlige radonkoncentration c som gennemsnittet af en måling i stue og soveværelse:

$$c = \frac{c_{\text{stue}} + c_{\text{sov}}}{2} \quad (\text{F.1})$$

I denne undersøgelse er der imidlertid kun foretaget én radonmåling pr. bolig. Målingen er foretaget i boligernes primære opholdsstue. Der er ikke målt i soveværelserne. Formålet med det følgende er at redegøre for hvorledes man ud fra disse stuemålinger kan estimere husværdierne. Resultaterne fra den tidligere landsdækkende radonundersøgelse lægges til grund [St87a].

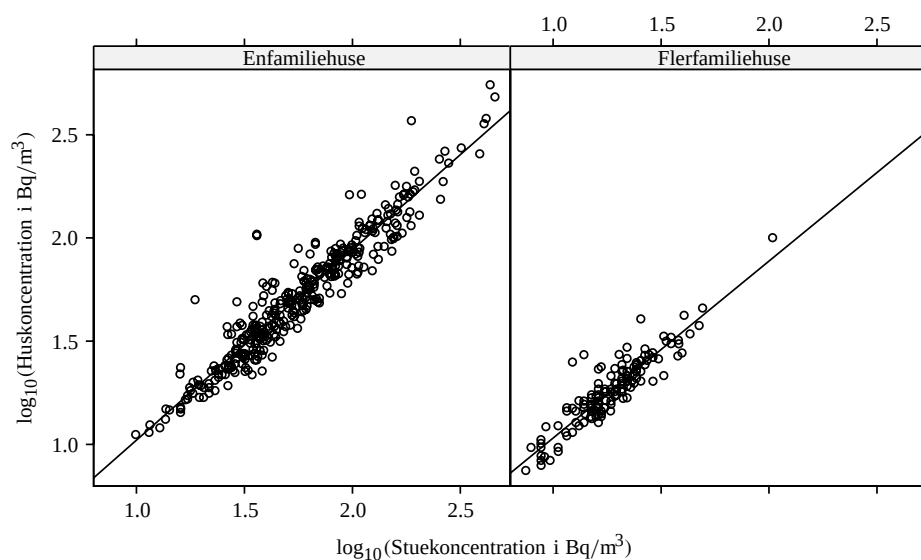
F.1 Enfamiliehuse

Først behandles enfamiliehusene. Fra den tidligere landsdækkende radonundersøgelse vides det, at forholdet $c_{\text{sov}}/c_{\text{stue}}$ har et gennemsnit på 0.882 og en standardafvigelse på 0.518 ($N=348$). Soveværelset har altså normalt en lavere værdi end stuen. Dette formodes at skyldes forskelle i luftskiftet mellem de to rum, samt det forhold, at soveværelser, så vidt det er muligt, placeres på 1. sal. Fra et fysisk synspunkt virker det dog ikke rimeligt at anvende en model med et konstant forhold mellem radonkoncentrationen i soveværelse og stue. Faktisk må det forventes, at forholdet er omkring 1 for lave radonkoncentrationer, hvor byggematerialer og udeluft spiller en relativt stor rolle for radonkoncentrationen indendørs. I dette tilfælde vil stue og soveværelse nemlig have omtrent samme radonkoncentration, da det f.eks. betyder mindre om soveværelset er placeret nær jorden, eller om det har et anderledes luftskifte end stuen. På denne baggrund tilpasses følgende model til de 348 sammenhørende værdier for husradonkoncentration c og stueradonkoncentration c_{stue} fra den første landsdækkende radonundersøgelse:

$$\log(c) = a_0 + a_1 \log(c_{\text{stue}}) \quad (\text{F.2})$$

hvor koncentrationerne er logaritme-transformerede (grundtal e). Regressionen giver følgende koefficienter: $a_0 = 0.227 \pm 0.065$ og $a_1 = 0.922 \pm 0.016$, hvor de angivne usikkerheder er standardafvigelser på estimerne. Regressionen er vist i Figur F.1. R^2 -værdien er 91 %. Regressionen giver således en god beskrivelse af data. Forholdet c/c_{stue} varierer fra omkring 0.97 ved $c_{\text{stue}}=20 \text{ Bq/m}^3$ til 0.79 ved 400 Bq/m^3 . Som allerede bemærket er der en fysisk begrundelse for at forholdet varierer med radonkoncentrationen. Det skal dog påpeges, at en del af variabiliteten skyldes fænomenet “regression to the mean”. Der henvises til artiklen af Price [Pr95] for en nærmere redegørelse.

I nærværende undersøgelse anvendes ligning F.2 og de dertil hørende regressionskoefficienter til at omsætte de 3019 målte stuekoncentrationer til huskoncentrationer. Det skal bemærkes, at denne omsætning bidrager til usikkerheden. Selvom forholdet c/c_{stue} i gennemsnit er 0.79 ved 400 Bq/m^3 , så er der en stor variation fra hus til hus. Dette fremgår af variabiliteten omkring regressionslinien i Figur F.1. Usikkerheden ved stue-til-hus omsætningen summeres i kvadratur med usikkerheden for den rå stuemåling. For at belyse dette gives følgende to eksempler. Alle usikkerheder angives som enkelte standardafvigelser. Antag at en stuemåling i et hus er 20 Bq/m^3 med en usikkerhed på 5 Bq/m^3 . Det vil give anledning til en vurderet huskoncentration på 20 Bq/m^3 med en usikkerhed på 6 Bq/m^3 . Ved lave koncentrationer bidrager omsætningsusikkerheden altså ikke væsentligt i sammenligning med den rå måleusikkerhed ved stuemålingen. For et hus med en stuekoncentration på 400 Bq/m^3 og en tilhørende usikkerhed på 20 Bq/m^3 er den vurderede husværdi lig 315 Bq/m^3 med en tilhørende usikkerhed på 70 Bq/m^3 . I dette tilfælde bidrager omsætningen fra stue til husværdi således betragteligt. Endelig bemærkes det, at denne “omsætningsusikkerhed” spiller størst rolle for det enkelte hus, mens betydningen



Figur F.1. Sammenhæng mellem radonkoncentrationen i stue og hus i undersøgelsen fra 1987. De regressionslinier, som omtales i teksten, er indtegnet.

er mindre, når man betragter de overordnede statistikker såsom de repræsentative amts- og landsværdier. Omsætningsusikkerheden formodes at spille vis rolle for faktoranalysen i Kapitel 4. Eksempelvis er det næppe det samme (korrekte) omsætningsforhold for et- og toplanshuse. I førstnævnte tilfælde vil stue og soveværelse jo altid være placeret på i samme plan.

F.2 Flerfamiliehuse

For flerfamiliehusene er der også foretaget en omsætning fra stue- til husværdier baseret på den tidligere landsdækkende undersøgelse [St87a]. En regressionsanalyse som angivet i ligning F.2 er gennemført på baggrund af målinger i 148 boliger. Regressionen er vist i Figur F.1. Regressionskoefficienterne er : $a_0 = 0.400 \pm 0.091$ og $a_1 = 0.857 \pm 0.031$, hvor de angivne usikkerheder igen er enkelte standardafvigelser på estimerne. R^2 er 84 %.

G Beregning af repræsentative værdier

De 3019 enfamiliehuse i undersøgelsen er udtrukket tilfældigt kommune for kommune. Eksempelvis blev der i Langebæk Kommune udtrukket 17 huse. Heraf blev der opnået brugbare resultater for 9 huse. Denne stikprøve er repræsentativ for kommunen i den forstand, at alle 2605 enfamiliehuse i kommunen havde lige stor udtrækssandsynlighed.

Det forventes ikke, at der indenfor en enkelt kommune er nogen væsentlig sammenhæng mellem husenes radonniveau og ønsket om at deltage i undersøgelsen. Sådanne sammenhænge kunne teoretisk opstå hvis beboerne havde en forhåndsviden om radonniveauet i deres hus, eller hvis der eksempelvis var en væsentlig sammenhæng mellem radonniveau, husstørrelse, beboernes sociale forhold, og tendens til at deltage i undersøgelser. Det bemærkes, at kommunestratifikationen eksplicit giver anledning til korrektion for "deltageskævheder" fra landsdel til landsdel (jf. Tabel 2).

For at beregne repræsentative værdier for Danmark som helhed (og de enkelte amter) er det nødvendigt at tage hensyn til:

- at kommunerne ikke er lige store målt i antallet af enfamiliehuse, og
- at der ikke er proportionalitet mellem kommunestørrelse og stikprøvestørrelse (omend Tabel 1 dog viser, at der er en tendens til at stikprøvernes størrelse stiger med kommunestørrelsen).

Det skal præciseres, hvad der menes med repræsentative statistikker. I yderste konsekvens kunne vi foretage målinger i alle landets ca. 1.4 mill. enfamiliehuse. På dette grundlag kunne vi beregne forskellige populationsstatistikker såsom den aritmetiske middelværdi AM_{pop} af husenes radonkoncentration. I nærværende undersøgelse med kun 3019 målinger forsøger vi at bestemme et godt AM_{pop} -estimat. Vi kan kalde vores estimat for AM_{strat} . Estimatet beregnes ud fra kendskabet til, hvordan husene er trukket ud (stratifikationen). Estimatet AM_{strat} er repræsentativ for AM_{pop} i den forstand, at dersom vi kunne gentage hele undersøgelsen mange gange (efter samme stratifikation og med omtrent samme antal målinger i hver undersøgelse), da ville gennemsnittet af AM_{strat} -estimerne nærme sig AM_{pop} . Det samme skulle gælde for de øvrige statistikker.

Aritmetisk middelværdi

Først beskrives beregningen af repræsentative amtsværdier for den aritmetiske middelværdi. Middelværdien af målingerne i kommune k er:

$$AM(k) = \frac{1}{N_k} \sum c_i \quad (G.1)$$

hvor N_k er antallet af målinger i kommunen, hvor summationen omfatter alle målinger i kommunen, og hvor c_i er radonkoncentrationen i det enkelte hus i . Den repræsentative middelværdi for amt A er:

$$AM(A) = \sum \omega_k AM(k) \quad (G.2)$$

hvor summationen omfatter alle kommuner i amtet, og hvor vægtfaktoren er givet ved:

$$\omega_k = \frac{M_k}{\sum M_k} \quad (G.3)$$

hvor M_k er antallet af enfamiliehuse i kommune k . Værdien $AM(A)$ er altså beregnet som en vægtet middelværdi med antallet af enfamiliehuse som vægt. Den repræsentative landsværdi opnås på tilsvarende vis, idet summationen naturligvis udstrækkes til alle kommuner i landet. Tilsvarende beregninger gennemføres for andelen af huse med radonkoncentrationer over 200 og 400 Bq/m³.

Aritmetisk standardafvigelse

Den repræsentative varians i amt A beregnes som [H52, p. 491]:

$$\text{VAR}(A) = \sum \omega_k \text{VAR}(k) + \sum \omega_k (\text{AM}(k) - \text{AM}(A))^2 \quad (\text{G.4})$$

hvor begge summationer omfatter alle kommuner i amt A , og hvor $\text{VAR}(k)$ er variansen indenfor kommune k :

$$\text{VAR}(k) = \frac{1}{N_k - 1} \sum (c_i - \text{AM}(k))^2 \quad (\text{G.5})$$

Det ses, at ligning G.4 består af to bidrag: et som er lig det vægtede gennemsnit af varianserne i de enkelte kommuner og et andet, som omfatter variabiliteten af middelværdier fra kommune til kommune. Den repræsentative aritmetiske standardafvigelse findes som:

$$\text{ASD}(A) = \sqrt{\text{VAR}(A)} \quad (\text{G.6})$$

Geometrisk middelværdi og standardafvigelse

Beregningerne for geometrisk middelværdi er gennemført ved først at logaritme-transformere alle radonkoncentrationer. Så beregnes de vægtede gennemsnit m.v. Til sidst findes den geometriske middelværdi ved tilbage-transformation med eksponential-funktionen. Tilsvarende regninger gennemføres for den geometriske standardafvigelse.

Verifikation

Beregningen af de repræsentative statistikker er gennemført vha. et særligt Pascal-program udviklet til formålet. Hovedresultaterne er reproduceret i S-Plus 2000 [Mat00], og metoden er verificeret med syntetiske data.

H Kommunemodel

Formålet med det følgende er, at redegøre for hvorledes andelen af enfamiliehuse med radonkoncentrationer over 200 og 400 Bq/m³ estimeres i de enkelte kommuner.

H.1 Transformationer

Som omtalt i afsnit 3.1 er logaritmen til de målte radonkoncentrationer, c , stort set konsistent med en normalfordeling. En nærmere undersøgelse viser dog, at de transformerede radonkoncentrationer:

$$x = \log(c + b) \quad (\text{H.1})$$

hvor $b = 8 \text{ Bq/m}^3$ er i tættere på normalitet end $\log(c)$. Dette er vist i Figur H.1 til H.4. En Lilliefors test af normalitet for x [L67, S95] kan dog afvises, da $P \approx 0.04$.

Det skal fremhæves, at kommunemodellen er baseret på transformerede radonkoncentrationer x alene fordi de 3019 værdier af x er så godt beskrevet ved en normalfordeling. En triviell (men vigtig) egenskab ved transformationen skal fremhæves: Transformationen er monoton således, at andelen af huse med radonkoncentrationer over 200 Bq/m³ ($c > 200$) i et givet område er identisk med andelen af huse med transformerede radonkoncentrationer over $\log(208)$. At kommunemodellen baseres på $x = \log(c + 8)$ betyder altså ikke, at der kunstigt er lagt 8 Bq/m³ til alle målinger eller tilsvarende.

H.2 Fordelingsparametre

Det antages, at indenfor hver kommune k er de transformerede radonkoncentrationer x normalfordelt med følgende sande (men ukendte) fordelingsparametre: middelværdi μ_k og standardafvigelse σ . I modellen tillades det, at μ_k kan variere fra kommune til kommune. Derimod kræves det, at σ er den samme for alle landets kommuner. Kravet understøttes af en test for varianshomogenitet med en modificeret udgave af en Levene test.

σ -estimatoren

I det følgende findes en estimator $\hat{\sigma}$ for σ : Først beregnes simple middelværdier $\bar{x}_k$ og standardafvigelser s_k for de N_k målinger i hver kommune:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} x_i \quad (\text{H.2})$$

og

$$s_k = \sqrt{\frac{1}{N_k - 1} \sum_{i=1}^{N_k} (x_i - \bar{x}_k)^2} \quad (\text{H.3})$$

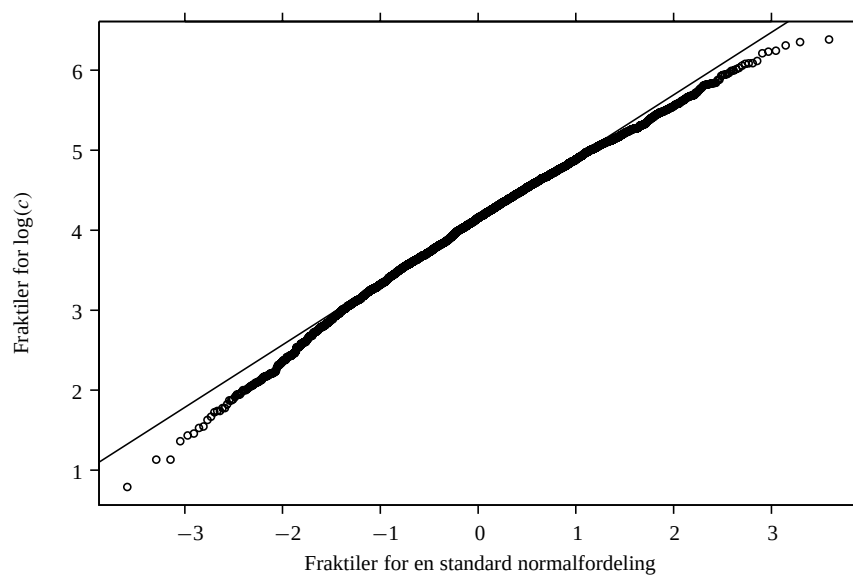
Dernæst foretages følgende beregning af populationsstandardafvigelsen i hver kommune [S95, side 53] $\hat{\sigma}_k$:

$$\hat{\sigma}_k = C_k s_k \quad (\text{H.4})$$

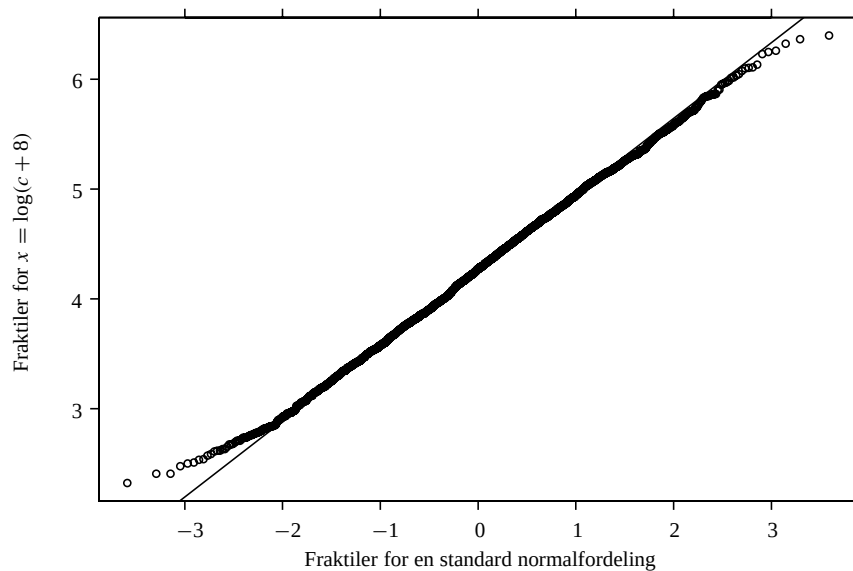
hvor

$$C_k = \sqrt{\frac{N_k - 1}{2}} \frac{\Gamma(\frac{N_k - 1}{2})}{\Gamma(\frac{N_k}{2})} \quad (\text{H.5})$$

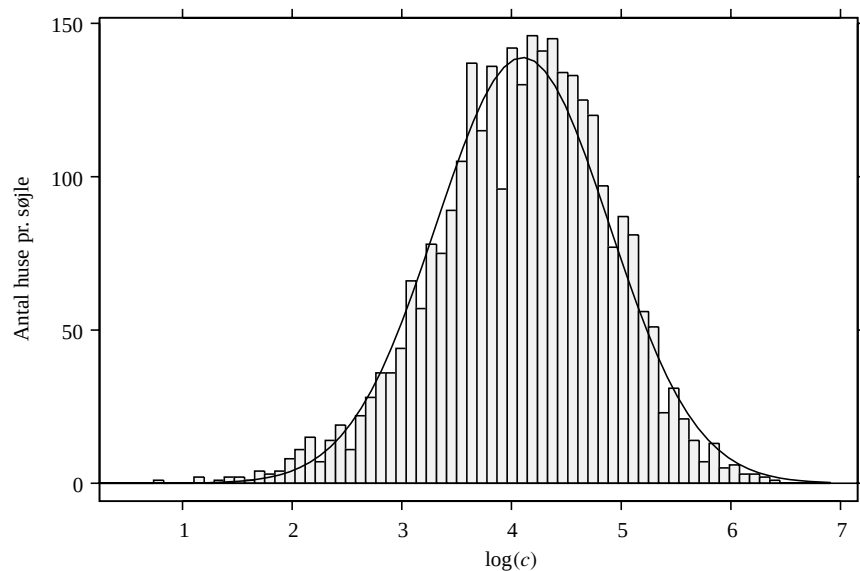
Eksempelvis gælder der, at hvis $N_k = 5$ fås $C_k = 1.064$. Afslutningsvis samles disse 275 $\hat{\sigma}_k$ -værdier til en enkelt vægtet middelværdi: $\hat{\sigma}$. Antallet af husmålinger i hver kommune N_k anvendes som vægt. Resultatet er: $\hat{\sigma} = 0.59418$.



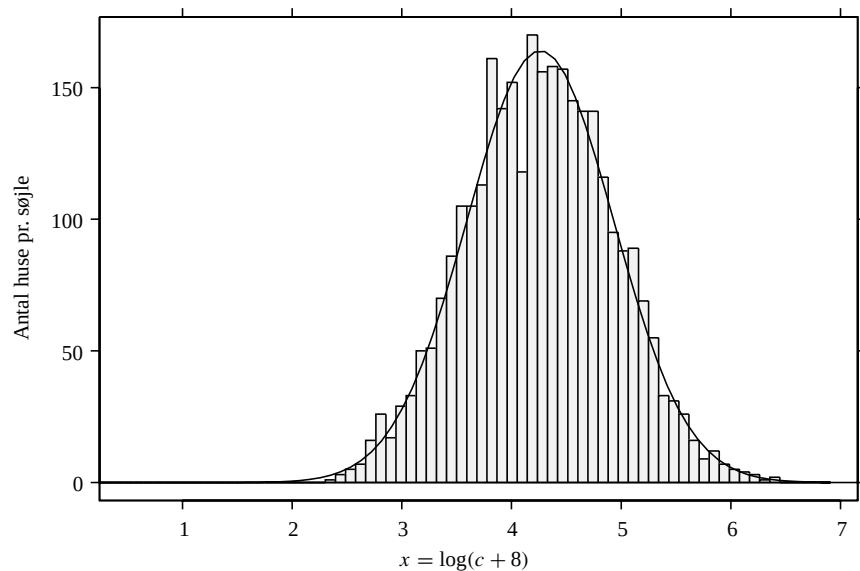
Figur H.1. Fraktilerne for $\log(c)$ mod fraktilerne til en standard normalfordeling.



Figur H.2. Fraktilerne for $x = \log(c+8)$ mod fraktilerne til en standard normalfordeling.



Figur H.3. Fordeling af logaritmen til de 3019 radonkoncentrationer: $\log(c)$. Den viste kurve svarer til en perfekt normalfordeling med fordelingsparametre lig middelværdi og standardafvigelse af $\log(c)$.



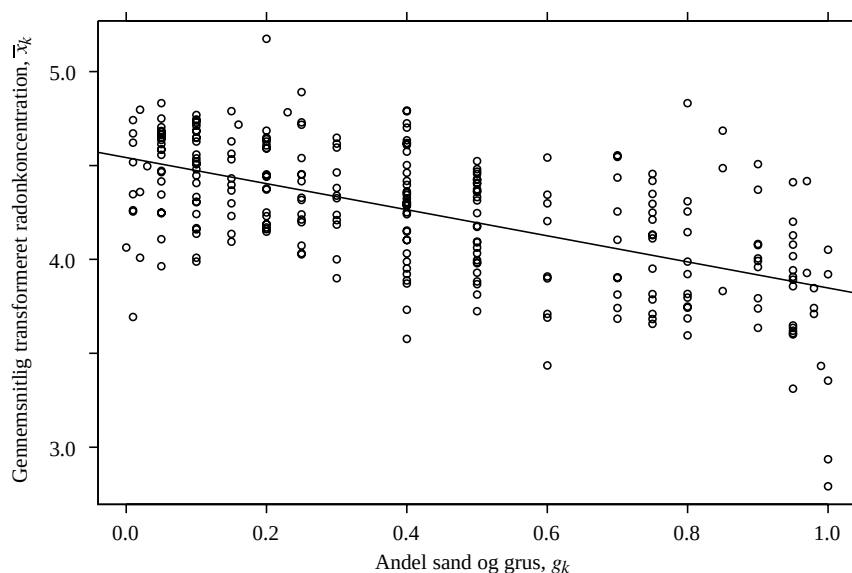
Figur H.4. Fordeling af de 3019 transformerede radonkoncentrationer: $x = \log(c + 8)$. Den viste kurve svarer til en perfekt normalfordeling med fordelingsparametre lig middelværdi og standardafvigelse af x .

μ_k -estimatoren

Estimatoren $\hat{\mu}_k$ for μ_k findes i det følgende. En simpelt estimat ville være at sætte: $\hat{\mu}_k = \bar{x}_k$, altså den observerede middelværdi i kommune k . Imidlertid har Price et al. [Pr96] vist, at man kan opnå et forbedret estimat på basis af bayesiansk statistik. Det afgørende trick er at betragte fordelingen af middelværdier $\bar{x}_k$ for alle kommuner. Hvis $\bar{x}_k$ i en given kommune afviger meget fra den typiske værdi, vil vi justere $\hat{\mu}_k$ -estimatet. Da geologi er en vigtig faktor for radonkoncentrationen, anvendes geologisk information ved justeringen. Først foretages en lineær regressionsanalyse:

$$\bar{x}_k = \beta_0 + \beta_1 g_k + \varepsilon_k \quad (\text{H.6})$$

hvor g_k er et estimat for hvor stor en del af overfladearealet i kommune k , der domineres af sand og grus. Vurderingen af de enkelte kommuner er foretaget af GEUS, som omtalt side 9. På baggrund af resultaterne for de 275 kommuner fås regressionskoefficienterne $\beta_0 = 4.54 \pm 0.030$ og $\beta_1 = -0.69 \pm 0.06$. De angivne usikkerheder er enkelte standardafvigelser. R^2 -værdien er 36 %, så det er kun en begrænset del af variabiliteten, som er forklaret af regressionen. Regressionen er vist i Figur H.5. Det ses, at dersom en kom-



Figur H.5. Sammenhæng mellem $\bar{x}_k$ og andelen af sand og grus (g_k) i de 275 kommuner. Figuren viser, at der er en tendens til at jo mere sand og grus, der er i en kommune, jo lavere er kommunens gennemsnitlige radonniveau. Den viste linie svarer til regressionen i ligning H.6.

mune er uden sand-og-grus ($g_k = 0$), så svarer $\bar{x}_k$ til 86 Bq/m³. For en ren sand-og-grus kommune antager $\bar{x}_k$ værdien 39 Bq/m³. Som det fremgår af figuren, er der betydelig variation omkring regressionslinien. Det betyder, at g_k er en svag (omend signifikant) regressor for $\bar{x}_k$. Variansen σ_ε^2 for residuerne ε_k er 0.082. For hver kommune kan vi beregne: $\theta_k = \beta_0 + \beta_1 g_k$, og vi anvender følgende vægtede middelværdi som et estimat for μ_k :

$$\hat{\mu}_k = \frac{\omega_k \bar{x}_k + \omega_0 \theta_k}{\omega_k + \omega_0} \quad (\text{H.7})$$

hvor vægtene er:

$$\omega_k = \frac{N_k}{\hat{\sigma}^2} \quad (\text{H.8})$$

og

$$\omega_0 = \frac{1}{\sigma_\varepsilon^2} \quad (\text{H.9})$$

Som det ses, estimeres μ_k som den observerede middelværdi $\bar{x}_k$ med efterfølgende korrektion i retning af, hvad der normalt gælder for kommuner med den form for overfladegeologi. Hvis der kun er få (eller ingen) målinger i en given kommune, da ses det, at $\hat{\mu}_k \approx \theta_k$. Hvis der på den anden side er mange målinger, da fås: $\hat{\mu}_k \approx \bar{x}_k$. Virkningen af θ_k på $\hat{\mu}_k$ svarer til 4 ekstra målinger i kommunen.

En vigtig kilde til usikkerhed i kortlægningen på kommuneniveau er, at der kun er gennemført få målinger i de enkelte kommuner. Vi anvender ligning H.7 som en måde til at foretage en vis stabilisering af kommuneestimerne. Ligningen anvendes for alle kommuner på nær de bornholmske.

H.3 f_{200} -model

Hvis x er normalfordelt med sande fordelingsparametre μ_k og σ , da er den sande andel af huse over 200 Bq/m³ i kommune k lig med:

$$f_{200,\text{true}}(k) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(208) - \mu_k}{\sigma}\right) \quad (\text{H.10})$$

hvor Φ er den kumulerede fordelingsfunktion for normalfordelingen $N(0, 1)$. En simpel estimator for $f_{200,\text{true}}$ for en given kommune kan opnås ved at erstatte μ_k og σ med hhv. $\hat{\mu}_k$ og $\hat{\sigma}$. Det kan imidlertid vises, at i middel vil dette ikke give det korrekte resultat. Resultatet er biased pga. ulineariteten af Φ . En estimator af $f_{200,\text{true}}$ i en given kommune er udviklet af P. Kirkegaard, Risø (se appendiks i [A99b]): Først beregnes u_k :

$$u_k = \frac{\log(208) - \hat{\mu}_k}{\hat{\sigma}} \quad (\text{H.11})$$

og et bias-led:

$$B_k = \frac{-1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u_k^2\right) \frac{u_k}{2N_k} \quad (\text{H.12})$$

Dernæst indsættes i:

$$f_{200,\text{m}}(k) = 1 - \Phi(u_k) + B_k \quad (\text{H.13})$$

$f_{200,\text{m}}(k)$ er nu en (unbiased) modelværdi for andelen af huse i kommune k med radonkoncentrationer over 200 Bq/m³. Modellen anvendes på tilsvarende vis til at beregne andelen af huse med koncentrationer over 400 Bq/m³.

Test af modellen

Der er foretaget en nærmere test af modellen [A99b]. Bl.a. kan det påvises, at modellen giver resultater, som på amts- og landsniveau er i overensstemmelse med de observerede andele. Desuden er syntetiske data anvendt til verifikation af modellen.

I Monte-Carlo beregninger

Usikkerheden ved undersøgelsens hovedresultater er bestemt vha. en Monte-Carlo teknik. Denne teknik blev valgt fremfor bootstrap-metoden [Ma97], da den er relativ simpel at implementere. Desuden er det let at udvide usikkerhedsberegningen til også at omfatte andre fejlkilder (såsom selve usikkerheden ved den enkelte måling). I rapporten anvendes Monte-Carlo teknikken dog primært til at bestemme betydningen af fejl, som hidrører fra stikprøvestørrelsen: Jo større stikprøve, jo mere velbestemt bliver den pågældende statistik.

For at forklare princippet betragtes en stikprøve med N radonmålinger. Middelværdien beregnes til at være AM, men hvor sikkert er dette tal? Hvis standardafvigelsen for stikprøven er ASD, så vil svaret være, at standardafvigelsen på middelværdien er $ASD/N^{0.5}$. Dette simple problem har altså en simpel analytisk løsning (under forudsætning af normalitet). I andre tilfælde (f.eks. ved beregning af den repræsentative middelværdi for Danmark som helhed eller ved anvendelse af kommunemodellen) findes der ikke umiddelbart simple analytiske løsninger. I sådanne tilfælde er det lettere at anvende Monte-Carlo teknikken: Førnævnte problem kan således løses ved at gøre en antagelse om, fra hvilken fordeling stikprøven er udtrukket. Eksempelvis kan man antage, at stikprøven kommer fra en normalfordeling med middelværdi og standardafvigelse, som svarer til middelværdi og standardafvigelse for den oprindelige stikprøve (AM og ASD). Man udtrækker så N tilfældige tal vha. en tilfældigtalsgenerator. Det er afgørende, at stikprøven netop har størrelsen N . Middelværdien AM1 beregnes. En ny "tilfældig" stikprøve udtrækkes, og middelværdien AM2 beregnes. Dette gentages eksempelvis 2000 gange. Fordelingen af de 2000 resultater AM1, AM2, ... AM2000 viser, hvordan den betragtede statistik (her: den aritmetiske middelværdi) tilfældigt kan variere fra gang til gang. På det grundlag kan man eksempelvis finde 68 %-konfidensintervallet for den oprindelige middelværdi AM.

I.1 Kommunemodel

Usikkerhedsberegningen for kommuneandelen af enfamiliehuse med radonkoncentrationer over 200 Bq/m^3 beskrives i det følgende.

Først beregnes $\bar{x}_k$, $\hat{\sigma}$ og $f_{200,m}(k)$ for alle 275 kommuner. Dernæst genereres 3019 syntetiske "måleresultater" med en tilfældigtalsgenerator. Dette svarer således til en gentagelse af hele undersøgelsen. I kommune k udtrækkes N_k tilfældige x -værdier fra en normalfordeling med middelværdi $\bar{x}_k$ og standardafvigelse $\hat{\sigma}$. Det betyder, at vi har ophøjet $\bar{x}_k$ og $\hat{\sigma}$ til at være "sande" fordelingsparametre i Monte-Carlo beregningerne. Ud fra dette syntetiske datasæt beregnes $f_{200,m}(k)$ og andre statistikker. Behandlingen adskiller sig kun på et punkt fra behandlingen af de virkelige måleresultater: θ_k -værdierne i ligning H.7 udtrækkes tilfældigt fra en normalfordeling med middelværdi $\beta_0 + \beta_1 g_k$ og varians σ_ϵ^2 . På den måde tages der også højde for usikkerheden hidrørende fra θ_k , som krævet i en fuld bayesiansk analyse [Pr96]. Alle resultater gemmes. Et nyt syntetisk datasæt udtrækkes, og nye resultater beregnes og gemmes. I alt udtrækkes 2000 syntetiske datasæt på den måde. Listen med de syntetiske $f_{200,m}$ -værdier sorteres efter størrelse. Det samme gøres for de øvrige statistikker. For hver liste findes det interval, som indeholder de midterste 68 % af observationerne. Dette interval udgør et biased 68 %-konfidensinterval for $f_{200,m}(k)$. Denne "bias" skyldes følgende forhold: Den sande " $f_{200}(k)$ -værdi" i Monte-Carlo simulationerne er:

$$f_{MC}(k) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(208) - \bar{x}_k}{\hat{\sigma}}\right) \quad (I.1)$$

hvilket er forskellig fra den observerede værdi i ligning H.10. Vi kan derfor fjerne denne bias ved subtraktion af: $f_{MC}(k) - f_{200,m}(k)$. Det antages, at det observerede liste-

konfidensinterval forholder sig til f_{MC} på omtrent samme måde som det ønskede interval forholder sig til $f_{200,true}$.

Monte-Carlo proceduren er implementeret i et særligt Pascal program udviklet til formålet. Det bemærkes, at proceduren er relativt beregningstung, eftersom der skal dannes 291 lister (en for hver kommune og amt, samt en for Danmark som helhed) for hver af undersøgelsens mange statistikker i vægtet og uvægtet form.

J Datablade

Dette bilag indeholder undersøgelsens hovedresultater for enfamiliehuse i kommuner og amter. Databladene er placeret amtsvis. Der skelnes i databladene mellem rå målinger og vurderinger. De sidstnævnte beror på den statistiske kommunemodel, som beskrevet i afsnit 3.3 og Bilag H. I det følgende gives en kort forklaring af de enkelt dele af databladene (se desuden side 18).

Figur Øverst på databladet er der vist en figur over kommunevurderingerne. Hvert punkt angiver andelen (i procent) af huse i den enkelte kommune, som har radonniveauer over 200 Bq/m^3 (f_{200}). Kommunerne er ordnet efter stigende andel. For at have et sammenligningsgrundlag er amts- og landsværdierne også vist. Vurderingerne er behæftet med usikkerhed. Dette er indikeret grafisk vha. såkaldte usikkerhedsintervaller. Disse svarer til 68 % konfidensintervaller.

Kommunenavn Denne søjle angiver kommunenavnet.

Antal enfamiliehuse Antallet af enfamiliehuse iht. boligoptællingen pr. 1. januar 1994.

Forekomst sand & grus Dette er en forenklet geologisk beskrivelse af kommunens overfladenære jordlag (se side 9). Der skelnes her kun mellem grupperne “sand og grus” og “ler eller andre jordarter”. Tabellen angiver hvilken del af kommunens overfladeareal, der er domineret af sand og grus. Hvis værdien er 10 %, betyder det normalt, at 90 % af arealet er overvejende moræneler. Andelen af sand-og-grus anvendes i kommunemodellen (se figuren side 107).

Antal huse (målinger) Denne søjle angiver hvor mange enfamiliehuse, der blev undersøgt i kommunen.

Middel (målinger) Denne søjle angiver den geometriske middelværdi (GM) for radonmålingerne i kommunen.

Max (målinger) Dette er den maksimalt målte radonkoncentration i kommunen.

f_{200} (målinger) Dette er den observerede andel af huse i kommunen, der har værdier over 200 Bq/m^3 . Hvis eksempelvis et enkelt hus havde en værdi over 200 Bq/m^3 , og hvis der blev gjort i alt 10 målinger i kommunen, da er f_{200} angivet til 10.0 %.

f_{400} (målinger) Dette er den observerede andel af huse i kommunen, der har værdier over 400 Bq/m^3 .

f_{200} (vurderinger) Under anvendelse af den statistiske kommunemodel er der foretaget en vurdering af hvor stor en andel af kommunens enfamiliehuse, der har radonkoncentrationer over 200 Bq/m^3 . Denne vurdering er angivet her. Vurderingerne er behæftet med usikkerhed, og 68 % konfidensintervaller er angivet i kantede parenteser.

f_{400} (vurderinger) Som ovenstående blot for 400 Bq/m^3 .

Klasse (vurderinger) På baggrund af f_{200} -vurderingen er kommunerne inddelt i klasser (se side 16):

Klasse 0 : 0–0.3 % (særlig lille tæthed af huse med niveauer over 200 Bq/m^3)

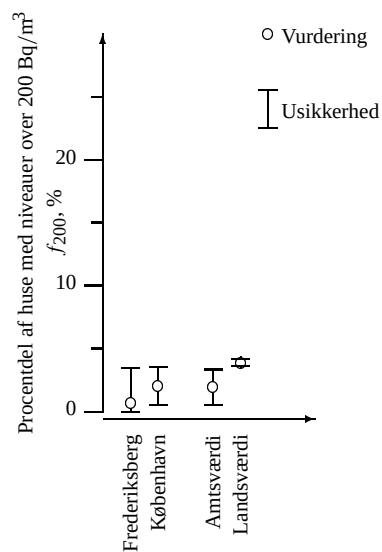
Klasse 1 : 0.3–1 % (lille tæthed af huse med niveauer over 200 Bq/m^3)

Klasse 2 : 1–3 %

Klasse 3 : 3–10 %

Klasse 4 : 10–30 % (stor tæthed af huse med niveauer over 200 Bq/m^3)

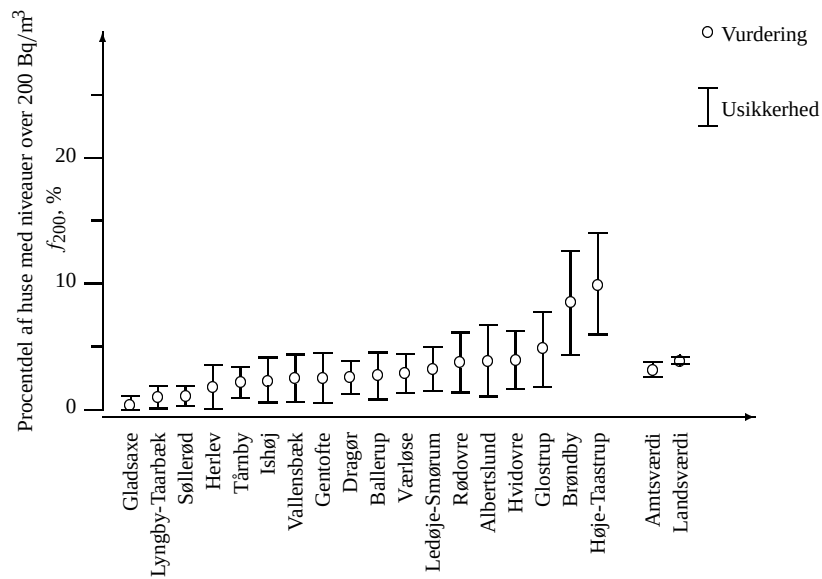
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Københavns og Frederiksbergs kommuner**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger						Vurderinger (model)					Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀ %			<i>f</i> ₄₀₀ %			
Frederiksberg	1589	1	9	28	90	0.0	0.0	0.7	[0.0, 3.5]	0.01	[0.00, 0.11]	1		
København	20257	0	17	47	290	5.9	0.0	2.0	[0.5, 3.6]	0.06	[0.00, 0.22]	2		
Amtsværdi (vægtet)	21846	-	26	45	290	5.5	0.0	1.9	[0.5, 3.4]	0.06	[0.00, 0.21]	2		
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3		
Middel = Geometrisk middelværdi (GM)														

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

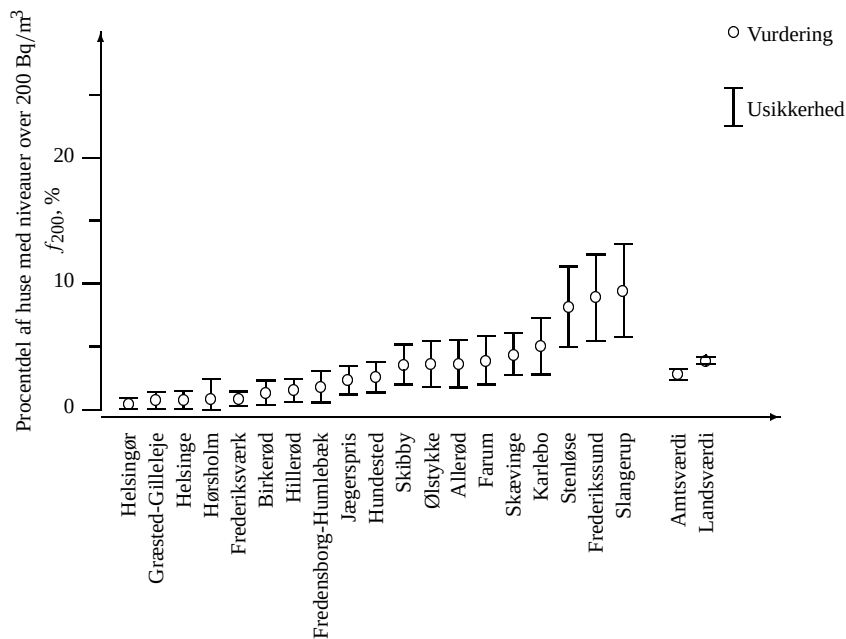
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Københavns Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀		<i>f</i> ₄₀₀		
								%		%		
Gladsaxe	12799	60	13	29	150	0.0	0.0	0.3	[0.0, 1.1]	0.00	[0.00, 0.02]	1
Lyngby-Taarbæk	10959	40	13	41	100	0.0	0.0	1.0	[0.1, 1.9]	0.02	[0.00, 0.08]	1
Søllerød	8114	50	15	44	160	0.0	0.0	1.1	[0.3, 1.9]	0.03	[0.00, 0.08]	2
Herlev	6600	2	12	46	100	0.0	0.0	1.8	[0.1, 3.6]	0.05	[0.00, 0.22]	2
Tårnby	8474	50	15	55	240	6.7	0.0	2.2	[0.9, 3.4]	0.07	[0.00, 0.12]	2
Ishøj	3629	5	14	49	250	7.1	0.0	2.3	[0.6, 4.1]	0.07	[0.00, 0.26]	2
Vallensbæk	3204	20	11	51	250	18.2	0.0	2.5	[0.6, 4.4]	0.07	[0.00, 0.24]	2
Gentofte	12537	10	12	53	250	8.3	0.0	2.5	[0.5, 4.5]	0.08	[0.00, 0.27]	2
Dragør	3879	75	13	62	390	7.7	0.0	2.6	[1.3, 3.8]	0.08	[0.02, 0.14]	2
Ballerup	8946	10	13	53	200	0.0	0.0	2.7	[0.8, 4.6]	0.09	[0.00, 0.28]	2
Værløse	5397	40	15	60	170	0.0	0.0	2.9	[1.3, 4.5]	0.11	[0.01, 0.19]	2
Ledøje-Smørum	3240	40	14	62	210	7.1	0.0	3.3	[1.5, 5.0]	0.12	[0.02, 0.22]	3
Rødovre	7690	1	14	59	270	7.1	0.0	3.8	[1.4, 6.1]	0.15	[0.00, 0.43]	3
Albertslund	6822	1	10	63	100	0.0	0.0	3.9	[1.0, 6.7]	0.14	[0.00, 0.48]	3
Hvidovre	9761	25	12	66	220	8.3	0.0	3.9	[1.6, 6.2]	0.15	[0.00, 0.36]	3
Glostrup	3767	1	12	66	340	8.3	0.0	4.9	[1.8, 7.8]	0.21	[0.00, 0.59]	3
Brøndby	5167	5	11	87	340	27.3	0.0	8.5	[4.3, 13]	0.50	[0.09, 0.89]	3
Høje-Taastrup	9860	25	10	102	220	10.0	0.0	9.9	[6.0, 14]	0.63	[0.25, 1.00]	3
Amtsværdi (vægtet)	130845	-	229	54	390	5.4	0.0	3.2	[2.6, 3.8]	0.14	[0.08, 0.19]	3
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

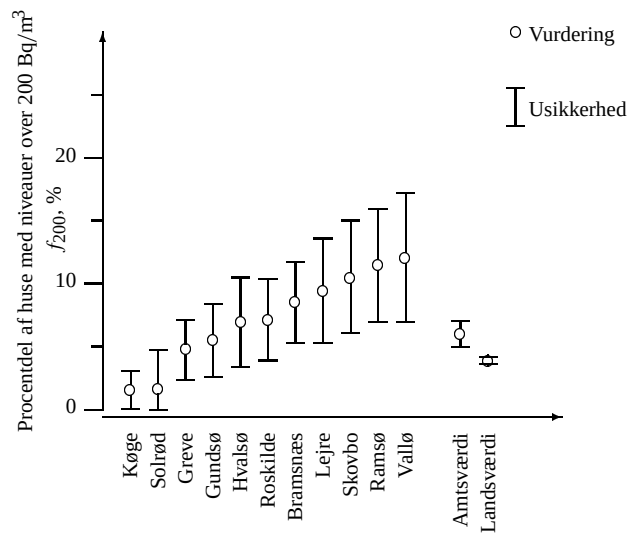
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Frederiksborg Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀ %		<i>f</i> ₄₀₀ %		
Helsingør	12809	75	13	36	160	0.0	0.0	0.5	[0.0, 0.9]	0.01	[0.00, 0.03]	1
Græsted-Gilleleje	6216	60	13	39	140	0.0	0.0	0.8	[0.1, 1.4]	0.01	[0.00, 0.05]	1
Helsingør	6360	60	12	41	90	0.0	0.0	0.8	[0.1, 1.5]	0.01	[0.00, 0.05]	1
Hørsholm	6484	40	11	39	80	0.0	0.0	0.9	[0.0, 2.4]	0.02	[0.00, 0.07]	1
Frederiksværk	5459	90	13	45	140	0.0	0.0	0.9	[0.3, 1.5]	0.02	[0.00, 0.04]	1
Birkerød	5550	50	13	47	170	0.0	0.0	1.3	[0.3, 2.3]	0.03	[0.00, 0.09]	2
Hillerød	8695	75	14	53	140	0.0	0.0	1.5	[0.6, 2.4]	0.04	[0.00, 0.07]	2
Fredensborg-Humlebæk	5881	40	14	51	140	0.0	0.0	1.8	[0.6, 3.1]	0.05	[0.00, 0.14]	2
Jægerspris	2442	90	9	71	120	0.0	0.0	2.3	[1.2, 3.5]	0.06	[0.02, 0.10]	2
Hundested	3075	80	13	65	190	0.0	0.0	2.6	[1.4, 3.8]	0.08	[0.03, 0.14]	2
Skibby	2309	75	12	73	210	8.3	0.0	3.6	[2.0, 5.2]	0.13	[0.05, 0.21]	3
Ølstykke	4908	40	14	65	180	0.0	0.0	3.6	[1.8, 5.4]	0.14	[0.03, 0.25]	3
Allerød	6839	50	12	68	240	8.3	0.0	3.7	[1.8, 5.5]	0.14	[0.03, 0.24]	3
Farum	4061	50	13	69	280	7.7	0.0	3.9	[2.0, 5.8]	0.15	[0.04, 0.27]	3
Skævinge	1965	90	13	81	500	7.7	7.7	4.4	[2.8, 6.1]	0.18	[0.10, 0.27]	3
Karlebo	5608	50	12	78	220	8.3	0.0	5.1	[2.8, 7.3]	0.23	[0.08, 0.37]	3
Stenløse	4512	30	15	89	340	13.3	0.0	8.2	[4.9, 11]	0.50	[0.21, 0.79]	3
Frederikssund	4964	30	13	96	190	0.0	0.0	8.9	[5.4, 12]	0.56	[0.24, 0.87]	3
Slangerup	2867	20	13	94	260	7.7	0.0	9.4	[5.8, 13]	0.62	[0.25, 0.99]	3
Amtsværdi (vægtet)	101004	-	242	55	500	2.5	0.2	2.8	[2.4, 3.2]	0.13	[0.09, 0.16]	2
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3
Middel = Geometrisk middelværdi (GM)												

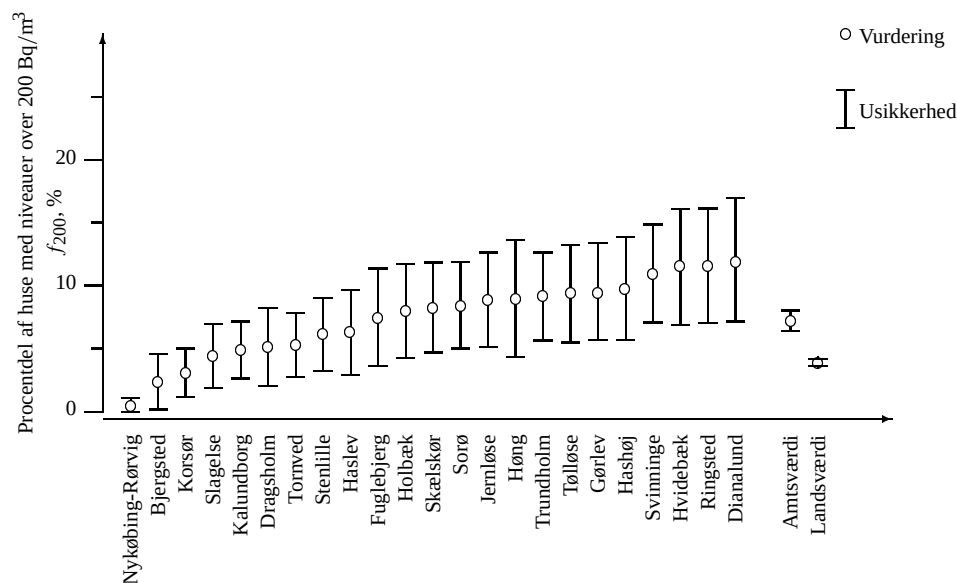
Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Roskilde Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀		<i>f</i> ₄₀₀		
								%		%		
Køge	10598	10	12	44	240	8.3	0.0	1.6	[0.0, 3.1]	0.04	[0.00, 0.18]	2
Solrød	6024	10	11	43	230	9.1	0.0	1.7	[0.0, 4.7]	0.04	[0.00, 0.20]	2
Greve	13782	5	16	67	180	0.0	0.0	4.8	[2.4, 7.1]	0.22	[0.03, 0.40]	3
Gundsø	4856	20	12	75	170	0.0	0.0	5.5	[2.6, 8.4]	0.26	[0.03, 0.48]	3
Hvalsø	2619	15	10	84	180	0.0	0.0	7.0	[3.4, 10]	0.35	[0.06, 0.64]	3
Roskilde	10644	10	14	80	220	14.3	0.0	7.1	[3.9, 10]	0.40	[0.10, 0.69]	3
Bramsnæs	2802	30	15	91	210	13.3	0.0	8.6	[5.3, 12]	0.54	[0.23, 0.82]	3
Lejre	3071	10	10	96	190	0.0	0.0	9.4	[5.3, 14]	0.58	[0.16, 1.00]	3
Skovbo	4594	10	11	100	260	9.1	0.0	10.5	[6.1, 15]	0.71	[0.24, 1.17]	4
Ramsø	3084	10	13	101	340	7.7	0.0	11.5	[6.9, 16]	0.85	[0.32, 1.35]	4
Vallø	3608	5	10	107	190	0.0	0.0	12.0	[6.9, 17]	0.87	[0.28, 1.45]	4
Amtsværdi (vægtet)	65682	-	134	70	340	6.1	0.0	6.0	[4.9, 7.0]	0.34	[0.23, 0.45]	3
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3
Middel = Geometrisk middelværdi (GM)												

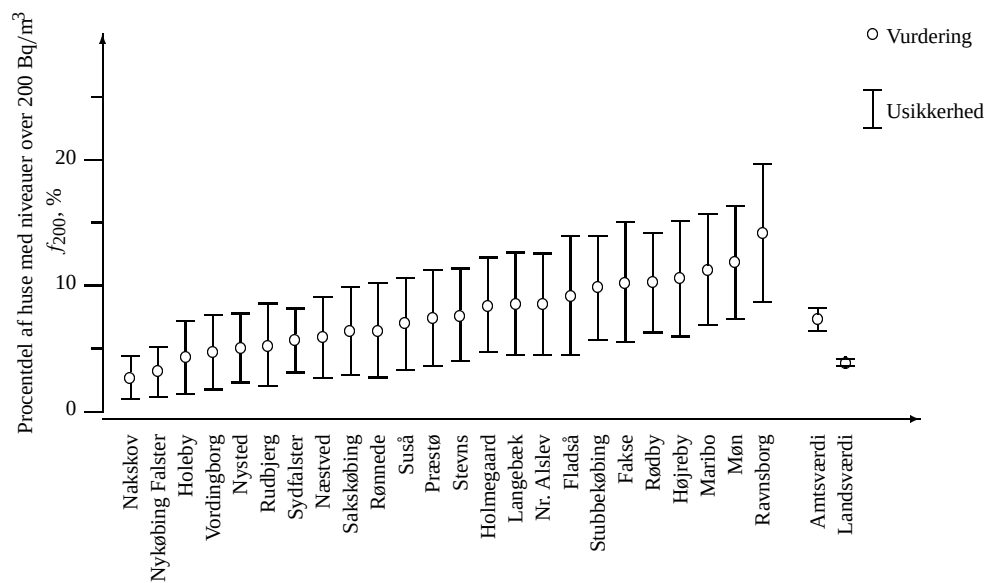
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Vestsjællands Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)					Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀ %		<i>f</i> ₄₀₀ %			
Nykøbing-Rørvig	2600	75	12	35	80	0.0	0.0	0.4	[0.0, 1.1]	0.01	[0.00, 0.02]	1	
Bjergsted	3112	15	9	53	100	0.0	0.0	2.4	[0.2, 4.6]	0.06	[0.00, 0.27]	2	
Korsør	5282	40	10	64	240	10.0	0.0	3.1	[1.1, 5.0]	0.10	[0.00, 0.23]	3	
Slagelse	7827	10	12	66	170	0.0	0.0	4.4	[1.9, 6.9]	0.18	[0.00, 0.36]	3	
Kalundborg	6035	50	12	77	190	0.0	0.0	4.9	[2.6, 7.2]	0.21	[0.07, 0.36]	3	
Dragsholm	4891	20	8	76	180	0.0	0.0	5.1	[2.0, 8.2]	0.19	[0.00, 0.46]	3	
Tornved	3326	50	10	82	340	10.0	0.0	5.3	[2.8, 7.8]	0.23	[0.07, 0.39]	3	
Stenlille	2117	40	9	87	190	0.0	0.0	6.1	[3.2, 9.0]	0.28	[0.08, 0.46]	3	
Haslev	4214	10	10	79	130	0.0	0.0	6.3	[2.9, 9.6]	0.30	[0.02, 0.56]	3	
Fuglebjerg	2564	10	9	87	160	0.0	0.0	7.5	[3.6, 11]	0.38	[0.05, 0.71]	3	
Holbæk	7519	20	10	91	170	0.0	0.0	8.0	[4.3, 12]	0.44	[0.12, 0.75]	3	
Skælskør	3893	5	13	86	130	0.0	0.0	8.2	[4.7, 12]	0.49	[0.15, 0.83]	3	
Sorø	4262	20	14	87	440	7.1	7.1	8.4	[5.0, 12]	0.52	[0.19, 0.84]	3	
Jernløse	2180	20	11	94	200	9.1	0.0	8.9	[5.1, 13]	0.54	[0.19, 0.88]	3	
Høng	3194	5	8	90	440	25.0	12.5	8.9	[4.3, 14]	0.49	[0.06, 0.90]	3	
Trundholm	4164	40	10	103	270	20.0	0.0	9.1	[5.6, 13]	0.55	[0.25, 0.82]	3	
Tølløse	3426	5	13	92	300	15.4	0.0	9.4	[5.5, 13]	0.61	[0.20, 1.01]	3	
Gørlev	2461	10	13	92	220	7.7	0.0	9.5	[5.7, 13]	0.62	[0.22, 1.01]	3	
Hashøj	2540	10	12	95	250	8.3	0.0	9.7	[5.6, 14]	0.64	[0.21, 1.06]	3	
Svinninge	2427	40	11	111	180	0.0	0.0	11.0	[7.1, 15]	0.76	[0.39, 1.12]	4	
Hvidebæk	2247	10	10	106	200	10.0	0.0	11.5	[6.9, 16]	0.81	[0.31, 1.28]	4	
Ringsted	6801	5	13	101	510	23.1	7.7	11.6	[7.0, 16]	0.86	[0.33, 1.37]	4	
Dianalund	2658	15	9	110	320	22.2	0.0	11.9	[7.2, 17]	0.82	[0.33, 1.34]	4	
Amtsværdi (vægtet)	89740	-	248	82	510	7.0	1.4	7.2	[6.4, 8.0]	0.42	[0.32, 0.51]	3	
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3	

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

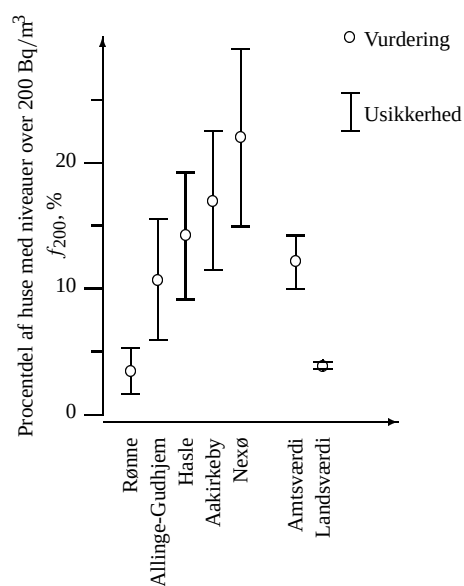
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Storstrøms Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	f ₂₀₀ %	f ₄₀₀ %	f ₂₀₀		f ₄₀₀		
								%		%		
Nakskov	5051	40	11	59	170	0.0	0.0	2.7	[1.0, 4.4]	0.08	[0.00, 0.21]	2
Nykøbing Falster	7297	15	14	58	260	7.1	0.0	3.2	[1.1, 5.1]	0.12	[0.00, 0.31]	3
Holeby	1919	25	7	73	150	0.0	0.0	4.4	[1.4, 7.2]	0.14	[0.00, 0.35]	3
Vordingborg	6335	25	7	77	170	0.0	0.0	4.7	[1.7, 7.7]	0.16	[0.00, 0.39]	3
Nysted	2515	15	11	71	380	9.1	0.0	5.0	[2.3, 7.8]	0.22	[0.01, 0.42]	3
Rudbjerg	1739	20	8	76	290	12.5	0.0	5.2	[2.0, 8.6]	0.20	[0.00, 0.50]	3
Sydfalster	2705	40	12	80	330	16.7	0.0	5.7	[3.1, 8.2]	0.27	[0.08, 0.45]	3
Næstved	12650	10	11	77	160	0.0	0.0	5.9	[2.7, 9.1]	0.28	[0.01, 0.53]	3
Sakskøbing	3767	5	11	77	160	0.0	0.0	6.4	[2.9, 9.9]	0.32	[0.02, 0.61]	3
Rønnede	2699	5	10	78	130	0.0	0.0	6.4	[2.7, 10]	0.31	[0.00, 0.63]	3
Suså	3142	15	8	86	160	0.0	0.0	7.0	[3.3, 11]	0.33	[0.03, 0.59]	3
Præstø	2735	20	7	93	180	0.0	0.0	7.4	[3.6, 11]	0.33	[0.05, 0.59]	3
Stevns	4206	1	13	82	310	15.4	0.0	7.6	[4.0, 11]	0.44	[0.09, 0.79]	3
Holmegaard	2589	20	10	93	260	20.0	0.0	8.4	[4.7, 12]	0.48	[0.16, 0.80]	3
Langebæk	2605	20	9	96	160	0.0	0.0	8.5	[4.5, 13]	0.47	[0.12, 0.83]	3
Nr. Alslev	4255	5	11	89	340	9.1	0.0	8.6	[4.5, 13]	0.51	[0.12, 0.89]	3
Fladså	2968	5	7	97	190	0.0	0.0	9.2	[4.5, 14]	0.49	[0.05, 0.88]	3
Stubbekøbing	2987	5	11	96	190	0.0	0.0	9.9	[5.7, 14]	0.65	[0.19, 1.06]	3
Fakse	4404	1	9	94	260	22.2	0.0	10.2	[5.5, 15]	0.64	[0.16, 1.13]	4
Rødby	2573	20	13	99	250	7.7	0.0	10.3	[6.3, 14]	0.71	[0.29, 1.12]	4
Højreby	1947	5	11	96	380	18.2	0.0	10.6	[6.0, 15]	0.72	[0.22, 1.21]	4
Maribo	4327	5	14	100	190	0.0	0.0	11.2	[6.9, 16]	0.82	[0.32, 1.36]	4
Møn	4988	10	13	104	550	7.7	7.7	11.9	[7.4, 16]	0.90	[0.37, 1.40]	4
Ravnsborg	3053	5	10	116	330	20.0	0.0	14.2	[8.7, 20]	1.14	[0.47, 1.81]	4
Amtsværdi (vægtet)	93456	-	248	82	550	5.9	0.4	7.3	[6.4, 8.2]	0.42	[0.31, 0.52]	3
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

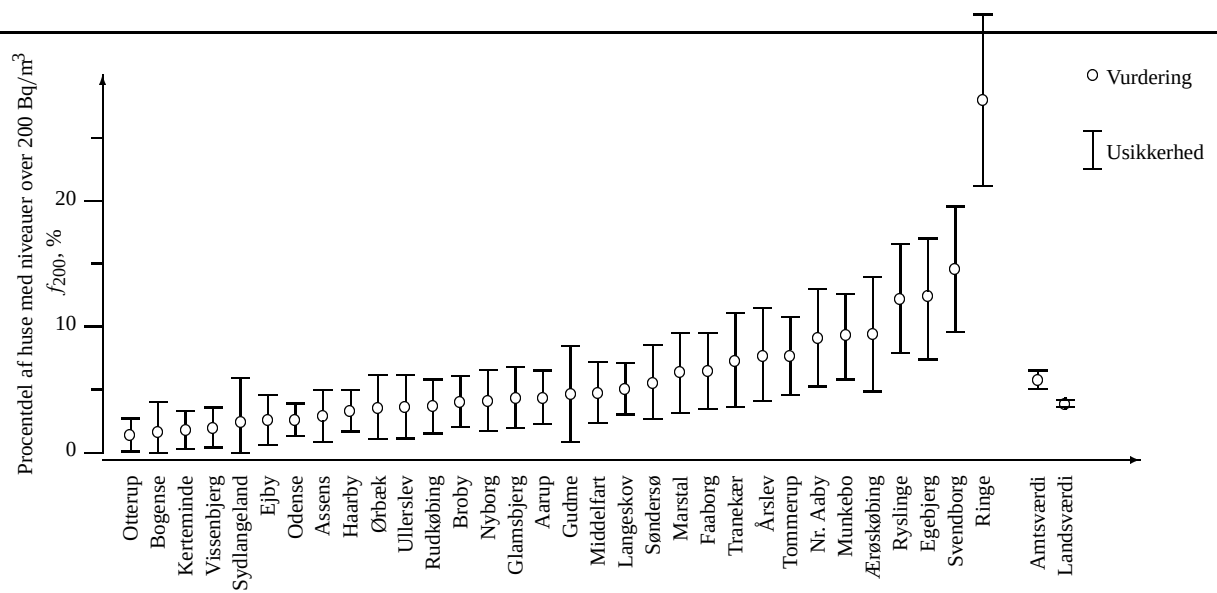
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Bornholms Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)					Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀ %		<i>f</i> ₄₀₀ %			
Rønne	6042	40	20	62	190	0.0	0.0	3.5	[1.6, 5.3]	0.14	[0.02, 0.26]	3	
Allinge-Gudhjem	3510	1	16	93	250	12.5	0.0	10.7	[5.9, 16]	0.78	[0.18, 1.38]	4	
Hasle	2780	16	21	103	240	4.8	0.0	14.3	[9.1, 19]	1.28	[0.50, 2.04]	4	
Aakirkeby	3024	23	22	110	450	22.7	4.5	17.0	[11, 23]	1.71	[0.76, 2.67]	4	
Nexø	3810	25	18	119	590	50.0	16.7	22.0	[15, 29]	2.62	[1.12, 4.12]	4	
Amtsværdi (vægtet)	19166	-	97	89	590	16.5	4.0	12.2	[10, 14]	1.16	[0.76, 1.54]	4	
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3	

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

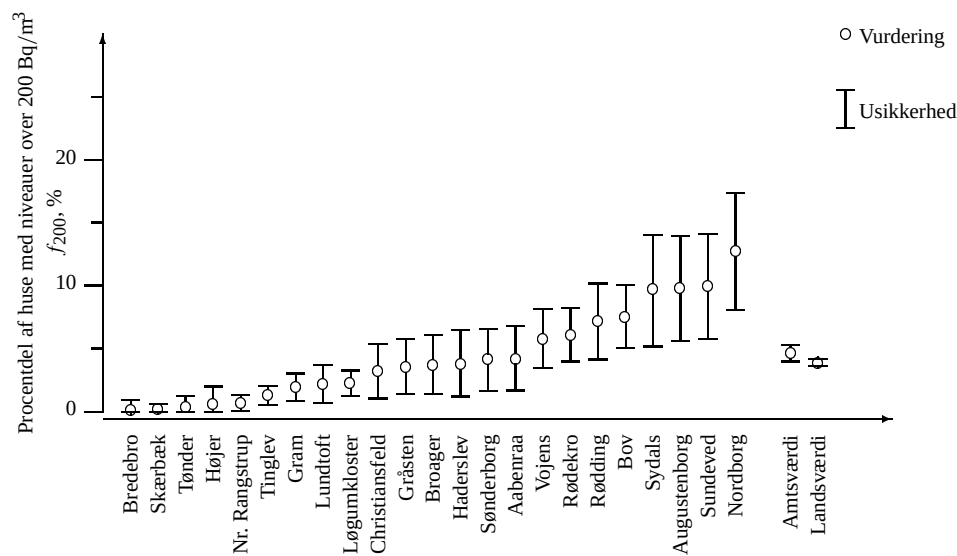
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Fyns Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	f ₂₀₀ %	f ₄₀₀ %	f ₂₀₀		f ₄₀₀		
								%	%	%	%	
Otterup	4213	30	11	45	100	0.0	0.0	1.4	[0.1, 2.7]	0.03	[0.00, 0.13]	2
Bogense	2483	40	7	51	110	0.0	0.0	1.6	[0.0, 4.0]	0.02	[0.00, 0.12]	2
Kerteminde	3913	25	12	49	90	0.0	0.0	1.8	[0.3, 3.3]	0.05	[0.00, 0.17]	2
Vissenbjerg	2397	40	9	54	120	0.0	0.0	2.0	[0.4, 3.6]	0.05	[0.00, 0.15]	2
Sydlangeland	2401	30	3	74	160	0.0	0.0	2.5	[0.0, 5.9]	0.31	[0.07, 0.57]	2
Ejby	3988	30	9	57	170	0.0	0.0	2.6	[0.6, 4.6]	0.07	[0.00, 0.22]	2
Odense	46075	30	23	54	240	4.3	0.0	2.6	[1.3, 3.9]	0.09	[0.02, 0.17]	2
Assens	4083	40	8	61	160	0.0	0.0	2.9	[0.9, 5.0]	0.08	[0.00, 0.22]	2
Haarby	2117	60	13	68	230	7.7	0.0	3.3	[1.7, 4.9]	0.12	[0.03, 0.21]	3
Ørbæk	2696	5	11	60	180	0.0	0.0	3.6	[1.1, 6.2]	0.13	[0.00, 0.42]	3
Ullerslev	1899	5	11	62	140	0.0	0.0	3.6	[1.1, 6.1]	0.13	[0.00, 0.41]	3
Rudkøbing	2907	40	10	69	160	0.0	0.0	3.7	[1.5, 5.8]	0.13	[0.00, 0.24]	3
Broby	2604	50	11	73	190	0.0	0.0	4.0	[2.0, 6.1]	0.16	[0.04, 0.27]	3
Nyborg	5809	10	14	64	200	0.0	0.0	4.1	[1.7, 6.5]	0.17	[0.00, 0.45]	3
Glamsbjerg	2497	40	10	73	280	20.0	0.0	4.3	[2.0, 6.8]	0.17	[0.02, 0.32]	3
Aarup	1971	50	12	74	210	8.3	0.0	4.4	[2.3, 6.5]	0.18	[0.05, 0.30]	3
Gudme	2600	2	6	69	170	0.0	0.0	4.7	[0.8, 8.5]	0.13	[0.00, 0.52]	3
Middelfart	6757	20	13	71	180	0.0	0.0	4.7	[2.3, 7.2]	0.21	[0.03, 0.38]	3
Langeskov	2275	70	11	84	210	9.1	0.0	5.0	[3.0, 7.1]	0.22	[0.10, 0.34]	3
Sønder sø	4491	15	12	74	290	8.3	0.0	5.6	[2.7, 8.5]	0.26	[0.03, 0.49]	3
Marstal	1813	25	9	83	180	0.0	0.0	6.4	[3.2, 9.5]	0.30	[0.05, 0.51]	3
Faaborg	6749	40	8	92	210	12.5	0.0	6.5	[3.5, 9.5]	0.29	[0.08, 0.48]	3
Tranekær	1891	10	10	84	200	10.0	0.0	7.3	[3.6, 11]	0.38	[0.06, 0.70]	3
Årslev	3321	20	10	90	200	0.0	0.0	7.7	[4.1, 11]	0.42	[0.11, 0.74]	3
Tommerup	3017	40	11	92	290	18.2	0.0	7.7	[4.6, 11]	0.43	[0.17, 0.66]	3
Nr. Aaby	1971	15	12	93	220	8.3	0.0	9.1	[5.3, 13]	0.57	[0.18, 0.95]	3
Munkebo	2313	40	12	100	410	16.7	8.3	9.3	[5.8, 13]	0.60	[0.29, 0.87]	3
Ærøskøbing	2244	10	8	99	300	12.5	0.0	9.5	[4.8, 14]	0.54	[0.10, 0.94]	3
Ryslinge	2851	10	13	105	200	7.7	0.0	12.2	[7.9, 17]	0.94	[0.43, 1.42]	4
Egebjerg	3507	1	11	105	400	18.2	9.1	12.4	[7.4, 17]	0.93	[0.33, 1.46]	4
Svendborg	12284	2	14	107	430	35.7	7.1	14.6	[9.6, 20]	1.27	[0.60, 1.92]	4
Ringe	4208	20	15	168	380	33.3	0.0	28.0	[21, 35]	3.94	[2.61, 5.25]	4
Amtsværdi (vægtet)	154345	-	349	70	430	8.1	0.9	5.8	[5.0, 6.5]	0.39	[0.30, 0.48]	3
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

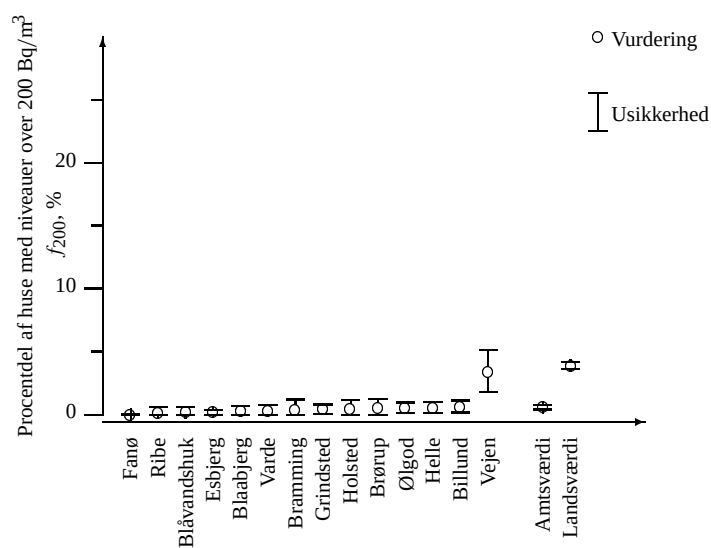
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Sønderjyllands Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)					Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀		<i>f</i> ₄₀₀			
								%		%			
Bredebro	1605	60	7	22	50	0.0	0.0	0.1	[0.0, 0.9]	0.01	[0.00, 0.01]	0	
Skærbæk	3206	95	11	29	60	0.0	0.0	0.2	[0.0, 0.6]	0.00	[0.00, 0.01]	0	
Tønder	4513	50	15	32	140	0.0	0.0	0.4	[0.0, 1.3]	0.01	[0.00, 0.03]	1	
Højer	1310	50	9	36	120	0.0	0.0	0.6	[0.0, 2.0]	0.01	[0.00, 0.05]	1	
Nr. Rangstrup	3821	70	12	40	120	0.0	0.0	0.7	[0.1, 1.3]	0.01	[0.00, 0.04]	1	
Tinglev	3989	95	9	58	130	0.0	0.0	1.3	[0.5, 2.1]	0.02	[0.00, 0.04]	2	
Gram	1982	75	12	59	220	8.3	0.0	1.9	[0.9, 3.0]	0.05	[0.01, 0.09]	2	
Lundtoft	2471	60	7	63	110	0.0	0.0	2.2	[0.7, 3.7]	0.04	[0.00, 0.11]	2	
Løgumkloster	2611	97	8	73	320	12.5	0.0	2.3	[1.2, 3.3]	0.05	[0.02, 0.08]	2	
Christiansfeld	3460	20	11	59	270	9.1	0.0	3.2	[1.0, 5.4]	0.11	[0.00, 0.31]	3	
Gråsten	2472	40	10	65	200	10.0	0.0	3.5	[1.4, 5.7]	0.12	[0.00, 0.28]	3	
Broager	2250	30	11	67	120	0.0	0.0	3.7	[1.4, 6.1]	0.14	[0.00, 0.34]	3	
Haderslev	7357	15	10	63	170	0.0	0.0	3.8	[1.2, 6.5]	0.14	[0.00, 0.41]	3	
Sønderborg	6654	10	14	64	150	0.0	0.0	4.1	[1.7, 6.6]	0.17	[0.00, 0.44]	3	
Aabenraa	6176	30	10	69	440	10.0	10.0	4.2	[1.7, 6.8]	0.16	[0.00, 0.38]	3	
Vojens	6125	60	13	85	290	7.7	0.0	5.8	[3.5, 8.1]	0.28	[0.13, 0.44]	3	
Rødekro	4002	85	10	99	260	10.0	0.0	6.1	[4.0, 8.2]	0.29	[0.17, 0.40]	3	
Rødding	4163	40	10	91	160	0.0	0.0	7.2	[4.1, 10]	0.37	[0.14, 0.59]	3	
Bov	3978	80	8	116	240	25.0	0.0	7.5	[5.0, 10]	0.37	[0.23, 0.50]	3	
Sydals	2694	5	9	97	210	11.1	0.0	9.7	[5.2, 14]	0.59	[0.14, 1.00]	3	
Augustenborg	2559	25	9	104	190	0.0	0.0	9.8	[5.6, 14]	0.60	[0.22, 0.96]	3	
Sundeved	1986	5	12	93	340	16.7	0.0	10.0	[5.7, 14]	0.67	[0.20, 1.09]	4	
Nordborg	4979	10	12	109	240	8.3	0.0	12.8	[8.1, 17]	0.99	[0.42, 1.52]	4	
Amtsværdi (vægtet)	84363	-	239	66	440	5.4	0.7	4.6	[4.0, 5.3]	0.24	[0.17, 0.30]	3	
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3	

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

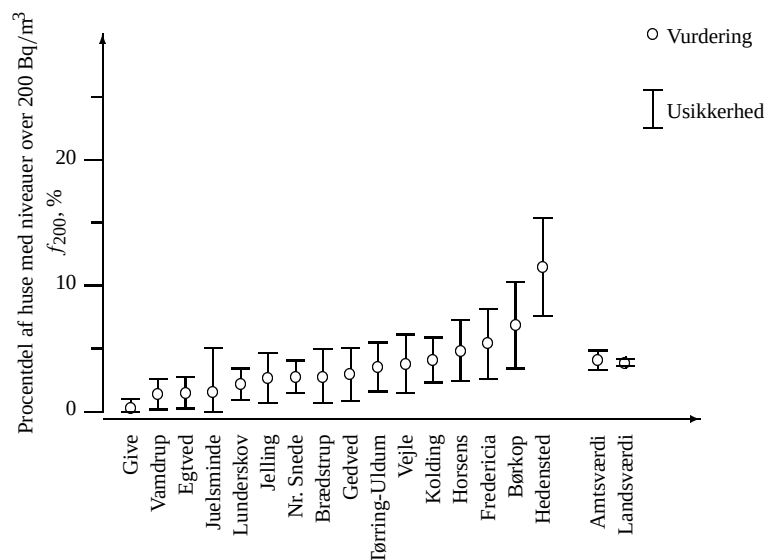
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Ribe Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	f_{200} %	f_{400} %	f_{200} %	f_{400} %	f_{200} %	f_{400} %	
Fanø	1408	100	12	10	20	0.0	0.0	0.0	[0.0, 0.1]	0.00	[0.00, 0.00]	0
Ribe	6615	95	8	28	40	0.0	0.0	0.1	[0.0, 0.6]	0.01	[0.00, 0.01]	0
Blåvandshuk	1592	98	7	32	50	0.0	0.0	0.2	[0.0, 0.6]	0.01	[0.00, 0.01]	0
Esbjerg	19989	80	20	27	90	0.0	0.0	0.2	[0.0, 0.4]	0.00	[0.00, 0.01]	0
Blaabyerg	2723	98	11	34	50	0.0	0.0	0.3	[0.0, 0.7]	0.00	[0.00, 0.01]	0
Varde	6452	90	12	33	80	0.0	0.0	0.3	[0.0, 0.8]	0.00	[0.00, 0.01]	1
Bramming	4663	60	11	32	70	0.0	0.0	0.4	[0.0, 1.2]	0.00	[0.00, 0.02]	1
Grindsted	4914	98	12	38	70	0.0	0.0	0.4	[0.1, 0.8]	0.01	[0.00, 0.02]	1
Holsted	2816	80	11	37	70	0.0	0.0	0.4	[0.0, 1.2]	0.01	[0.00, 0.02]	1
Brørup	2471	90	7	44	60	0.0	0.0	0.5	[0.0, 1.2]	0.00	[0.00, 0.01]	1
Ølgod	4267	100	11	41	210	9.1	0.0	0.5	[0.1, 1.0]	0.01	[0.00, 0.02]	1
Helle	3178	95	14	40	240	7.1	0.0	0.6	[0.1, 1.0]	0.01	[0.00, 0.02]	1
Billund	3099	95	12	42	70	0.0	0.0	0.6	[0.2, 1.1]	0.01	[0.00, 0.03]	1
Vejen	6175	50	16	66	140	0.0	0.0	3.4	[1.8, 5.1]	0.13	[0.04, 0.23]	3
Amtsværdi (vægtet)	70362	-	164	34	240	0.9	0.0	0.6	[0.4, 0.8]	0.02	[0.01, 0.03]	1
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

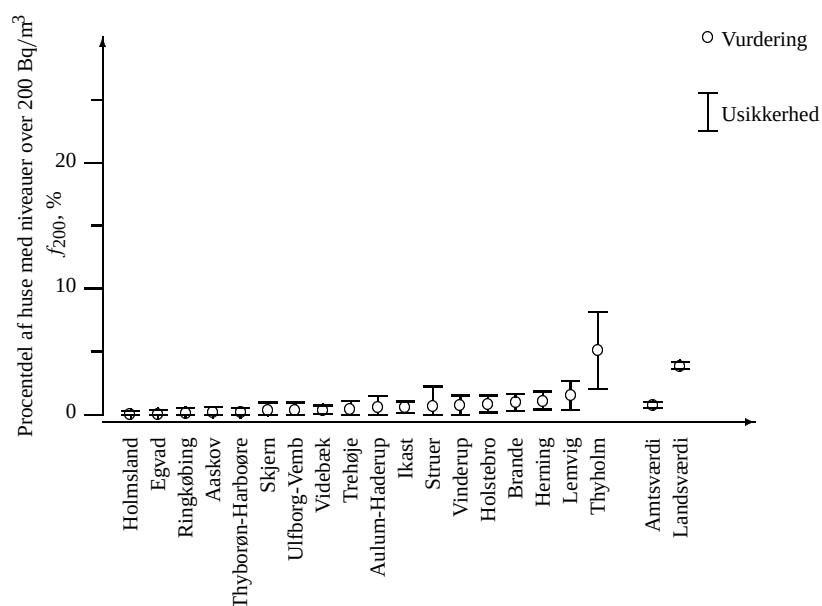
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Vejle Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀ %		<i>f</i> ₄₀₀ %		
Give	5283	80	8	33	90	0.0	0.0	0.3	[0.0, 1.0]	0.00	[0.00, 0.01]	1
Vamdrup	2374	40	10	48	100	0.0	0.0	1.4	[0.2, 2.6]	0.03	[0.00, 0.11]	2
Egtved	4245	50	9	49	100	0.0	0.0	1.5	[0.2, 2.8]	0.03	[0.00, 0.10]	2
Juelsminde	5795	5	10	43	100	0.0	0.0	1.6	[0.0, 5.0]	0.03	[0.00, 0.21]	2
Lunderskov	1861	50	15	56	170	0.0	0.0	2.2	[0.9, 3.4]	0.07	[0.01, 0.13]	2
Jelling	2050	20	11	57	140	0.0	0.0	2.7	[0.7, 4.6]	0.08	[0.00, 0.26]	2
Nr. Snede	2969	85	7	78	400	14.3	14.3	2.8	[1.5, 4.1]	0.06	[0.02, 0.10]	2
Brædstrup	3163	30	9	59	150	0.0	0.0	2.8	[0.7, 4.9]	0.08	[0.00, 0.25]	2
Gedved	3772	25	10	60	140	0.0	0.0	3.0	[0.8, 5.0]	0.09	[0.00, 0.28]	2
Tørring-Uldum	4461	50	11	69	150	0.0	0.0	3.5	[1.6, 5.5]	0.13	[0.02, 0.23]	3
Vejle	12236	30	10	66	270	20.0	0.0	3.8	[1.5, 6.1]	0.13	[0.00, 0.33]	3
Kolding	16694	40	18	67	230	5.6	0.0	4.1	[2.3, 5.9]	0.18	[0.06, 0.30]	3
Horsens	15523	15	17	69	310	5.9	0.0	4.8	[2.4, 7.3]	0.23	[0.04, 0.42]	3
Fredericia	12002	10	13	73	140	0.0	0.0	5.4	[2.6, 8.2]	0.26	[0.03, 0.47]	3
Børkop	3799	10	11	82	150	0.0	0.0	6.9	[3.4, 10]	0.36	[0.06, 0.65]	3
Hedensted	5339	40	12	112	220	8.3	0.0	11.5	[7.6, 15]	0.83	[0.44, 1.21]	4
Amtsværdi (vægtet)	101566	-	181	64	400	5.1	0.4	4.1	[3.3, 4.9]	0.19	[0.12, 0.26]	3
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

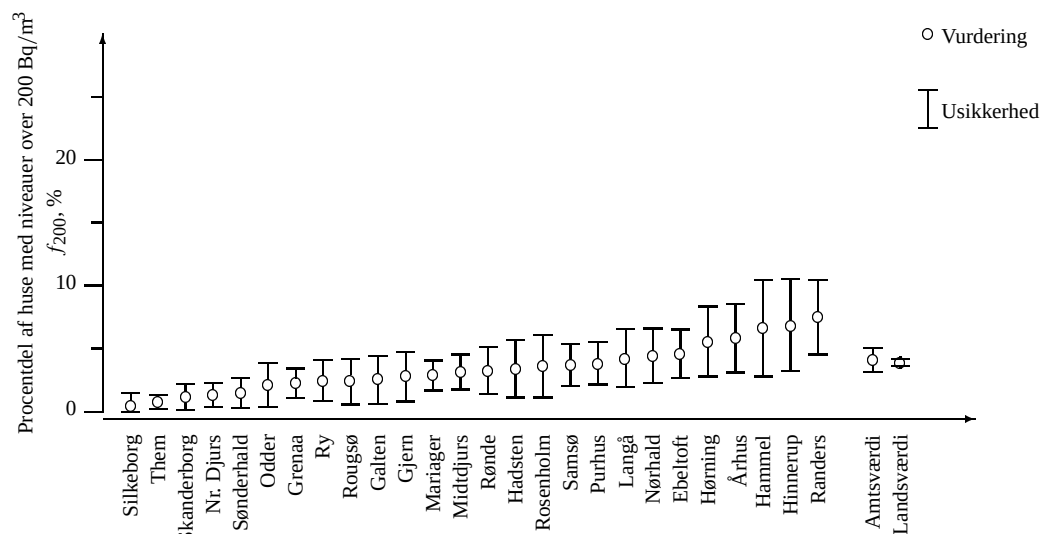
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Ringkøbing Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀		<i>f</i> ₄₀₀		
								%		%		
Holmsland	1926	95	9	19	30	0.0	0.0	0.0	[0.0, 0.3]	0.00	[0.00, 0.00]	0
Egvad	3740	99	7	21	50	0.0	0.0	0.1	[0.0, 0.3]	0.00	[0.00, 0.01]	0
Ringkøbing	6198	95	8	27	70	0.0	0.0	0.1	[0.0, 0.5]	0.00	[0.00, 0.01]	0
Aaskov	2604	95	9	29	100	0.0	0.0	0.2	[0.0, 0.6]	0.00	[0.00, 0.01]	0
Thyborøn-Harboøre	2009	95	11	28	100	0.0	0.0	0.2	[0.0, 0.5]	0.00	[0.00, 0.01]	0
Skjern	4664	80	10	34	60	0.0	0.0	0.3	[0.0, 1.0]	0.00	[0.00, 0.02]	1
Ulfborg-Vemb	2801	95	8	39	60	0.0	0.0	0.4	[0.0, 1.0]	0.00	[0.00, 0.01]	1
Videbæk	4628	90	13	35	100	0.0	0.0	0.4	[0.0, 0.7]	0.01	[0.00, 0.02]	1
Trehøje	3407	85	10	37	70	0.0	0.0	0.4	[0.0, 1.1]	0.01	[0.00, 0.02]	1
Aulum-Haderup	2476	80	8	42	120	0.0	0.0	0.6	[0.0, 1.5]	0.01	[0.00, 0.03]	1
Ikast	7304	95	13	40	100	0.0	0.0	0.6	[0.1, 1.0]	0.01	[0.00, 0.03]	1
Struer	5814	50	8	39	90	0.0	0.0	0.7	[0.0, 2.2]	0.01	[0.00, 0.05]	1
Vinderup	2973	80	5	55	80	0.0	0.0	0.8	[0.0, 1.5]	0.06	[0.03, 0.09]	1
Holstebro	9849	80	11	44	140	0.0	0.0	0.8	[0.2, 1.5]	0.01	[0.00, 0.04]	1
Brande	3031	95	8	52	150	0.0	0.0	1.0	[0.3, 1.6]	0.01	[0.00, 0.03]	1
Herning	14370	90	12	50	140	0.0	0.0	1.1	[0.4, 1.8]	0.02	[0.00, 0.05]	2
Lemvig	4879	70	6	61	230	16.7	0.0	1.5	[0.4, 2.7]	0.01	[0.00, 0.05]	2
Thyholm	1669	20	8	75	250	12.5	0.0	5.1	[2.1, 8.2]	0.20	[0.00, 0.46]	3
Amtsværdi (vægtet)	84342	-	164	40	250	1.2	0.0	0.7	[0.5, 1.0]	0.02	[0.01, 0.02]	1
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

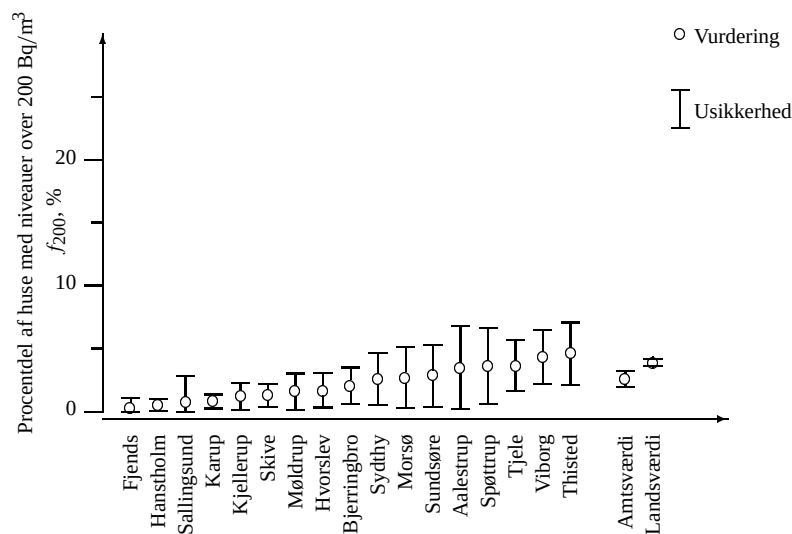
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Århus Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger						Vurderinger (model)					Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀		<i>f</i> ₄₀₀				
								%		%				
Silkeborg	14468	40	14	32	90	0.0	0.0	0.5	[0.0, 1.5]	0.01	[0.00, 0.04]	1		
Them	2506	90	11	45	100	0.0	0.0	0.8	[0.2, 1.3]	0.01	[0.00, 0.03]	1		
Skanderborg	5845	50	11	45	100	0.0	0.0	1.1	[0.1, 2.2]	0.02	[0.00, 0.09]	2		
Nr. Djurs	3127	70	10	51	150	0.0	0.0	1.3	[0.4, 2.3]	0.03	[0.00, 0.07]	2		
Sønderhald	3180	50	9	51	150	0.0	0.0	1.5	[0.3, 2.7]	0.03	[0.00, 0.10]	2		
Odder	6399	15	12	50	110	0.0	0.0	2.1	[0.4, 3.9]	0.06	[0.00, 0.23]	2		
Grenaa	6207	75	13	61	190	0.0	0.0	2.2	[1.1, 3.4]	0.07	[0.02, 0.12]	2		
Ry	3578	50	10	61	180	0.0	0.0	2.5	[0.9, 4.1]	0.07	[0.00, 0.17]	2		
Rougsø	3131	50	6	62	180	0.0	0.0	2.5	[0.6, 4.2]	0.04	[0.00, 0.12]	2		
Galten	3430	20	11	56	150	0.0	0.0	2.6	[0.6, 4.5]	0.08	[0.00, 0.25]	2		
Gjern	2804	25	11	59	110	0.0	0.0	2.8	[0.8, 4.7]	0.09	[0.00, 0.26]	2		
Mariager	3247	95	11	72	170	0.0	0.0	2.9	[1.7, 4.1]	0.09	[0.04, 0.14]	2		
Midtdjurs	2964	75	14	68	180	0.0	0.0	3.1	[1.7, 4.5]	0.11	[0.04, 0.19]	3		
Rønde	2346	40	11	64	250	18.2	0.0	3.3	[1.4, 5.1]	0.11	[0.01, 0.21]	3		
Hadsten	3966	10	12	60	150	0.0	0.0	3.4	[1.1, 5.7]	0.12	[0.00, 0.37]	3		
Rosenholm	3702	25	9	61	230	11.1	0.0	3.6	[1.1, 6.1]	0.12	[0.00, 0.33]	3		
Samsø	2345	70	11	74	150	0.0	0.0	3.7	[2.1, 5.4]	0.14	[0.05, 0.22]	3		
Purhus	3197	75	11	77	220	9.1	0.0	3.8	[2.2, 5.5]	0.14	[0.06, 0.23]	3		
Langå	3036	40	11	72	260	9.1	0.0	4.2	[1.9, 6.6]	0.17	[0.02, 0.31]	3		
Nørhald	3427	50	10	77	150	0.0	0.0	4.4	[2.3, 6.6]	0.17	[0.04, 0.30]	3		
Ebeltoft	5217	70	9	80	270	22.2	0.0	4.6	[2.7, 6.5]	0.18	[0.07, 0.27]	3		
Hørning	2543	25	12	76	160	0.0	0.0	5.5	[2.8, 8.4]	0.26	[0.05, 0.47]	3		
Århus	50335	5	18	73	290	11.1	0.0	5.8	[3.1, 8.5]	0.31	[0.07, 0.54]	3		
Hammel	3663	3	8	81	180	0.0	0.0	6.7	[2.8, 10]	0.30	[0.00, 0.73]	3		
Hinnerup	3528	10	9	82	160	0.0	0.0	6.8	[3.2, 11]	0.33	[0.03, 0.61]	3		
Randers	12292	40	12	92	160	0.0	0.0	7.5	[4.5, 10]	0.42	[0.18, 0.65]	3		
Amtsværdi (vægtet)	160483	-	286	64	290	5.1	0.0	4.1	[3.2, 5.0]	0.19	[0.10, 0.27]	3		
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3		

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

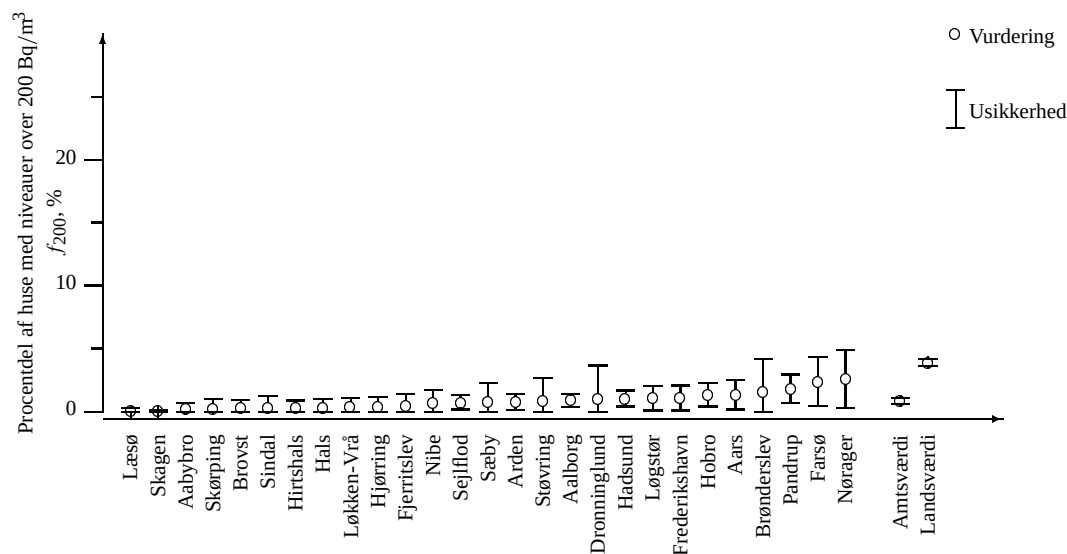
Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Viborg Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger					Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	f ₂₀₀ %	f ₄₀₀ %	f ₂₀₀		f ₄₀₀		
										%	%	
Fjends	3084	75	8	31	80	0.0	0.0	0.3	[0.0, 1.1]	0.00	[0.00, 0.01]	0
Hanstholm	2458	97	10	42	110	0.0	0.0	0.5	[0.1, 1.0]	0.01	[0.00, 0.02]	1
Sallingsund	2389	40	7	40	70	0.0	0.0	0.8	[0.0, 2.8]	0.01	[0.00, 0.07]	1
Karup	2555	100	10	49	80	0.0	0.0	0.8	[0.2, 1.4]	0.01	[0.00, 0.03]	1
Kjellerup	5151	40	12	45	100	0.0	0.0	1.2	[0.1, 2.3]	0.03	[0.00, 0.10]	2
Skive	8201	75	10	52	120	0.0	0.0	1.3	[0.4, 2.2]	0.03	[0.00, 0.07]	2
Møldrup	2984	25	10	48	90	0.0	0.0	1.6	[0.1, 3.0]	0.04	[0.00, 0.15]	2
Hvorslev	2725	60	7	57	150	0.0	0.0	1.7	[0.3, 3.1]	0.03	[0.00, 0.09]	2
Bjerringbro	4969	40	11	54	180	0.0	0.0	2.1	[0.6, 3.5]	0.06	[0.00, 0.15]	2
Sydthy	4979	25	9	56	200	11.1	0.0	2.6	[0.5, 4.6]	0.07	[0.00, 0.25]	2
Morsø	9339	10	9	54	120	0.0	0.0	2.7	[0.3, 5.1]	0.08	[0.00, 0.31]	2
Sundsøre	2914	20	7	59	150	0.0	0.0	2.9	[0.3, 5.3]	0.07	[0.00, 0.27]	2
Aalestrup	2902	5	6	62	100	0.0	0.0	3.5	[0.2, 6.8]	0.07	[0.00, 0.39]	3
Spøttrup	3172	20	5	71	130	0.0	0.0	3.6	[0.6, 6.6]	0.05	[0.00, 0.25]	3
Tjele	3284	50	9	70	570	11.1	11.1	3.7	[1.6, 5.7]	0.12	[0.01, 0.22]	3
Viborg	10427	50	12	73	180	0.0	0.0	4.3	[2.2, 6.5]	0.18	[0.05, 0.31]	3
Thisted	8562	40	9	77	290	22.2	0.0	4.6	[2.1, 7.1]	0.18	[0.02, 0.32]	3
Amtsværdi (vægtet)	80095	-	151	57	570	3.5	0.5	2.6	[1.9, 3.2]	0.08	[0.03, 0.12]	2
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3

Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

Landsdækkende undersøgelse af radon i Danmark
Hovedresultater for enfamiliehuse i **Nordjyllands Amt**



Kommunenavn	Antal enfamilie- huse	Forekomst sand & grus %	Målinger						Vurderinger (model)				Klas- se
			Antal huse	Middel Bq/m ³	Max Bq/m ³	<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %	<i>f</i> ₂₀₀		<i>f</i> ₄₀₀			
								%		%			
Læsø	1177	100	6	18	120	0.0	0.0	0.0	[0.0, 0.3]	0.00	[0.00, 0.01]	0	
Skagen	5274	100	5	8	10	0.0	0.0	0.0	[0.0, 0.1]	0.00	[0.00, 0.01]	0	
Aabybro	4137	90	10	29	100	0.0	0.0	0.2	[0.0, 0.7]	0.00	[0.00, 0.01]	0	
Skørping	3732	75	8	30	60	0.0	0.0	0.2	[0.0, 1.0]	0.00	[0.00, 0.01]	0	
Brovst	3411	75	9	31	60	0.0	0.0	0.3	[0.0, 0.9]	0.00	[0.00, 0.01]	0	
Sindal	3742	40	11	27	40	0.0	0.0	0.3	[0.0, 1.2]	0.00	[0.00, 0.03]	0	
Hirtshals	5318	80	11	30	70	0.0	0.0	0.3	[0.0, 0.9]	0.00	[0.00, 0.02]	0	
Hals	4167	70	11	29	110	0.0	0.0	0.3	[0.0, 1.0]	0.00	[0.00, 0.02]	0	
Løkken-Vrå	3694	70	12	32	160	0.0	0.0	0.4	[0.0, 1.1]	0.01	[0.00, 0.02]	1	
Hjørring	10125	80	9	35	180	0.0	0.0	0.4	[0.0, 1.2]	0.00	[0.00, 0.02]	1	
Fjerritslev	3448	70	9	34	90	0.0	0.0	0.5	[0.0, 1.4]	0.00	[0.00, 0.03]	1	
Nibe	2824	70	10	40	140	0.0	0.0	0.7	[0.0, 1.7]	0.01	[0.00, 0.04]	1	
Sejlfjord	3461	95	9	47	150	0.0	0.0	0.7	[0.2, 1.3]	0.01	[0.00, 0.03]	1	
Sæby	6864	50	9	39	90	0.0	0.0	0.8	[0.0, 2.3]	0.01	[0.00, 0.06]	1	
Arden	3264	90	7	50	100	0.0	0.0	0.8	[0.1, 1.4]	0.01	[0.00, 0.02]	1	
Støvring	4443	50	7	42	80	0.0	0.0	0.8	[0.0, 2.7]	0.01	[0.00, 0.06]	1	
Aalborg	34567	75	21	43	100	0.0	0.0	0.9	[0.4, 1.4]	0.02	[0.00, 0.04]	1	
Dronninglund	5975	30	7	38	100	0.0	0.0	1.0	[0.0, 3.6]	0.01	[0.00, 0.10]	1	
Hadsund	3889	95	12	50	140	0.0	0.0	1.0	[0.4, 1.7]	0.02	[0.00, 0.04]	2	
Løgstør	3977	40	12	42	140	0.0	0.0	1.1	[0.1, 2.0]	0.02	[0.00, 0.09]	2	
Frederikshavn	11016	50	11	43	250	9.1	0.0	1.1	[0.1, 2.1]	0.02	[0.00, 0.08]	2	
Hobro	4614	75	9	52	150	0.0	0.0	1.3	[0.4, 2.3]	0.02	[0.00, 0.06]	2	
Aars	4893	50	9	50	100	0.0	0.0	1.4	[0.2, 2.5]	0.03	[0.00, 0.09]	2	
Brønderslev	7179	25	9	46	100	0.0	0.0	1.6	[0.0, 4.2]	0.03	[0.00, 0.15]	2	
Pandrup	4500	80	9	61	190	0.0	0.0	1.8	[0.7, 2.9]	0.04	[0.00, 0.08]	2	
Farsø	3224	20	11	54	120	0.0	0.0	2.4	[0.5, 4.3]	0.07	[0.00, 0.24]	2	
Nørager	2246	20	8	57	130	0.0	0.0	2.6	[0.3, 4.9]	0.07	[0.00, 0.26]	2	
Amtsværdi (vægtet)	155161	-	261	38	250	0.6	0.0	0.8	[0.6, 1.1]	0.02	[0.00, 0.03]	1	
Landsværdi (vægtet)	1412456	-	3019	58	590	4.6	0.4	3.9	[3.6, 4.2]	0.21	[0.18, 0.24]	3	
Middel = Geometrisk middelværdi (GM)													

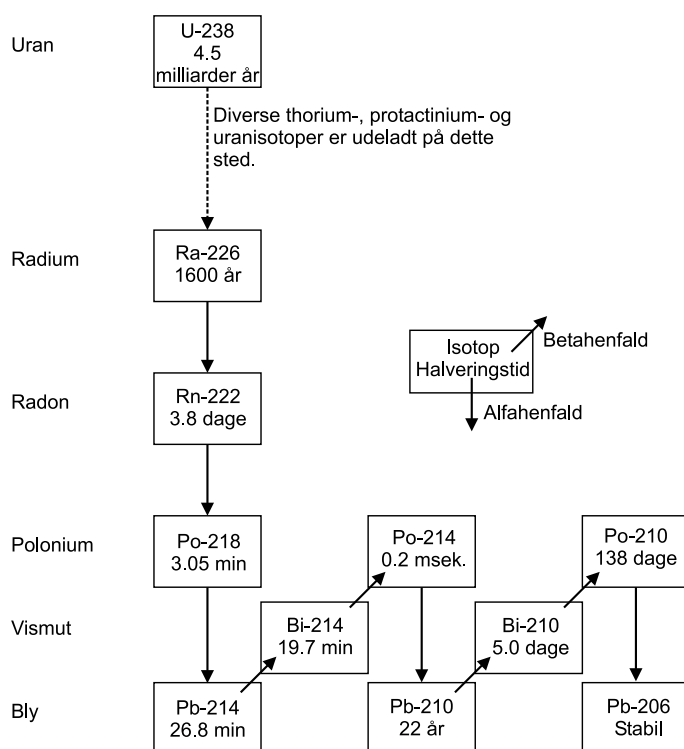
Middel = Geometrisk middelværdi (GM)

K Ordliste vedr. radon og statistik

K.1 Radon

Bq/m³ Koncentrationen af radon i et givet rum angives i denne rapport i enheden Bq/m³: Becquerel pr. kubikmeter. 1 Becquerel svarer til en henfaldsrate på ét atom pr. sekund. En typisk koncentration for radon i indeluft er 50 Bq/m³. Dette svarer således til, at der henfalder 50 radonatomer pr. sekund pr. kubikmeter luft. Radon er altid kun til stede i indeluften på sporstofniveau. Ved 50 Bq/m³ er kun ét ud af 10¹⁸ molekyler et radonatom.

Radon Radon (Rn) er betegnelsen for grundstof nummer 86. Radon er en ædelgas og indgår således ikke under normale forhold i kemiske forbindelser. Der kendes mere end 20 forskellige radonisotoper. Disse er alle ustabile dvs. radioaktive. Halveringstiden for Rn-222 er 3.8 dage. Fra et strålingsmæssigt synspunkt er Rn-222 den vigtigste radonisotop, mens Rn-220 er den næstvigtigste. I mange sammenhænge (incl. denne rapport) benyttes betegnelsen *radon* for isotopen Rn-222. Rn-222 forekommer naturligt og tilhører den såkaldte urankæde startende med U-238 (se Figur K.1).



Figur K.1. Uddrag af henfaldsskemaet for uran-238. Det ses, at radon-222 dannes direkte fra radium-226. Henfaldsprodukterne fra radon-222 (forskellige polonium-, vismut- og blyisotoper) kaldes for radondøtre.

K.2 Statistiske begreber

Aritmetisk middelværdi og standardafvigelse Givet N måleresultater: $x_1, x_2 \dots x_N$, da beregnes den aritmetiske middelværdi AM som:

$$AM = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (K.1)$$

og den aritmetiske standardafvigelse som:

$$AS = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - AM)^2} \quad (K.2)$$

Geometrisk middelværdi og standardafvigelse Givet N måleresultater (alle større end 0): $x_1, x_2 \dots x_N$, da beregnes den geometriske middelværdi GM som:

$$GM = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x_i)\right) \quad (K.3)$$

og den geometriske standardafvigelse som:

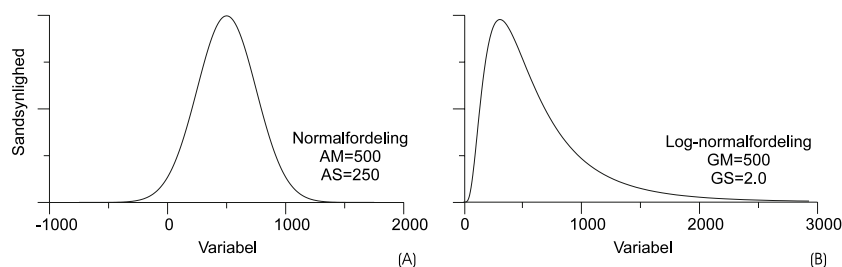
$$GS = \exp\left(\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(x_i) - \ln(GM))^2}\right) \quad (K.4)$$

Bemærk, at GM har samme enhed som x , mens GS altid er dimensionsløs.

Livstidsrisiko Livstidsrisikoen i forbindelse med radon udtrykker, at dersom en person lever omkring 70 år i et hus med en radonkoncentration på 50 Bq/m^3 , da vil risikoen for at vedkommende dør som følge af radon være omkring 0.4 %.

Logaritmisk normalfordeling Den logaritmiske normalfordeling er betegnelsen for en bestemt statistisk fordelingsfunktion. Hvis den stokastiske variabel X følger en logaritmisk normalfordelingsfunktion, betyder det, at den stokastiske variabel $Y = \log(X)$ kan beskrives ved en normalfordelingsfunktion. Figur K.2(B) viser et eksempel. Bemærk, at fordelingen ikke er symmetrisk omkring middelværdien, og at X ikke kan antage negative værdier.

Normalfordeling Normalfordelingen er betegnelsen for en bestemt statistisk fordelingsfunktion. Figur K.2(A) viser et eksempel. Fordelingsfunktionen er altid symmetrisk omkring middelværdien.



Figur K.2. (A) viser et eksempel på en variabel, som følger en normalfordeling svarende til en aritmetisk middelværdi (AM) og standardafvigelse (AS) lig hhv. 500 og 250. Det vil sige, at hovedparten af fordelingen ligger mellem 250 ($=AM-AS$) og 750 ($=AM+AS$). (B) viser et eksempel på en variabel, som følger en logaritmisk normalfordeling svarende til en geometrisk middelværdi (GM) og standardafvigelse (GS) lig hhv. 500 og 2.0. Det vil sige, at hovedparten af fordelingen ligger mellem 250 ($=GM/GS$) og 1000 ($=GM \cdot GS$).

Litteratur

- [A92] Andersen, C.E.: Entry of soil gas and radon into houses. Forskningscenter Risø, Risø-R-623(En). 86 sider, 1992.
- [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 er tilgængelig på elektronisk form på www.risoe.dk.
- [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 er tilgængelig på elektronisk form på www.risoe.dk.
- [A99b] Andersen, C.E., Ulbak, K., Damkjær, A., Kirkegaard, P. og Gravesen, P.: Mapping indoor radon-222 in Denmark: Design and test of the statistical model used in the second nation-wide survey. Presented at *Radon in the Living Environment, Athens, April 1999*.
- [A99c] Andersen, C.E.: Numerical modelling of radon-222 entry into houses: An outline of techniques and results. Presented at *Radon in the Living Environment, Athens, April 1999*.
- [A99d] 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.
- [Ar95] Arvela, H.: Seasonal variation in radon concentration of 3000 dwellings with model comparisons. *Radiation Protection Dosimetry*, 59(1), 33–42, 1995.
- [B87] Byggestyrelsen (Statens Byggeforskningsinstitut): Radon i boliger. Pjece, 1987.
- [B88] Byggestyrelsen: Radon og nybyggeri. Pjece. (1. udgave: 1988) (2. udgave: 1993).
- [B93] Bygge- og Boligstyrelsen: Undersøgelse af lufttæthed i bygningskonstruktioner. Pjece, 1993.
- [B97] Bygge- og Boligstyrelsen: Radon i enfamiliehuse. Pjece, 1997.
- [Bo98] Bolig- og Byministeriet: Byggereglement for småhuse. 1998.
- [C93] Cleveland, W.S.: Visualizing data. Hobart Press, 1993.
- [Co77] Cochran, W.G.: Sampling techniques. John Wiley & Sons, 1977.
- [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.

- [D89] Damkjær, A. og Korsbech, U.: A search for correlation between local geology and indoor radon concentration. *Radiation Protection Dosimetry*, 24(1/4), 51–54, 1988.
- [Da95] Danmarks Statistik: Statistisk Årbog 1995.
- [E84] Engell-Jensen, M., Korsbech, U. og Madsen, F.E.: U, Th and K in upper Cretaceous and Tertiary sediments in Denmark. *Bull. geol. Soc. Denmark*, 32, 107–120, 1984.
- [G00] Gerken, M., Kreienbrock, L., Wellmann, J., Kreuzer, M. og Wichmann, H.E.: Models for retrospective quantification of indoor radon exposure in case-control studies. *Health Physics*, 78(3), 268–278, 2000.
- [Gr84] Gravesen, P. og Fredericia, J.: ZEUS-geodatabasesystem. Borearkivet. Databeskrivelse, kodesystem og sideregistre. *Danm. Geol. Unders.*, Ser. C, nr. 3, 259 sider, 1984.
- [Gr93] Gravesen, P.: Geologisk kort over Danmark. 1:50.000. Kortbladet 1115 III Ulfborg. Geologisk Basisdatakort. *Danm. Geol. Unders. Kortserie* nr. 25, 5 sider, 1993.
- [Gr96] Gravesen, P., Jakobsen, P.R. og Kelstrup, N.: Radon i danske jordarter II. Undersøgelser og konklusioner. *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 1996/78*, 113 sider + Bilagsbind, 1996.
- [Gr97] Gravesen, P.: “Vinduer” og sprækker i jorden og grundvandsbeskyttelse. *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS). Årsberetning og virksomhedsregnskab for 1996*, side 75–81, 1997.
- [Gr99] Gravesen, P., Jakobsen, P.R., Kelstrup, N. og Ernsten, V.: Kortlægning af radon i danske jordarter 1. *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 1999/81*, 1999.
- [Gu92] Gundby, J.A., Darby, S.C., Miles, J.C.H., Green, B.M.R. og Cox, D.R.: Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. *Health Physics*, 64(1), 2–12, 1993.
- [H52] Hald, A.: Statistical theory with engineering applications. John Wiley & Sons, New York, 1952.
- [Ha96] Hardcastle G.D. og Miles, J.C.H.: Ageing and fading of alpha particle tracks in CR-39 exposed to air. *Radiation Protection Dosimetry*, 67, 4, 295–298, 1996.
- [He98] Hermansen, B. og Jakobsen, P.R.: Danmarks digitale jordartskort 1:25.000. CD-ROM Version 1.0. *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 1998/79*, 1998.
- [He99] Hermansen, B., Pedersen, S.A.S. og Bjerregaard, C.: Digitalt kort over Danmarks jordarter 1:200 000. CD-ROM Version 1.0. *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 1999/47*, 1999.
- [Ho97] Hoff, A.: Radon transport in fractured soil: Laboratory experiments and modelling. *Forskningscenter Risø, Risø-R-975(En)*. 150 sider, 1997.
- [J76] Jonassen, N. og McLaughlin, J.P.: Radon in Indoor air I & II. Research report 6 & 7. Internal report, Laboratory of Applied Physics I, Technical University of Denmark, Lyngby, 1976.

- [J80] Jonassen, N. og McLaughlin, J.P.: Exhalation of radon-222 from building materials and walls. I: Gesell, T.F. og Lowder, W.M. (eds.): *Natural Radiation Environment III*, US department of Energy, CONF-780422, 1211–1224, 1980.
- [K85] Korsbech, U.: Radon exhalation from samples of Danish soils, subsoils and sedimentary rocks. Department of Electrophysics. The Technical University of Denmark, 22 sider, 1985.
- [L67] Lilliefors, H.W.: On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *American Statistical Association Journal*, 399–403, 1967.
- [M88] Majborn, B., Sørensen, A., Nielsen, S.P. og Bøtter-Jensen, L.: An investigation of factors influencing indoor radon concentrations. Forskningscenter Risø, Risø-M-2689, 56 sider, 1988.
- [M92] Majborn, B.: Seasonal variations of radon concentrations in single-family houses with different sub-structures. *Radiation Protection Dosimetry*, 45(1/4), 443–449, 1992.
- [Ma97] Manly, B.F.J.: Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology. Second ed., Chapman & Hall, 1997.
- [Mat00] Mathsoft (Data Analysis Products Division): S-plus 2000 user's guide, 2000.
- [Mi94] Miles, J.C.H.: Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level. *Radiation Protection Dosimetry*, 56(1–4), 207–210, 1994.
- [Mä90] Mäkeläinen, I., Voutilainen, A. og Castrén, O.: Prediction of indoor radon concentration based on residence location and construction. I: F.T. Cross (ed.): *Twenty-Ninth Hanford Symposium on Health and the Environment: Indoor radon and lung cancer: Reality or myth? Part 1*, p. 55–62, Battelle Press, 1990.
- [Mä98] Mäkeläinen, I., Arvela, H. og Voutilainen A.: The effects of indoor gamma dose rate, permeability of soil, substructure, and ventilation on indoor radon concentration. I: I. Barnet, M. Neznal (eds.): *Radon investigations in the Czech Republic 7; 4. International workshop on the geological aspects of radon risk mapping*, Prague (CZ), 16–20 Sep. 1998. Czech Geological Survey, Prague, p. 67–75, 1998.
- [Pe89] Pedersen, S.A.S., Petersen, K.S., Salinas, I. og Rasmussen, L.Aa.: Jordartskort over Danmark, 1:200.000. Danmarks Geologiske Undersøgelse, Særudgivelse, 4 kort, 1989.
- [Pe95] Pedersen, S.A.S. og Petersen, K.S.: Geologisk kort over Danmark, 1:50.000. Geologisk kort over Djursland. Danmarks Geologiske Undersøgelse, Kortserie, nr. 51, 7 sider, 1995.
- [Per94] Pershagen, G., Åkerblom, G., Axelson, O., Clavensjö, B., Damber, L., Desai, G., Enflo, A., Lagarde, F., Mellander, H., Svartengren, M. og Swedjemark, G.A.: Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. *The New England Journal of Medicine*, 330(3), 159–164, 1994.
- [Pr95] Price, P.N.: The regression effect as cause of the nonlinear relationship between short- and long-term radon concentration measurements. *Health Physics*, 69(1), 111–114, 1995.

- [Pr96] Price, P.N., Nero, A.V. og Gelman, A.: Bayesian prediction of mean indoor radon concentrations for Minnesota counties. *Health Physics*, 71(6), 922–936, 1996.
- [R00] Radiation protection authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden: Naturally occurring radioactivity in the Nordic countries - Recommendations, 2000.
- [Ro95] Robinson, A.L. og Sextro, R.G.: The influence of a subslab gravel layer and open area on soil-gas and radon entry into two experimental basements. *Health Physics*, 69(3), 367–377, 1995.
- [Rog91] Rogers, V.C. og Nielson, K.K.: Correlations for predicting air permeabilities and ^{222}Rn diffusion coefficients of soil. *Health Physics*, 61(2), 225–230, 1991.
- [S95] Sokal, R.R. og Rohlf, F.J.: *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*, third edition. W.H. Freeman and Company, New York, 1995.
- [St87a] Statens Insititut for Strålehygiejne og Forskningscenter Risø: Naturlig stråling i danske boliger. Sundhedsstyrelsen, 122 sider, 1987.
- [St87b] Statens Insititut for Strålehygiejne: Radon-boliger-strålingsdosis-lungekræftisiko. Sundhedsstyrelsen, 14 sider, 1987.
- [St87c] Statens Insititut for Strålehygiejne: Radioaktive stoffer i drikkevand. Sundhedsstyrelsen, 23 sider, 1987.
- [St96] Statens Institut for Strålehygiejne: Måling af indholdet af naturligt forekommende radioaktive stoffer i bjergartsprøver fra Bornholm. Målt i 1982 og sammenskrevet i juni 1996, 1 side, 1996.
- [Sto98] Stoop, P., Glastra, P., Hiemstra, Y., de Vries, L. og Lembrechts, J.: Results of the second Dutch national survey on radon in dwellings. National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, the Netherlands. Report no. 610058006, 1998.
- [U80] Ulbak, K.: Radioaktive stoffer i danske byggematerialer. Statens Insititut for Strålehygiejne (SIS)(1980).
- [U84] Ulbak, K., Jonassen, N. og Bækmark, K.: Radon exhalation from samples of concrete with different porosities and fly ash additives. *Radiation Protection Dosimetry*, 7(1–4), 45–48, 1984.
- [U88] Ulbak, K., Stenum, B., Sørensen, A., Majborn, B., Bøtter-Jensen, L. og Nielsen, S.P.: Results from the Danish indoor radiation survey. *Radiation Protection Dosimetry*, 24(1/4), 401–405, 1988.
- [UN00] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York, 2000.
- [V94] Verger, P., Hubert, P., Cheron, S., Bonnefous, S., Bottard, S. og Brenot, J.: Use of field measurements in radon mapping in France. *Radiation Protection Dosimetry*, 56(1–4), 225–229, 1994.

Statens Institut for Strålehygiejne

Knapholm 7
2730 Herlev
Tlf.: 44 54 34 54
Fax: 44 54 34 50
E-mail: sis@sis.dk
Hjemmeside: www.sis.dk

Forskningscenter Risø

Frederiksborgvej 399
4000 Roskilde
Tlf.: 46 77 46 77
Fax: 46 77 40 13
E-mail: risoe@risoe.dk
Hjemmeside: www.risoe.dk

**Danmarks og Grønlands
Geologiske Undersøgelse**

Thorasvej 8
2400 København NV
Tlf.: 38 14 20 00
Fax: 38 14 20 50
E-mail: geus@geus.dk
Hjemmeside: www.geus.dk

Kommunekortet viser hvor mange procent af de enkelte kommuners enfamiliehuse, som vurderes at have en radonkoncentration over 200 Bq/m³. Kommunerne er inddelt i fem klasser med tilhørende farve på følgende måde:

Farve	Andel over 200 Bq/m ³	Klasse
	10 - 30%	4
	3 - 10%	3
	1 - 3%	2
	0,3 - 1%	1
	0 - 0,3%	0