

Radon-95: En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse

Andersen, Claus E.; Bergsøe, N.C.; Brendstrup, J.; Damkjær, A.; Gravesen, P.; Ulbak, K.

Publication date:
1997

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Andersen, C. E., Bergsøe, N. C., Brendstrup, J., Damkjær, A., Gravesen, P., & Ulbak, K. (1997). Radon-95: En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse. (Denmark. Forskningscenter Risøe. Risøe-R; Nr. 979(DA)).

DTU Library

Technical Information Center of Denmark

General rights

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

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

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

Radon-95:

En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse

Claus E. Andersen

Niels C. Bergsøe

Jens Brendstrup

Anders Damkjær

Peter Gravesen

Kaare Ulbak

Udarbejdet for
Bygge- og Boligstyrelsen og
Statens Institut for Strålehygiejne

Forskningscenter Risø, Roskilde
April 1997

RISØ

SBI

COWI



GEUS

Statens Sundhedsstyrelsen
Statens Institut for Strålehygiejne

Resumé Projektet Radon-95 er den første større danske undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationen i rumluften i eksisterende enfamiliehuse. I projektets indledende fase blev der foretaget målinger i 270 huse placeret i områder med hhv. moræneler, opsprækket granit og opsprækket kalk. Undersøgelsen bekræftede, at disse områder har et forhøjet indendørs radonpotentiale i forhold til Danmark som helhed. I 21 udvalgte huse med årsmidlede radonkoncentrationer i intervallet 200–1000 Bq m⁻³ blev der gennemført tiltag til reduktion af radonkoncentrationen. Reduktionseffektiviteten af tiltagene blev vurderet ved at sammenligne sporfoliemålinger af radonkoncentrationen i vintrene før og efter tiltagene. Desuden blev der foretaget en korrektion for naturlige vinter-til-vinter variationer på grundlag af tilsvarende radonmålinger i 42 kontrolhuse med årsmidlede radonkoncentrationer i intervallet 100–200 Bq m⁻³. Følgende reduktionsmetoder blev afprøvet (*N* angiver antallet af undersøgte huse, og *R* er den gennemsnitlige reduktionseffektivitet): (1) Aktivt sug under terrændæk (*N*=2; *R*=85 %), (2) Mekanisk ventilation af ubeboede kælderrum og lign. (*N*=4; *R*=51 %), (3) Membrandækning af gulv (*N*=1; *R*=27 %), (4) Passivt sug under terrændæk (*N*=1; *R*=23 %), (5) Opsætning af udeluftventiler mhp. forbedret naturlig ventilation (*N*=13; *R*=11 %). Tiltagene (1) til (4) blev kombineret med opsætning af udeluftventiler. Undersøgelsen viser, at aktive reduktionsmetoder har en god effekt, mens de passive metoder er mindre effektive. Rapporten indeholder supplerende målinger af luftskifter (PFT-metoden) før og efter afværgning, radonkoncentrationer i brugsvand og jordluft, og kontinuerte radonmålinger i udvalgte huse.

Claus E. Andersen^{1,a}, Niels C. Bergsøe^{2,b}, Jens Brendstrup^{3,c}, Anders Damkjær^{1,d}, Peter Gravesen^{4,e} og Kaare Ulbak^{5,f}

Rapporten er udarbejdet for Bygge- og Boligstyrelsen⁶ og Statens Institut for Strålehygiejne af Forskningscenter Risø, Statens Byggeforskningsinstitut, COWI Rådgivende Ingeniører AS, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse og Statens Institut for Strålehygiejne.

¹Forskningscenter Risø, Afdelingen for Nuklear Sikkerhedsforskning og Nukleare Anlæg, Bygn. 125, DK-4000 Roskilde. Tlf. 4677 4677. Fax 4675 3533. Internet: <http://www.risoe.dk/nuk/>

²Statens Byggeforskningsinstitut, Afdelingen for Energi og Indeklima, Dr. Neergaardsvej 15, DK-2970 Hørsholm. Tlf. 4286 5533. Fax 4286 7535. Internet: <http://www.sbi.dk/>

³COWI Rådgivende Ingeniører AS, Afdelingen for Bygningsrenovering, Parallelvej 15, DK-2800 Lyngby. Tlf. 4597 2211. Fax 4597 2212. Internet: <http://www.cowi.dk/>

⁴Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Thoravej 8, DK-2400 København NV. Tlf. 3814 2000. Fax 3814 2050. Internet: <http://www.geus.dk/>

⁵Statens Institut for Strålehygiejne, Fredrikssundsvej 378, DK-2700 Brønshøj. Tlf. 4488 9119. Fax 4453 2773.

⁶Bygge- og Boligstyrelsen, 4. kontor, Stormgade 10, DK-1470 København K. Tlf. 3392 6100. Fax 3392 6164.

E-post adresser:

^a<claus.andersen@risoe.dk>, ^b<ncb@sbi.dk>, ^c<jbr@cowi.dk>, ^d<a.damkjaer@risoe.dk>, ^e<pg@geus.dk> og ^f<kaare.ulbak@sis.dk>.

ISBN 87-550-2297-9

ISSN 0106-2840

Afdelingen for Informationsservice · Risø · 1997

Indhold

Forord	1
1 Sammenfatning	2
2 Introduktion	6
3 Materialer og metoder	8
3.1 Valg af huse	8
3.2 Byggetekniske analyser	10
3.3 Radonmålinger	10
3.4 Ventilationsmålinger	12
3.5 Supplerende data og undersøgelser	14
3.6 Reduktionsforanstaltninger	16
4 Resultater	18
4.1 Gruppeopdeling og huskarakteristika	18
4.2 Radonmålinger	19
4.3 Ventilationsmålinger	30
4.4 Supplerende undersøgelser	32
5 Diskussion	42
5.1 Områdernes radonforhold	42
5.2 Introduktion til diskussionen af reduktionsmetoderne	46
5.3 Udeluftventiler	46
5.4 Mekanisk udsugning i ubeboede kælderrum og lign.	49
5.5 Aktivt sug under terrændæk	52
5.6 Passivt sug under terrændæk	55
5.7 Membrandækning	56
5.8 Undersøgelsens gyldighed og begrænsninger	59
6 Konklusion og anbefalinger	63
Litteratur	64
A Projektjournal	71
B Geologisk udredning	72
C Beregningsprincipper (radon)	78
D Usikkerhedsberegninger (radon)	80
E Husspecifikke data	83
F Notation og ordliste	105

Forord

Radon-95 projektet har haft som formål at undersøge effektiviteten af forskellige metoder til reduktion af radonkoncentrationen i rumluften i eksisterende danske enfamiliehuse.

Rapporten dokumenterer projektets resultater og indeholder en diskussion af en række teknisk-videnskabelige aspekter af de undersøgte reduktionsmetoder. Rapporten er således ikke en praktisk vejledning i hvorledes sådanne tiltag gennemføres, men det er alligevel forfatterens håb, at også praktisk orienterede læsere kan have glæde af rapporten.

Projektplanen blev til i et samarbejde mellem Bygge- og Boligstyrelsen og projektdeltagerne fra december 1993 til planens vedtagelse den 30. august 1994. Projektarbejdet har fundet sted frem til december 1996 og er undervejs blevet overvåget af en følgegruppe bestående af:

- Ove Nielsen, Bygge- og Boligstyrelsen
- Kaare Ulbak, Statens Institut for Strålehygiejne (SIS)
- Benny Majborn, Forskningscenter Risø
- Anders Damkjær, Forskningscenter Risø
- Claus E. Andersen, Forskningscenter Risø
- Erik Christophersen, Statens Byggeforskningsinstitut (SBI)
- Niels C. Bergsøe, Statens Byggeforskningsinstitut (SBI)
- Torben Bruun Hansen, COWI Rådgivende Ingeniører AS
- Jens Brendstrup, COWI Rådgivende Ingeniører AS
- Peter Gravesen, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS)

Ved projektets start blev der nedsat en arbejdsgruppe med ansvar for projektets gennemførelse. Arbejdsgruppen har bestået af Anders Damkjær (projektledelse og radonmålinger), Claus E. Andersen (supplerende undersøgelser og dataanalyse), Niels C. Bergsøe (ventilationsmålinger) og Jens Brendstrup (byggeteknik og reduktionsindgreb). Kaare Ulbak har bistået arbejdsgruppen bl.a. med kommunikationen med beboerne og kommunerne, medens Peter Gravesen har udarbejdet det geologiske grundlag for projektet.

Den foreliggende rapport er arbejdsgruppens afsluttende rapport.

Arbejdsgruppen vil gerne takke Bygge- og Boligstyrelsen og Statens Institut for Strålehygiejne for den finansielle støtte til projektet. Arbejdsgruppen ønsker ligeledes at takke de tekniske forvaltninger i Ramsø, Allinge-Gudhjem og Thisted kommuner for deres imødekommenhed og aktive støtte. Sidst, men ikke mindst, ønsker arbejdsgruppen at takke de mange husejere, som har stillet deres bolig til rådighed for projektet. Uden beboernes beredvillige og tålmodige medvirken ville projektet ikke have været muligt.

*Arbejdsgruppen
April 1997*

1 Sammenfatning

Introduktion

*Lungekræft*risiko

Det største enkeltbidrag til den strålingsdosis, den danske befolkning modtager, skyldes indånding af luftbårne radioaktive partikler. Disse partikler er henfaldsprodukter fra den radioaktive gas radon. Partiklerne (forskellige polonium-, vismut- og blyisotoper) sætter sig i luftveje og lunger, og den deraf følgende bestråling menes at forhøje risikoen for at udvikle lungekræft. Det vurderes, at der i Danmark er omkring 300 personer om året, som udvikler lungekræft på grund af radon.

Formålet med projektet har været at undersøge metoder til at mindske radonkoncentrationen dér, hvor danskere generelt modtager det største dosisbidrag; nemlig i almindelige enfamiliehuse.

*Reduktions*principper

En lille del af det naturlige luftskifte i et hus kan tilskrives indtrængning af luft fra jorden under huset. Da jordluftens radonkoncentration er meget høj, typisk 1000 til 10 000 gange så stor som udeluftens koncentration, er denne luftstrøm imidlertid afgørende for hvor meget radon, der tilføres huset. Det bedste udgangspunkt for at sikre en lav radonkoncentration i et hus er derfor

- at hindre indtrængning af jordluft til huset.

Ved nybyggeri kræves det således, at huset skal være lufttæt mod jorden. Hvis man ikke kan forhindre indtrængningen, kan man forsøge at holde koncentrationen nede ved

- at opretholde en god ventilation i huset.

Tilførsel af udeluft vil fortynde husets radonkoncentration, da udeluftens radonkoncentration er lav. En sidste mulighed er, at man vha. forskellige former for filtrering og/eller luftrensning forsøger

- at fjerne radon (og radon's henfaldsprodukter) fra indeluften.

Den sidstnævnte metode anses dog ikke for egnet til anvendelse i det almindelige boligmiljø, og den behandles derfor ikke i denne rapport.

I Sverige, Storbritannien, USA og en række andre lande er der igennem de sidste 10–15 år udført et omfattende arbejde med at udvikle metoder til at reducere radonkoncentrationen i det indendørs miljø. Danmark har indirekte deltaget i dette arbejde via forskellige internationale forskningsprojekter. Det foreliggende projekt er imidlertid den første større danske undersøgelse af metoder til at nedbringe radonkoncentrationen i eksisterende danske enfamiliehuse.

*Mål*gruppe

De undersøgte metoder retter sig primært mod enfamiliehuse med høje radon-niveauer, hvilket i denne undersøgelse er huse, som har en årsmidlet radonkoncentration på mere end 200 Bq m^{-3} . På baggrund af en landsdækkende undersøgelse af stråling i danske boliger, som blev gennemført i 1985–86, kan det beregnes, at der i Danmark findes omkring 40 000 boliger i den kategori.

Rapporten dokumenterer projektets resultater og indeholder en diskussion af en række teknisk-videnskabelige aspekter af de undersøgte reduktionsmetoder. Rapporten er således ikke en praktisk vejledning i, hvorledes disse tiltag bedst gennemføres.

Materialer og metoder

Valg af områder

Projektets første opgave var at identificere huse, hvor det kunne retfærdiggøres at forsøge at reducere den indendørs radonkoncentration. Radonkoncentrationen i et hus bestemmes primært af geologiske forhold såsom jordens radiumkoncentration og transportegenskaber. Fra tidligere undersøgelser er det kendt, at geologierne:

moræneler, opsprækket granit og opsprækket kalk ofte har et højt indendørs radonpotentiale. Tre områder med sådanne geologier blev derfor udvalgt for nærmere undersøgelse i hhv. Ramsø Kommune på Sjælland, Allinge-Gudhjem Kommune på Bornholm og Thisted Kommune i Jylland. Efter et udtræk fra Bygge- og Boligregistret (BBR) blev der rettet henvendelse til tilfældigt udvalgte beboere i de valgte villakvarterer i områderne. Beboerne blev anmodet om at medvirke i en indledende kortlægningsundersøgelse.

I vinteren 1994–95 blev der gennemført radonmålinger i 270 huse, og husene blev på det grundlag inddelt i tre grupper efter radonkoncentration: en reduktionsgruppe på 21 huse med radonkoncentrationer over 200 Bq m^{-3} , en kontrolgruppe på 42 huse med radonkoncentrationer i intervallet 100 til 200 Bq m^{-3} , og en restgruppe bestående af huse med radonkoncentrationer under 140 Bq m^{-3} . Det angivne antal af huse svarer til dem, som rent faktisk gennemførte undersøgelsen, og de angivne radonkoncentrationer er vurderede årsmiddelværdier.

I foråret 1995 blev der foretaget en opfølgende måling af radonkoncentrationerne i reduktions- og kontrolgrupperne. Formålet med denne måling var at danne grundlag for en mere nøjagtig vurdering af husenes årsmiddelværdier. For husene i reduktionsgruppen blev der samtidig foretaget byggetekniske analyser på baggrund af husbesøg og hustegninger fra de tekniske forvaltninger i kommunerne. Desuden blev der foretaget luftskiftmålinger i husene i reduktionsgruppen. På dette grundlag blev der i sommeren 1995 udarbejdet forslag til, hvorledes radonkoncentrationen i de enkelte huse i reduktionsgruppen kunne reduceres. Valget af forslag til reduktionsforanstaltning skete ud fra en vurdering af hvilken metode, det for det enkelte hus ville være mest hensigtsmæssig at anvende under hensyntagen til byggetekniske, økonomiske og radonmæssige forhold. Eksempelvis blev de dyreste metoder eller de metoder, som kunne tænkes at påføre beboerne visse gener (f.eks. støj), kun foreslået i de tilfælde, hvor radonniveauet efter arbejdsgruppens vurdering kunne retfærdiggøre sådanne tiltag.

Beboerne i reduktionsgruppens huse fik derefter et skriftligt tilbud om omkostningsfrit at få installeret det foreslåede reduktionstiltag som et led i projektet. Samtidig blev det pointeret, at det ikke kunne garanteres, at den anviste foranstaltning rent faktisk ville reducere radonkoncentrationen. Med enkelte undtagelser accepterede alle beboerne tilbuddet, og i efteråret/vinteren 1995 blev foranstaltningerne installeret i 21 huse. I kontrolgruppen blev der ikke inden for projektet gjort tiltag til reduktion af radonkoncentrationen.

For at vurdere metodernes effektivitet blev der foretaget en ny måling af radonkoncentrationen i husene i vinteren 1995–96, således at der for det enkelte hus kunne foretages en sammenligning af vinterradonkoncentrationen før og efter tiltaget. Målingen blev gennemført både i reduktions- og kontrolgruppen. Vinteren 1995–96 var meget kold i forhold til vinteren året før. Da tidligere undersøgelser har vist, at den indendørs radonkoncentration i stor udstrækning afhænger af temperaturforskellen mellem udendørs- og indendørsluften, er det ønskeligt at korrigere for naturlige variationer mellem perioderne. I denne undersøgelse kunne en sådan korrektion foretages på grundlag af de 42 huse i kontrolgruppen, hvor der ikke blev gennemført tiltag til reduktion af radonniveauet. En sammenligning af målingerne i kontrolgruppen viste, at radonkoncentrationen i gennemsnit var 15 % højere i vinteren 1995–96 i forhold til vinteren før. Når det i det følgende angives, at reduktionseffektiviteten for et givet tiltag eksempelvis blev bestemt til at være 10 %, betyder det, at under hensyntagen til naturlige variationer vurderes det, at metoden reducerede radonkoncentrationen i huset med 10 %. Disse vurderinger er forbundet med stor usikkerhed. Den primære kilde til usikkerhed er, at radonniveauet i huserne er meget variabelt, og at det i sagens natur er uvist, hvad radonniveauet ville have været i husene i reduktionsgruppen i vinteren 1995–96, dersom tiltagene ikke var gennemført.

Gruppeopdeling

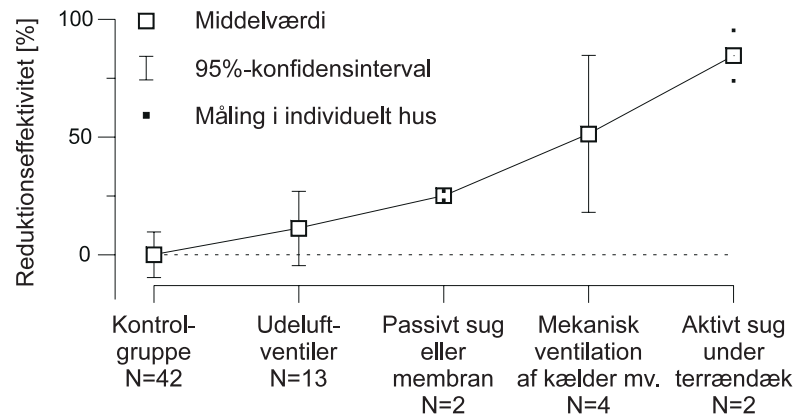
Valg af reduktionsmetoder

*Bestemmelse af
reduktionseffektiviteten*

Reduktionsmetoder

De afprøvede reduktionsmetoder kan opdeles efter, om de har haft til formål at hindre indtrængning af radon til huset (eller dets beboelsesdel), eller om de har haft til formål at forbedre husets ventilation. En anden måde at anskue metoderne på er, om de kræver brug af mekaniske ventilatorer eller ej, og metoderne kan derfor også opdeles efter, om de er aktive eller passive.

I det følgende gennemgås de enkelte metoder, og der gives et resume af undersøgelsens resultater. For hver metode anføres bl.a. den observerede reduktionseffektivitet. Figur 1 sammenfatter reduktionseffektiviteterne for de enkelte typer af tiltag ordnet efter stigende grad af effektivitet.



Figur 1. Gennemsnitlige reduktionseffektiviteter for de undersøgte grupper af tiltag. N er antallet af huse i hver gruppe. 95 %-konfidensintervallet for gruppemiddelværdien er anført for de grupper, som indeholder mere end to huse.

Aktivt sug under terrændæk

Dette er undersøgelsens mest effektive metode. Den blev afprøvet i to huse, og i overensstemmelse med erfaringer i udlandet blev reduktionseffektiviteten bestemt til at være omkring 85 %. Metoden har til formål at hindre indtrængning af jordluft til huset. Dette gøres ved at frembringe et undertryk i det kapillarbrydende gruslag under husets terrændæk i forhold husets rumluft således, at der strømmer luft fra hus mod jord. Undertrykket tilvejebringes vha. en kanalventilator som f.eks. placeres på husets loft. Der etableres rør fra ventilatoren til et eller flere sugpunkter under terrændækket. Metoden er enkel og effektiv, men relativ dyr. I Danmark vurderes det, at anskaffelsesomkostningerne er 30 000–40 000 kr. udført af håndværkere. Metoden kan give anledning til støj i huset.

Passivt sug under terrændæk

For at spare udgifterne til kanalventilatoren (både til anskaffelse og drift) og for at minimere muligheden for støjproblemer kan et anlæg af ovennævnte type udformes uden ventilator. I dette tilfælde frembringes suget alene af naturlige drivkræfter (temperaturforskelle ude/inde og vindpåvirkning). I denne undersøgelse blev et sådant anlæg installeret i ét hus, og der blev samtidig opsat udeluftventiler. Den vurderede reduktionseffektivitet (af sug og udeluftventiler kombineret) blev bestemt til at være 23 %. I udenlandske undersøgelser rapporteres om typiske reduktionseffektiviteter omkring 60 %. Passive sug er mindre stabile og har en lavere effektivitet end aktive sug. Til gengæld kan metoden, såfremt den ikke giver en tilfredsstillende høj reduktionseffektivitet, modificeres til et aktivt sug ved at supplere anlægget med en kanalventilator.

Membrandækning af gulv En anden passiv metode til at hindre indtrængning af radon til huset er at gøre gulvkonstruktionen lufttæt vha. en membran. Denne metode blev afprøvet i ét hus. Gulve med væg-til-væg tæpper (70 % af beboelsesarealet) blev dækket med hele flader af polyethylen. Membranen, der havde en tykkelse på 0.3 mm, blev skubbet ind under fejelisterne og samlingen mellem liste og membran blev tætnet med elastisk fugemasse. Den resulterende reduktionseffektivitet blev bestemt til at være 27 %, hvoraf en del muligvis kan tilskrives, at der samtidig blev opsat udeluftventiler i opholdsrummene. Undersøgelsen demonstrerer, at det kan være vanskeligt at gøre en gulvkonstruktion lufttæt mod jord. Dette er i overensstemmelse med udenlandske erfaringer. I Storbritannien er det dog dokumenteret, at anvendelse af membraner ved nybyggeri og tætning af revner i betondæk mv. for eksisterende huse kan forventes at reducere indtrængningen af radon med 50 %. Metoden bør kun anvendes efter overvejelse af, om membranen giver anledning til u hensigtsmæssige fugtforhold. En membranløsning svarende til den, som blev anvendt i undersøgelsen, kan forventes at koste 10 000–15 000 kr.

Mekanisk udsugning fra ubeboede kælderrum og lign. Formålet med denne metode er, at begrænse at radon i rumluften i kælderen trænger op i husets beboelsesrum. Dette gøres vha. en ventilator, som bringes til at suge luft ud fra kælderen. Hensigten er at reducere trykdifferensen over etageadskillelsen mellem kælderen og den ovenliggende beboelse, således at luftoverføringen mindskes. Pga. udsugningen kan metoden forårsage en øget indtrængning af jordluft til kælderen, således at kælderen radonkoncentration stiger. Det er derfor vigtigt, at kælderen er ubeboet. En alternativ mulighed er at forbedre tilførslen af udeluft til kælderen. I dette tilfælde vil luftoverføringen til husets beboelsesdel ikke i samme grad blive mindsket. Til gengæld vil kælderen radonkoncentration blive nedbragt, således at den luft, som tilgår beboelsesdelen, får en lavere radonkoncentration. Metoden bør kun anvendes efter overvejelse af, om den mekaniske udsugning kan give anledning til u hensigtsmæssige fugtforhold. I undersøgelsen blev metoden afprøvet i 4 huse, og den gennemsnitlige reduktion var omkring 50 %. Anskaffelsesprisen vil være 1000–3000 kr.

Opsætning af udeluftventiler Opsætning af udeluftventiler har primært til formål at tilvejebringe en øget tilførsel af udeluft til huset, således at den indendørs radonkoncentration nedbringes ved fortynding. Opsætning af udeluftventiler kan dog samtidig medvirke til, at undertrykket i huset neutraliseres, således at indtrængningen af jordluft til huset mindskes. I 13 huse blev der opsat udeluftventiler, og ventilationsmålinger foretaget i foråret henholdsvis før og efter opsætningen viste, at husenes luftskifte blev forøget med omkring 20 %. Imidlertid var den observerede reduktionseffektivitet af radon kun omkring 11 %. Årsagen, til at det øgede luftskifte ikke gav anledning til en tilsvarende ændring af radonkoncentrationen, er muligvis, at en væsentlig del af det øgede luftskifte kan tilskrives meteorologiske forskelle mellem de to måleperioder. En lavere udetemperatur forøger både husets almindelige luftskifte og indtrængning af radonholdig jordluft.

Områdernes radonkoncentration

Udover undersøgelsen af effektiviteten af de forskellige reduktionsmetoder bidrager projektet også med en mere generel belysning af radonforholdene i Danmark. Eksempelvis bekræfter undersøgelsen, at de udvalgte geologiske områder har radonniveauer, som er større end dem, som gælder for landet som helhed. Således var andelen af huse med årsmidlede radonkoncentrationer over 200 Bq m^{-3} 9 % for

kalkområdet, 11 % for morænelersområdet og 16 % for granitområdet. På landsplan vurderes det, at 3 % af danske enfamiliehuse har niveauer over 200 Bq m^{-3} .

Målingerne i Allinge-Gudhjem Kommune på Bornholm er i denne sammenhæng af særlig interesse, da der ikke tidligere i større omfang har været foretaget radonundersøgelser i et dansk granitområde. Af de 80 huse, som blev undersøgt på Bornholm, havde tre huse årsmidlede radonniveauer, som var højere end alle tidligere rapporterede målinger for Danmark. To huse havde årsmidlede radonniveauer på lige under 1000 Bq m^{-3} . En årsmidlet radonkoncentration på 1000 Bq m^{-3} giver anledning til en strålingsdosis, som svarer til en vurderet livstidsrisiko for at udvikle lungekræft på omkring 8 %.

Konklusion

En række metoder til reduktion af radonkoncentrationen i rumluften er afprøvet i 21 danske enfamiliehuse. I nærværende rapport er erfaringerne dokumenteret og reduktionseffektiviteten af disse tiltag er vurderet.

Projektet viser, at der findes *aktive* metoder (dvs. metoder, hvor der anvendes forskellige former for mekanisk ventilation), som vil kunne give en væsentlig reduktion af radonkoncentrationen i de fleste danske huse. Desuden findes der en række *passive* metoder (såsom opsætning af udeluftventiler og tætning af terrændæk vha. en membran) som kan medvirke til at mindske radonniveauet i rumluften. Effektiviteten af disse tiltag vil normalt være mindre end for de aktive anlæg.

2 Introduktion

Radon er et luftformigt radioaktivt grundstof, som dannes, når det radioaktive stof radium henfalder. Radium og radon hører til gruppen af naturligt radioaktive stoffer, der findes overalt i jorden og i mange byggematerialer. Både fra jorden og fra byggematerialerne kan radon nå frem til indendørsluften i vore huse, hvorved radon og dets radioaktive henfaldsprodukter ved indånding kommer i kontakt med lungerne. Radon bidrager på denne måde til den naturlige baggrundsstråling. Det er i den forbindelse især radonisotopen Rn-222, der er af interesse, og betegnelsen *radon* anvendes derfor i det følgende synonymt med Rn-222.

Radon-222

Strålingsdoser for den danske befolkning

Den danske befolknings strålingsbelastning fra naturlige strålingskilder blev kortlagt ved en landsdækkende undersøgelse i 1985–86 [SIS87^b]. Undersøgelsen viste, at den gennemsnitlige effektive dosis til den danske befolkning fra alle naturlige strålingskilder udgør 3 mSv år^{-1} , hvoraf 2 mSv år^{-1} skyldes radon og radons radioaktive henfaldsprodukter i indendørsluften, medens 1 mSv år^{-1} stammer fra de øvrige komponenter af baggrundsstrålingen. Lægges hertil et bidrag på 1 mSv år^{-1} fra medicinsk anvendelse af stråling, bliver den samlede gennemsnitlige dosis for den danske befolkning 4 mSv år^{-1} . Radon i indendørsluften giver således det største enkeltbidrag til befolkningens strålingsbelastning.

Radonkoncentrationer i Danmark

De målte radonkoncentrationer i danske boliger viste sig i det væsentlige at være logaritmisk normaltfordelt med værdier fra omkring 5 til 500 Bq m^{-3} og med en gennemsnitsværdi på 47 Bq m^{-3} . Den gennemsnitlige radonkoncentration i danske boliger er dobbelt så stor som i Storbritannien, af samme størrelse som i USA, og halvt så stor som i svenske boliger [Gr93]. Opdeles de danske boliger efter hustype finder man, at den gennemsnitlige radonkoncentration i enfamiliehuse er 68 Bq m^{-3} , medens den i boliger i flerfamiliehuse er 19 Bq m^{-3} . Denne forskel hænger sammen med, at jorden under huset er den primære kilde til radon i indendørsluft og, at enfamiliehuse har en mere direkte kontakt til jorden. På grundlag af målingerne kan man også vurdere, at 3 %, eller ca. 40 000 af de

danske enfamiliehuse har en gennemsnitlig indendørs radonkoncentration på mere end 200 Bq m^{-3} .

Risikovurdering i forbindelse med radon er primært baseret på oplysninger om sammenhængen mellem minearbejderes udsættelse for radon og deres risiko for lungekræft [BEIR88]. Overførslen af disse risikofaktorer til radoneksponering i boliger er forbundet med usikkerhed [Jo96], og der arbejdes i disse år på at forbedre risikovurderingen bl.a. ved epidemiologiske studier direkte i boligmiljøet [Pe94, Au96].

I forbindelse med den landsdækkende undersøgelse kunne den fundne gennemsnitlige radonkoncentration vurderes at medføre et årligt antal lungekræfttilfælde i den danske befolkning på mellem 100 og 900 med et bedste skøn på 300 tilfælde om året [SIS87^c], svarende til ca. 10 % af det samlede årlige antal lungekræfttilfælde. Den gennemsnitlige livstidsrisiko i Danmark for at få lungekræft som følge af radon i boligen skønnedes at udgøre 0.4 %. For personer, der igennem et helt liv har boet i en bolig, hvor den gennemsnitlige radonkoncentration er større end 200 Bq m^{-3} , kan den individuelle livstidsrisiko for at få lungekræft skønnes at være større end 1 %. Dette er væsentligt mere end den livstidsrisiko, som i andre sammenhænge anses for en maksimalt acceptabel enkeltfaktorrisiko [Ne93]. Der kan derfor være grund til at forsøge at reducere radonbelastningen i de huse, der har de højeste radonkoncentrationer.

Dette er baggrunden for Radon-95 projektet, hvis formål har været at undersøge effektiviteten af foranstaltninger til reduktion af radonkoncentrationen i rumluften i eksisterende danske enfamiliehuse.

Selv om dosisbidraget fra radon og radons datterprodukter regnes til den naturlige baggrund, er radons tilstedeværelse i indendørsluft en følge af menneskelig aktivitet, idet boligens konstruktion, dens ventilation og dens placering har afgørende betydning for boligens radonkoncentration. Omvendt er det også muligt med passende indgreb at reducere radonkoncentrationen i boligen.

I Danmark er jorden under huset den vigtigste kilde til forhøjede radonkoncentrationer i indendørsluften. Byggematerialer i Danmark bidrager kun i mindre omfang [Ul84, SIS87^b, An96^b]. Radon er en ædelgas og kan derfor relativt let transporteres gennem jorden ved diffusion og strømning, idet den ikke bindes kemisk til omgivelserne. Fra jorden kan radon trænge ind i et hus ved diffusion og ved strømning gennem revner og sprækker i gulvkonstruktionen. Indstrømning af jordluft og dermed radon gennem revner og sprækker er som regel den dominerende mekanisme. Indstrømningen drives af det svage undertryk, der opstår i huset på grund af temperaturforskellen mellem den varme indendørsluft og den koldere udendørsluft. Desuden kan vindpåvirkninger have indflydelse på trykforholdene i huset. Indstrømningen af jordluft varierer derfor både i døgnets og i årets løb, og i tilfælde af at indstrømningen er den primære kilde til radon i huset fås en tilsvarende variation i radonkoncentrationen i indendørsluften. Forholdene kompliceres dog af at husets naturlige udelufttilførsel styres af de samme drivkræfter som indtrængningen af jordluft. I årets løb vil radonkoncentrationen normalt være størst om vinteren, medens den i døgnrytmen vil have sit maksimum lige før solopgang.

Som resumeret ovenfor bestemmes indtrængningen af radon til et hus af en blanding af geologiske, bygningstekniske og meteorologiske parametre. Nærmere redegørelser for disse forhold kan findes i f.eks. [Na88^b, Na92, Na94].

Når kilden til radon er jorden under huset, er det muligt at begrænse radon i boligen ved

- at forhindre indtrængning af jordluft fra den underliggende jord.

Dette kan gøres ved at konstruere en helt tæt grænseflade mellem huset og jorden eller ved at ændre luftstrømningsretningen i grænsefladen mellem huset og jorden. Sidstnævnte opnås ved at skabe et undertryk under huset i forhold til

Risikovurdering

Projektets formål

Jord som kilde til indendørs radon

Reduktionsprincipper

indendørsluften. Hvis indtrængningen ikke på simpel vis kan stoppes, kan det forsøges

- at forbedre husets ventilation,

således at radonkoncentrationen i husets indeluft formindskes ved fortynding med udeluft. En sidste mulighed er, at det vha. forskellige former for filtrering og/eller luftrensning forsøges

- at fjerne radon (og radon's henfaldsprodukter) fra indeluften.

Som gennemgået af Jonassen og McLaughlin [Jo88] er effektiviteten af sådanne metoder begrænsede, og i henhold til EPA's¹ vurdering kan metoderne ikke anses for at være egnede til anvendelse i det almindelige boligmiljø [He88]. Disse metoder vil derfor ikke blive behandlet yderligere i denne rapport. Det foreliggende projekt har således alene drejet sig om afprøvning af de to førstnævnte reduktionsmetoder i eksisterende danske huse.

Erfaringsgrundlag

Bygge- og Boligstyrelsen har siden 1987 udgivet vejledninger vedrørende radon i boliger og vedrørende bygningskonstruktioners lufttæthed mod jord [By87, By93, By94]. Projektet har med baggrund i disse vejledninger taget udgangspunkt i erfaringer, som er opnået i USA [He88, He94], Storbritannien [BRE92, Sc93, Sc94], Sverige [Sw90, Cl92] og Finland [St92, Ar93]. Målet har været, at tilvejebringe konkrete erfaringer med metoder til reduktion af radonkoncentrationen i et antal enfamiliehuse opført efter dansk byggeskik for derved at opnå et forbedret grundlag for rådgivning på området.

Rapportens struktur

Rapportens hovedstruktur opridses i det følgende: I kapitel 3 beskrives valget af huse og områder samt måle-, beregnings- og reduktionsmetoder. Kapitel 4 indeholder undersøgelsens måleresultater. Disse diskuteres i kapitel 5. Hovedvægten er her lagt på de forskellige reduktionsmetoder. For at øge rapportens anvendelighed indeholder diskussionen en nærmere redegørelse for metodernes (teoretiske) virkemåde og de erfaringer, som er rapporteret i litteraturen. Desuden er rapporten forsynet med en litteraturliste, en projektjournal, en lille ordliste, appendikser vedr. geologiske og beregningstekniske forhold og et appendiks med en samling af husspecifikke datablade. For hvert af de huse, hvor der blev foretaget tiltag til reduktion af radon, gives en husbeskrivelse og en liste over måleresultater.

3 Materialer og metoder

3.1 Valg af huse

Ud fra et individuelt strålingsbeskyttelsessynspunkt er det huse med et højt radonniveau, der er mest interessante. Samtidigt er det lettest at måle effekten af reduktionsforanstaltninger, hvis udgangspunktet er et relativt højt radonniveau. Arbejdet blev derfor indledt med en eftersøgning af huse med forhøjede radonniveauer.

Geologiske forhold

Erfaringer fra bl.a. Sverige viser, at huse beliggende i områder med granit i overfladen kan forventes at have forhøjede radonniveauer [Wi82]. Ligeledes viser en tidligere dansk undersøgelse på Mors, at der kan forekomme forhøjede radonkoncentrationer i huse i områder med kalkformationer i overfladen [Da88]. Tilsvarende sammenhænge er fundet i USA [Gu92], Storbritannien [Ap95] og Irland [OC93]. Endelig viser den landsdækkende undersøgelse [SIS87^b], at danske huse på moræner i gennemsnit har højere radonniveauer end huse beliggende på grus og sand.

¹Environmental Protection Agency, USA.

I Danmark findes områder med granit i overfladen kun på Bornholm, medens områder med kalkformationer i overfladen findes flere steder i Nordjylland og enkelte steder på Østsjælland, Møn, Lolland og Falster. Moræneler udgør omkring 60 % af Danmarks overfladegeologi.

Radonkoncentrationen i et hus bestemmes ikke alene af de geologiske forhold på det sted, hvor huset er opført. Eksempelvis er de byggetekniske forhold også af betydning. Med hensyn til hustype viste den landsdækkende undersøgelse [SIS87^b], at enfamiliehuse med terrændæk i gennemsnit har højere radonniveauer end enfamiliehuse med hel eller delvis kælder eller krybekælder.

Det blev på den baggrund besluttet at søge huse til undersøgelsen blandt enfamiliehuse med terrændæk i tre områder med henholdsvis moræneler, opsprækket granit og opsprækket kalk [Da96]. Hvert af de tre områder skulle af praktiske grunde helst ligge inden for samme kommune. Efter en geologisk analyse af mulighederne blev morænelersområdet valgt i Ramsø Kommune på Midtsjælland, området med opsprækket granit blev valgt i Allinge-Gudhjem Kommune, medens området med opsprækket kalk blev valgt i Thisted Kommune. Appendix B indeholder nærmere oplysninger om de geologiske forhold i de tre områder. I samarbejde med kommunernes tekniske forvaltninger blev der udpeget kvarterer i hvert af de geologiske områder, hvor bebyggelsen hovedsagelig består af enfamiliehuse bygget efter 1960. Dette er ensbetydende med, at størstedelen af husene, som indgår i undersøgelsen, er 1-plans huse med terrændæk. I Allinge-Gudhjem Kommune blev der, foruden det nyere boligkvarter, også medtaget et bykvarter med ældre bebyggelse, fordi granittens tilstedeværelse alene måtte forventes at give anledning til forhøjede radonniveauer, uanset boligtypen.

I rapporten anvendes kommunenavnene *Ramsø*, *Allinge-Gudhjem* og *Thisted* som betegnelse for de udvalgte kvarterer i de pågældende kommuner. Resultater og konklusioner, som knyttes til disse betegnelser, gælder således alene for kvartererne, og er ikke nødvendigvis repræsentative for hele den pågældende kommune.

Med hjælp fra Bygnings- og Boligregistret (BBR) udvalgte tilfældigt i alt 360 adresser i de udpegede kvarterer, fordelt med 120 i hver af de tre kommuner. SIS skrev til beboerne på de 360 adresser og anmodede dem om at deltage i undersøgelsen. I alt 270, svarende til 75 %, besvarede henvendelsen positivt og fik tilsendt dosimetre til den første radonmåling, som gennemførtes vinteren 1994–95. Alle deltagerne blev lovet anonymitet i forbindelse med undersøgelsen, og husene er derfor tilordnet et identifikationsnummer, der er den eneste offentliggjorte reference til de enkelte huse.

På grundlag af resultaterne af den første radonmåling inddeltes husene i tre grupper: en reduktionsgruppe, en kontrolgruppe og en restgruppe.

Det var hverken muligt eller rimeligt at tilbyde at iværksætte reduktionsforanstaltninger i alle 270 huse. Reduktionsgruppen blev valgt som de 24 huse, der efter den første radonmåling i vinteren 1994–95 vurderedes at have en årsmidlet radonkoncentration større end 200 Bq m^{-3} . Alle husejerne i denne gruppe fik tilbudt reduktionsforanstaltninger og deltagelse i det efterfølgende måleprogram.

For at kunne følge de naturlige variationer i radonkoncentrationen fra det ene år til det andet, blev der etableret en kontrolgruppe, hvor der ikke inden for projektet blev gennemført tiltag til nedbringelse af radonkoncentrationen. Da kontrolgruppens huse så vidt muligt skulle ligne husene i reduktionsgruppen, blev kontrolgruppen valgt som de 49 huse, der havde de næsthøjeste radonkoncentrationer. De serier af radonmålinger, der blev gennemført i løbet af projektet, blev foretaget parallelt i reduktionsgruppen og i kontrolgruppen.

Restgruppen bestod herefter af de huse, der var tilbage efter udtagelsen af huse til reduktionsgruppen og kontrolgruppen. I husene i restgruppen blev der ikke foretaget undersøgelser ud over den første radonmåling i vinteren 1994–95.

Hustyper

Søgeprofil

Brug af kommunenavnene

Udtræk fra BBR

Anonymitet

Reduktionsgruppe

Kontrolgruppe

Restgruppe

Frafald Det var ikke alle beboere, som ønskede at medvirke ved undersøgelsens videre forløb og i enkelte tilfælde ophørte deltagelsen undervejs. I alt gennemførte 21 huse i reduktionsgruppen og 42 huse i kontrolgruppen. Gruppeinddelingen omtales nærmere i afsnit 4.1.

3.2 Byggetekniske analyser

Samarbejde med tekniske forvaltninger

Efter udvælgelsen af huse til reduktionsgruppen besøgte SIS og Risø de tekniske forvaltninger i hver af de tre kommuner. Formålet var at give en personlig og nærmere orientering om projektet og at forberede COWIs og SBIs senere indhentning af oplysninger fra byggesagsarkivet og besøg i hvert enkelt hus i området.

Den byggetekniske analyse af reduktionsgruppens huse blev udført af COWI på baggrund af husbesøg og tilgængelige tegninger hos de tekniske forvaltninger. Hovedvægten i analysen blev lagt på husets kontakt med jorden.

Husinspektion

Forud for besøget i hvert område blev der truffet aftale med hver enkelt husejer om adgang til huset. Med en enkelt undtagelse blev der gennemført besøg i alle huse i slutningen af marts og i begyndelsen af april 1995 (se projektjournalen, Appendiks A).

Besøget i det enkelte hus gav mulighed for at foretage en byggeteknisk gennemgang på stedet. Samtidig blev den første ventilationsmåling igangsat (se afsnit 3.4). Den byggetekniske gennemgang omfattede:

- Overordnet kontrol af om tegningerne fra kommunens byggesagsarkiv var gældende.
- Inspektion af sokkel udvendig, inklusive fotografering.
- Inspektion af gulve for eventuelle revner mm. inklusive fotografering.
- Interview af beboere vedrørende terrændækkets opbygning og eventuelle revner i selve dækket.

Tegningerne fra kommunernes byggesagsarkiv var i de fleste tilfælde dækkende dog således, at der ofte forekom tilbyggede udestuer og andre ændringer, som kun sjældent var fulgt op af en egentlig revision af plan og snittegninger. Oplysninger om terrændækkets opbygning forelå ofte, men pålideligheden af disse oplysninger kunne som regel ikke umiddelbart kontrolleres.

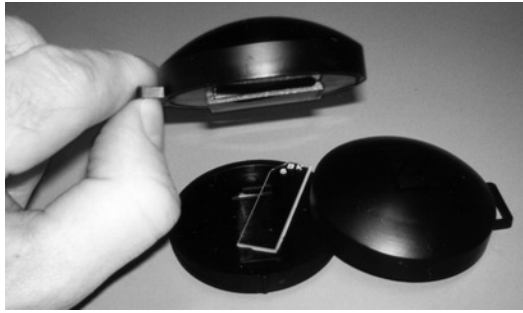
Resultatet af de gennemførte besøg i husene i reduktionsgruppen foreligger i form af:

- Intern, ikke offentliggjort projektmappe med eksisterende tegninger fra tekniske forvaltninger, noter og fotos fra hvert enkelt hus i reduktionsgruppen.
- Byggeteknisk karakteristik af hvert enkelt hus i reduktionsgruppen med hovedvægten lagt på de huse, hvor mere omfattende reduktionsforanstaltninger blev gennemført. Den byggetekniske karakteristik findes anført på husenes datablade i Appendiks E.

Husenes karakteristika resumeres i afsnit 4.1.

3.3 Radonmålinger

De tidsintegrerende radonmålinger blev udført med et dosimeter baseret på den såkaldte sporfoliemetode med plasttypen CR-39 [Ma86^a, Ma86^b]. Når alfa-partikler fra det radioaktive henfald af radon eller radons henfaldsprodukter rammer overfladen af plastmaterialet, opstår der brud på de polymere kæder. Disse punkter i plastoverfladen er særligt følsomme for den efterfølgende ætsning i varm NaOH. Sporene efter alfa-partiklerne fremtræder i plastmaterialets overflade efter



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.

ætsningen som små kegleformede strukturer, der er synlige i mikroskop og som kan optælles med automatisk billedanalyse. Den registrerede sportæthed bliver derved et mål for sporfoliets samlede radoneksponering i måleperioden. Dosimetret er således et integrerende instrument, hvis måleresultat kan omsættes til en gennemsnitlig radonkoncentration i måleperioden.

Som vist i Figur 2 består radondosimetret af et sporfolie anbragt i en cirkulær plastkapsel, med en diameter på 5.8 cm. Plastkapslen beskytter sporfoliet, men tillader samtidig, at radon kan diffundere ind i kapslen og påvirke sporfoliet.

Radonmålingerne foregik ved, at hver husstand med posten fik tilsendt to dosimetre, som beboerne blev anmodet om at placere i henholdsvis opholdsstue og soveværelse. Vedlagt dosimetrene var der en vejledning og en frankeret returkuvert. Ved den første radonmåling var der desuden vedlagt et skema med grundlæggende byggetekniske spørgsmål. Nogle dage før eksponeringstidens udløb modtog beboerne en påmindelse om returnering af dosimetre. Denne procedure viste sig at være effektiv, idet alle udsendte dosimetre blev returneret.

For hvert dosimeter registreredes tidspunkterne for afsendelse fra Risø, opsætning og nedtagning af dosimetret i huset samt tidspunktet for modtagelsen på Risø. Beboerne noterede selv opsætnings- og nedtagningstidspunktet på en mærkat bag på hvert dosimeter. I de få tilfælde, hvor beboernes oplysninger var mangelfulde, er det antaget, at op- og nedtagningstidspunkterne er forskudt 1.5 døgn i forhold til afsendelsen eller modtagelsen på Risø. Eksponeringstiden defineres, som den tid dosimetret var opsat i huset. Transittiden defineres som differensen mellem den tid dosimetret var borte fra Risø og eksponeringstiden. Det antages, at dosimetret i transittiden befandt sig i en radonkoncentration på 10 Bq m^{-3} . Appendiks D indeholder en nøjere gennemgang af hvorledes den gennemsnitlige radonkoncentration (og den tilhørende usikkerhed) beregnes for et givet dosimeter.

Afledte beregninger vedr. radonmålingerne

Som nævnt bestod hver radonmåling i et hus af en måling i soveværelset og en måling i opholdsstuen. Gennemsnittet af disse to målinger betegnes som husmiddelværdien for den pågældende måling.

Der blev foretaget radonmålinger i tre perioder i løbet af projektet:

- Vinteren 1994–95 (før reduktionsindgrebene), hvor målingerne omfattede alle tre grupper, nemlig reduktions-, kontrol- og restgruppen.
- Foråret-sommeren 1995 (før reduktionsindgrebene), hvor målingerne kun omfattede reduktions- og kontrolgruppen.

Postekspedition af dosimetrene

Transit- og eksponeringstider

Husmiddelværdier

- Vinteren 1995–96 (efter reduktionsindgrebene), hvor målingerne ligeledes kun omfattede reduktions- og kontrolgruppen.

For et givet hus betegnes husmiddelværdierne for disse tre måleperioder henholdsvis $c_{0,v}$, $c_{0,s}$ og $c_{1,v}$, idet index 0 og 1 angiver måling før og efter reduktionsindgrebene, medens index v og s står for henholdsvis vinter og sommer.

Vinter-til-vinter forhold

Vinter-til-vinter forholdet $c_{1,v}/c_{0,v}$ mellem radonkoncentrationerne i vinterperioderne efter og før reduktionstiltagene giver et direkte mål for den reduktionsfaktor, der er opnået under vinterforhold. Målingen skal imidlertid korrigeres for at radonkoncentrationen i et hus varierer bl.a. med de meteorologiske forhold. Radonkoncentrationen i et hus kan således variere fra den ene vinter til den anden pga. forhold, som intet har med reduktionsforanstaltningerne at gøre. Korrektionen gennemføres ved at normalisere den målte reduktionsfaktor for et hus i reduktionsgruppen med gennemsnitsværdien af vinter-til-vinter forholdet ($c_{1,v}/c_{0,v}$) for kontrolgruppen. Kontrolgruppen består netop af huse, der ikke har fået udført reduktionsforanstaltninger. Den korrigerede reduktionsfaktor kaldes γ og størrelsen: $R_v = 1 - \gamma$ betegner da reduktionsindgrebets effektivitet. R_v angiver således, hvor meget radonkoncentrationen er nedbragt i forhold til startværdien, når der er korrigeret for naturlige forskelle mellem de to vinterperioder.

Reduktionseffektivitet

Gyldigheden af de implicite antagelser bag denne beregningsmetode diskuteres nærmere i afsnit 5.8 medens den tilknyttede usikkerhed diskuteres i Appendiks D.

Det bemærkes, at der ikke anvendes områdespecifikke korrektionsfaktorer, idet målingerne viser, at vinter-til-vinter forholdene ($c_{1,v}/c_{0,v}$) for kontrolgruppens huse ikke er signifikant forskellige fra det ene område til det andet.

Årsmiddelværdier

I forbindelse med rapportering af måleresultaterne til beboerne og ved den videre behandling af resultaterne, var det ønskeligt at kunne angive vurderede årsmiddelværdier for radonkoncentrationen for alle husene i undersøgelsen. For husene i reduktions- og kontrolgruppen foreligger der både en vintermåling og en forårs-sommermåling før reduktionsindgrebene. Gennemsnittet af disse to målinger for et givet hus antages da at repræsentere årsmiddelværdien af radonkoncentrationen før reduktionsindgrebet. I den forbindelse indføres det såkaldte vinter-til-årsmiddel forhold, som for perioden før reduktionsforanstaltningerne er: $c_{0,v}/c_0$, hvor c_0 er den vurderede årsmiddelværdi.

Vinter-til-årsmiddelværdi forhold

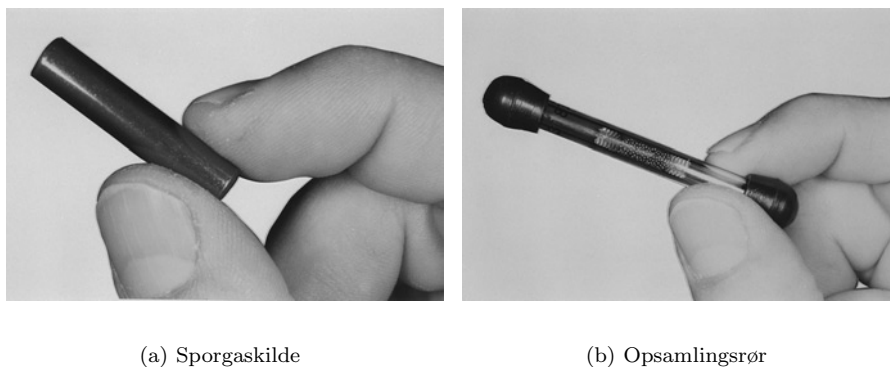
En nøjere analyse af årstidsvariationen for reduktions- og kontrolgruppen i de tre områder viser signifikante forskelle mellem de tre områder. Beregningen af årsmiddelværdier for restgruppens huse, for hvilke der kun er foretaget en vintermåling, er derfor foretaget på basis af disse målte, områdespecifikke sæsonvariationer.

For reduktions- og kontrolgruppens huse er det også nødvendigt at beregne årsmiddelværdien af radonkoncentrationen *efter* reduktionsindgrebene. Her antages det, at husenes individuelle sæsonvariation ikke ændres af reduktionsindgrebet. Årsmiddelværdien beregnes på basis af den målte vinterradonkoncentration *efter* reduktionsindgrebet korrigeret for den individuelt målte sæsonvariation (vinter-til-årsmiddelforholdet).

3.4 Ventilationsmålinger

Sporgasmålinger

Måling af luftskiftet i en bolig foretages almindeligvis ved anvendelse af sporgasteknik. Det grundlæggende princip i sporgasteknik er, at en kendt og målelig luftart, en sporgas, tilsættes og opblandes med rumluften, hvorefter koncentrationsforløbet registreres. Ved at sammenholde målinger af doseringen af sporgas, koncentrationsforløbet og tiden, kan tilførslen af udeluft beregnes. Sættes udeluft-tilførslen i forhold til boligens nettovolumen, fås luftskiftet.



Figur 3. PFT-metodens udstyr til måling af ventilationsforhold.

I denne undersøgelse blev husenes luftskifte bestemt ved anvendelse af PFT-metoden, som er en passiv multi-sporgasteknik efter konstant-dosering princippet [Be92]. PFT står for Perfluorcarbon Tracer, idet de anvendte sporgasser er perfluorcarbon'er, som er organiske forbindelser af perfluoralkylcycloalkan-familien. Sporgas udsendes passivt fra sporgaskilder og opsamles passivt i adsorptionsrør—se Figur 3. En sporgaskilde består af et lille metalhylster ($l = 32$ mm, $d = 6.6$ mm) lukket med en siliconeprop, hvorigennem sporgassen diffunderer. Ved konstant temperatur udsendes sporgas med konstant rate. Et adsorptionsrør består af et glastrør ($l = 64$ mm, $d = 6.4$ mm), som indeholder en adsorbent beslægtet med aktivt kul. Adsorptionsrørene analyseres i laboratoriet ved hjælp af termisk desorption og gaschromatografi.

Med PFT-metoden bestemmes den gennemsnitlige udelufttilførsel, og dermed det gennemsnitlige luftskifte, over en periode typisk i størrelsesordenen 1–3 uger. I en bolig anbringes 4–6 sporgaskilder og 6–8 adsorptionsrør. Sporgaskilderne anbringes, så der opnås en ensformig sporgasfordeling i boligen, og adsorptionsrørene anbringes, så de registrerer den gennemsnitlige sporgaskoncentration i måleperioden. Det er med PFT-metoden muligt, at gennemføre målinger mens boligen er i normal brug. Derved er det de i praksis forekommende ventilationsforhold, som bestemmes.

Simultan anvendelse af flere forskellige sporgastyper gør det muligt at bestemme såvel boligens gennemsnitlige totale udelufttilførsel, som udelufttilførslen til forskellige rum eller zoner i boligen samt luftudvekslingen mellem rummene eller zonerne.

Usikkerheden på en måling ved anvendelse af PFT-metoden indbefatter, foruden usikkerheder som knytter sig til funktionen af sporgaskilder, adsorptionsrør og analyseudstyr, også nogle fejlkilder, som kan henføres til metoden og dens beregningsmæssige grundlag. Ved målinger med PFT-metoden beregnes den gennemsnitlige udelufttilførsel i måleperioden på grundlag af en målt, gennemsnitlig sporgaskoncentration. Beregningsproceduren medfører en systematisk undervurdering af den gennemsnitlige udelufttilførsel, såfremt sporgaskoncentrationen ikke er konstant igennem måleperioden. Fejlens størrelse afhænger af varigheden, hyppigheden og størrelsen af fluktuationerne i sporgaskoncentrationen i måleperioden. Variationer i sporgaskoncentrationen kan typisk henføres til beboernes brug af huset, herunder åbning af døre og vinduer i forbindelse med udluftning. Ved kortvarige udluftninger vil der kun forekomme mindre udsving i den aktuelle sporgaskoncentration, som til stadighed vil være nær ligevægtskoncentrationen svarende til den gennemsnitlige udelufttilførsel. Fejlen på den beregnede gennemsnitlige udelufttilførsel vil i dette tilfælde være lille. Udluftninger af længere varighed vil medføre større

PFT-metoden

Procedure

Total- og zoneopdelt udelufttilførsel

Usikkerhed

udsving i sporgaskoncentrationen, og den systematiske fejl vil blive forøget. Det skønnes, at den systematiske undervurdering i praksis vil være højst 15 %, og at den tilfældige fejl er $\pm(10-15)$ %. En nøjere redegørelse for usikkerheder og fejlkilder ved måling med PFT-metoden findes i [Be92], hvor også metodens udstyr og anvendelse er nærmere beskrevet.

Måleprogram Der blev foretaget ventilationsmålinger i husene i reduktionsgruppen i foråret 1995 og i foråret 1996, dvs. før og efter reduktionsindgrebene.

3.5 Supplerende data og undersøgelser

Undersøgelsen indeholder en række supplerende undersøgelser, som primært omfatter husene i reduktionsgruppen.

Hus- og kortdata

BBR Som nævnt side 9 blev undersøgelsens adresser udvalgt tilfældigt af Bygnings- og Boligregistret (BBR) inden for de udpegede områder. I den forbindelse blev husenes bygge-, bolig-, og kælderareal samt byggeåret oplyst.

Spørgeskema I forbindelse med kortlægningsmålingen af radon i vinteren 1994–95 blev en spørgeskemaundersøgelse gennemført. Husejeren i hver af de 270 huse blev bedt om bl.a. at angive hustypen, husets kælderforhold (fuld kælder, delvis kælder, krybekælder, ingen kælder eller andet), antallet af etager i huset og karakteren af undergrunden.

UTM-koordinater For at give mulighed for en detaljeret kortlægning af områderne blev hver enkelt adresse tilskrevet UTM-koordinater (Universal Transverse Mercator). For husene i Ramsø kommune kunne UTM-koordinaterne rekvireres på elektronisk form fra Kort- og Matrikelstyrelsen. For husene i Allinge-Gudhjem og Thisted blev UTM-koordinaterne fundet manuelt vha. matrikelkort og Kort- og Matrikelstyrelsens Danmarkskort på cd-rom.

Meteorologiske data

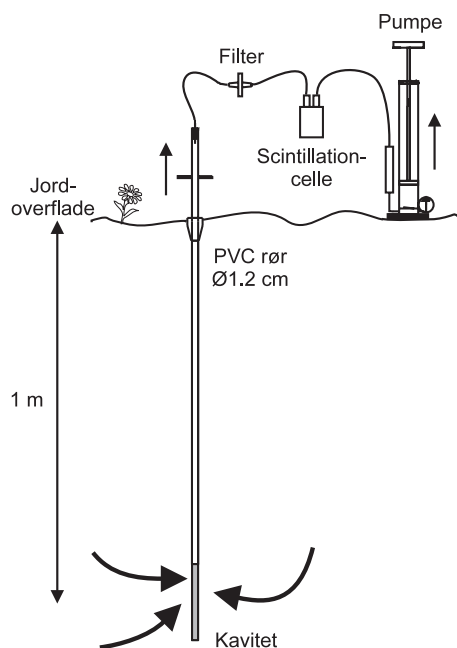
DMI data Med henblik på at vurdere i hvilken grad variationen af radon fra én periode til en anden er betinget af meteorologiske forhold, er der anskaffet data fra Danmarks Meteorologiske Institut. Det drejer sig bl.a. om døgnværdier for udendørs temperatur (døgnmiddel, -minimum og -maksimum), vindhastighed, vindretning, nedbør og global indstråling. Ramsøområdet dækkes af målinger fra DMI's målestationer i Ledreborg og Lejre, Allinge-Gudhjem dækkes af stationerne Hammer Odde Fyr og Klemensker og Thisted dækkes af stationen i Silstrup. Vindmålingerne er fra 10 eller 16 m over stationsniveau. Desuden er der anskaffet dagsobservationer af snedække og snehøjde ved Roskilde Lufthavn i Tune.

Radonmålinger i vand

Radon i vand Da vand er en potentiel kilde til indendørs radon indsamlede Risø ved husbesøg i sommeren 1995 vandprøver i hovedparten af reduktionsgruppens huse. Prøverne blev taget direkte fra vandhaner i køkken, toiletrum eller bryggers. Det blev ikke undersøgt om vandet kom fra vandværk eller egen boring. Prøverne blev analyseret af Statens Institut for Strålehygiejne vha. væskescintillationsmetoden [SIS87^a].

Radonmålinger i jordluft

Radon i jordluft Der blev foretaget målinger af jordluftens indhold af radon via prober, som vist i Figur 4. Et PVC rør hamres 90 cm ned i jorden og en 20 cm kavitet udbores



Figur 4. Probe til udtagning af jordluftprøve 1 m under terræn. Luftprøven (i scintillationscellen) analyseres for radon vha. en transportabel tæller, og jordluftens radonkoncentration bestemmes.

med håndbor. Vha. en håndpumpe kan der således udtages jordluft i ca. 1 m's dybde. Jordluften overføres til en 150–170 mL scintillationscelle, som analyseres vha. en transportabel tælleenhed (RD-200, EDA Instruments Inc., Canada). Herved bestemmes jordluftens radonkoncentration. Pga. mulig indflydelse af huset på jordluftens radonindhold, bør proberne fortrinsvis placeres mere end 3–5 m fra huset. I sommeren 1995 blev der foretaget 1–3 målinger omkring hovedparten af husene i reduktionsgruppen.

Kontinuerte radonmålinger mv.

Der blev foretaget kontinuerte målinger af radonkoncentrationen i udvalgte huse i reduktionsgruppen. I 6 huse placeredes 1, 2 eller 3 radonmonitører af ionkammertypen (AlphaGuard PQ2000, Genitron Instruments, Tyskland). Disse instrumenter, se Figur 5, registrer hver time den indendørs radonkoncentration samt indendørs temperatur, relativ fugtighed og atmosfærisk tryk. Alle resultater lagres i en indbygget datalogger med plads til data svarende til mere end tre måneders målinger.

I visse af de gennemførte måleserier blev der desuden foretaget måling af udetemperaturen 1.7 m over jorden i husets umiddelbare nærhed. Disse målinger udførtes med et Pt-100 element placeret i en standard strålingskærm. Data blev opsamlet elektronisk hver halve time.

Korttidsvariationer

Udetemperatur

Radon, tryk- og strømningsforhold omkring hus med aktivt sug under terrændæk

For hus nr. 4185, hvor der blev etableret et aktivt sug under terrændæk (se næste afsnit), blev der foretaget en række supplerende undersøgelser. Formålet hermed var at belyse (1) tryk, strømningshastighed og radonforhold i suget, samt (2) tryk- og radonforhold i jorden omkring huset. Til disse undersøgelser blev der anvendt udstyr som vist i Figur 4 samt et differensmanometer (0.0–200.0 Pa, FCO-10, Furness Controls Ltd., Storbritannien) og et pitotrør.



Figur 5. De kontinuerte radonmonitører tømmes for data vha. en bærbar pc'er. Radonmonitoren har et display, som løbende viser rummets radonkoncentration samt temperatur- og trykforhold.

3.6 Reduktionsforanstaltninger

I det foreliggende projekt er to aktive og tre passive metoder til radonreduktion blevet afprøvet:

- Aktive metoder
 1. Aktiv udsugning under terrændæk
 2. Udsugning fra kælderrum
- Passive metoder
 1. Passiv udsugning under terrændæk
 2. Tætning af terrændæk
 3. Montering af udeluftventiler

Udgangspunktet for valget af de enkelte reduktionsmetoder har været at anvende de aktive metoder til husene med de højeste radonkoncentrationer. På baggrund af udenlandske erfaringer vurderes disse som de mest effektive. Herudover blev såvel aktive som passive metoder valgt på grundlag af en konkret byggeteknisk vurdering af det enkelte hus. Konstruktion og virkemåde for de 5 metoder gennemgås kort neden for. Kapitel 5 indeholder en mere detaljeret gennemgang af metoderne.

Aktiv udsugning under terrændæk

Metoden har til formål at hindre indtrængning af jordluft til huset. Dette gøres ved at frembringe et undertryk i det kapillarbrydende gruslag under husets terrændæk i forhold husets rumluft, således at der strømmer luft fra hus mod jord. Undertrykket tilvejebringes vha. en kanalventilator, som f.eks. placeres på husets loft. Rør føres fra ventilatoren til et eller flere sugpunkter i det kapillarbrydende lag under terrændæk, enten ved en gennemboring af terrændæk inde i huset eller ved vandret indføring udefra ved gennemboring af sokkel. Løsningen er kendt som en effektiv, men relativt omkostningskrævende installation. Den kræver løbende kontrol og vedligehold og giver både et konstant elforbrug og et vist støjniveau. Løsningen blev afprøvet i to huse.

Udsugning fra kælderrum

I de ældre huse, der indgik i undersøgelsen, var der i kældre og krybekældre i flere tilfælde blotlagt undergrund. Det var derfor nærliggende at etablere mekanisk

udsugning fra disse rum. Udsugningen blev etableret med en vægventilator koblet til egen afbryder. Udsugningen giver et lille relativt undertryk i kælderen eller krybekælderen og begrænser herved radonindtrængningen til beboelsesrummene. Løsningen blev afprøvet i 4 huse.

Passiv udsugning under terrændæk

Metoden har til formål at mindske indtrængning af jordluft til huset ud fra de samme principper, som blev omtalt i forbindelse med det aktive sug under terrændæk. Forskellen mellem aktivt og passivt sug under terrændæk er, at den passive metode ikke gør brug af en kanalventilator, men baseres på naturlige drivkræfter (termik og vindpåvirkninger). Passivt sug under terrændæk etableres ved at føre lodrette kanaler fra det kapillarbrydende lag under terrændæk op gennem huset og tagetagen til det fri. Løsningen blev afprøvet i ét hus.

Tætning af terrændæk

En tætning af terrændækket i eksisterende huse kan i princippet udføres f.eks. ved udlægning af polyethylen-membran under husets væg-til-væg tæpper suppleret med tætning langs væggene. Membranen blokerer for diffusiv indtrængning til huset og for så vidt, at der ikke er nævneværdige utætheder i de uafdækkede gulvflader, kan membranen også gøre gulvkonstruktionen lufttæt, således at jordluften hindres i at trænge ind. Løsningen med udlægning af polyethylen-membran under husets væg-til-væg tæpper blev afprøvet i ét hus.

Montering af udeluftventiler

Ifølge gældende bygningsreglement skal det være muligt at tilvejebringe et luftskifte i boligen på 0.5 gange pr. time. Ved naturlig ventilation kan dette almindeligvis opnås ved at anbringe udeluftventiler i opholdsrummene og lodrette aftrækskanaler i køkken og bad/toilet. Ventilationsforholdene i et hus kan have indflydelse på radonkoncentrationen, og det blev derfor besluttet at opsætte udeluftventiler i alle reduktionsgruppens huse, der ikke allerede opfyldte bygningsreglementets krav. Den anvendte udeluftventiltype er en relativt nyudviklet version af den såkaldte tallerkenventil (ventilen beskrives nærmere side 48). Optimal funktion forudsætter, at beboerne aktivt åbner og lukker ventilerne i forhold til vejrændringer. Aftræksforholdene fra køkken og bad er ikke kontrolleret eller ændret i forbindelse med projektet. Der blev opsat udeluftventiler i 19 huse i et antal på 1–7 stk. pr. hus. I 13 af husene var montering af udeluftventiler, det eneste reduktionsindgreb der blev gennemført.

4 Resultater

4.1 Gruppeopdeling og huskarakteristika

270 huse deltog i den indledende kortlægningsmåling af radon i vinteren 1994–95 i områderne Ramsø, Allinge-Gudhjem og Thisted. Som omtalt side 9 er husene inddelt i tre grupper: (1) en reduktionsgruppe (21 huse), hvor der blev foretaget reduktionstiltag mod radon, (2) en kontrolgruppe (42 huse), hvor der blev gennemført det samme radonmåleprogram, som i reduktionsgruppens huse, men hvor

Tabel 1. Antal huse i de forskellige grupper. Kolonnen "Frafald" omfatter de huse, som oprindeligt var udpeget til at være i reduktions- eller kontrolgrupperne, men som undervejs ophørte med at medvirke i undersøgelsen.

Område	Reduktions- gruppe	Kontrol- gruppe	Rest- gruppe	Frafald	Sum
Ramsø	7	14	76	3	100
Allinge-Gudhjem	8	16	54	2	80
Thisted	6	12	67	5	90
Alle	21	42	197	10	270

Tabel 2. Antal huse med forskellige former for konstruktion mod jord opdelt efter område og gruppe. Gruppen "Alle" er de huse der deltog i den indledende kortlægningsundersøgelse for radon i vinteren 1994–95. Resultaterne bygger på beboernes egne oplysninger i forbindelse med en spørgeskemaundersøgelse.

Område	Gruppe	Fuld kælder	Delvis kælder	Krybe- kælder	Ingen kælder	Andet	Sum
Ramsø	Reduktion	0	0	0	7	0	7
	Kontrol	0	0	0	14	0	14
	Alle	4	3	4	89	0	100
Allinge- Gudhjem-	Reduktion	1	3	0	4	0	8
	Kontrol	3	9	1	3	0	16
	Alle	20	26	11	23	0	80
Thisted	Reduktion	0	1	0	5	0	6
	Kontrol	0	1	2	8	1	12
	Alle	3	6	8	72	1	90
Alle	Alle	27	35	23	184	1	270

Tabel 3. Byggeår ifølge Bygge- og Boligregistret (BBR) for de huse, som deltog i den indledende måling af radon i vinteren 1994–95. AM og AS (i år) er hhv. aritmetisk middelværdi og standardafvigelse. Min og Max angiver minimum- og maksimumværdier.

Område	N	Median	AM	AS	Min	Max
Ramsø	100	1972	1972	4.0	1963	1982
Allinge-Gudhjem	80	1967	1953	32.0	1870	1992
Thisted	90	1975	1974	7.6	1953	1990
Alle	270	1972	1967	20.3	1870	1992

der ikke inden for projektet blev foretaget tiltag til radonreduktion samt (3) en restgruppe (197 huse), som kun deltog i den indledende måling af radon. Tabel 1 viser, hvorledes husene i de forskellige grupper fordeler sig på de tre områder. Det bemærkes, at inden for hvert område er kontrolgruppen dobbelt så stor som reduktionsgruppen.

Husenes konstruktion mod jord fremgår af Tabel 2. Det ses, at de udvalgte områder i Ramsø og Thisted domineres af terrændækhuse. I Allinge-Gudhjem har omkring halvdelen af de 80 huse fuld eller delvis kælder.

Husenes byggeår er resumeret i Tabel 3. Medianen for byggeåret er omkring 1970 i alle tre områder. Den store forskel mellem områderne er, at der blandt husene i Allinge-Gudhjem forekommer huse, som er væsentligt ældre end husene i de andre områder. Eksempelvis er 13 af undersøgelsens 80 huse i Allinge-Gudhjem bygget før 1910, og de ældste huse er fra omkring 1870. I Ramsø og Thisted er alle de undersøgte huse bygget efter 1953.

Som nævnt i afsnit 3.2 blev hovedparten af husene i reduktionsgruppen underkastet en byggeteknisk analyse. Alle besøgte huse i Ramsø og Thisted var nyere 1-plans huse med terrændæk, idet et enkelt hus i Thisted dog havde delvis kælder; nemlig under opholdsstuen. I Allinge-Gudhjem var 3 af de besøgte huse nyere 1-plans huse med terrændæk, 2 var nyere huse med delvis kælder/krybekælder, medens 3 var ældre huse med delvis kælder/krybekælder.

Af de 8 huse, hvori der blev foretaget mere omfattende reduktionsforanstaltninger, var 2 beliggende i Ramsø, 2 i Thisted og 4 i Allinge-Gudhjem. I de øvrige huse i reduktionsgruppen blev der gennemført mindre ændringer af ventilationsforholdene. Disse huse fordelte sig med 5 i Ramsø, 4 i Thisted og 4 i Allinge-Gudhjem.

Appendisk E indeholder en kort beskrivelse af de enkelte huse i reduktionsgruppen.

Byggeteknisk analyse

4.2 Radonmålinger

Eksposeringstider og usikkerhed

Tabel 4 sammenfatter tidsmæssige oplysningerne om de tre perioder: vinteren 1994–95, foråret-sommeren 1995 og vinteren 1995–96, hvor der i undersøgelsen blev foretaget radonmålinger i husene vha. sporfolieteknikken. Eksempelvis viser tabellen, at måleperioden vinteren 1994–95 for gennemsnittet af husene startede den 25. november 1994 og sluttede den 30. januar 1995. I gennemsnit varede de tre måleperioder hhv. 67, 81 og 83 dage, og transittiderne var i gennemsnit omkring 3.5 dage. Enkelte huse afveg en del herfra. I ét tilfælde var eksposeringstiden således kun 33 dage, og i et andet var den 116 dage. Tilsvarende var transittiden i et tilfælde 34 dage. Ingen af målingerne er ekskluderet af den videre databehandling pga. ekstreme eksposerings- eller transittider, men forholdene er medtaget i usikkerhedsberegningen for radonmålingerne (se Appendiks D).

I gennemsnit var den vurderede relative usikkerhed ved hver enkeltmåling omkring 16 %, primært på grund af usikkerhed ved kalibrering og tælleproces. I 8 tilfælde var den vurderede relative usikkerhed hidrørende alene fra transittidsbestemmelsen dog mere end 10 % af de rapporterede radonkoncentrationer. Den største transittidsusikkerhed forekom ved vintermålingen 1994–95 i hus nr. 4185, hvor usikkerheden udgjorde 30 % af den målte radonkoncentration.

Usikkerhed

Resultater for de tre perioder

Der blev i undersøgelsen foretaget i alt 810 enkeltmålinger af radonkoncentrationen i stue og soveværelse i 270 huse fordelt over 1, 2 eller 3 perioder. Tabel 5 giver en oversigt over de husmidlede radonkoncentrationer—dvs. gennemsnitskoncen-

Tabel 4. Sammenfatning af tidsmæssige oplysninger for radonmålingerne i 270 huse i vinteren 1994–95, 66 huse i foråret-sommeren 1995, og 63 huse i vinteren 1995–96. Følgende statistiske mål angives: aritmetisk middelværdi (AM) og standardafvigelse (AS), og minimum- (Min) og maksimumværdi (Max).

Variabel		Vinter 1994–95	Forår-sommer 1995	Vinter 1995–96
Opsætnings- tidspunkt	AM	25.11.94	09.04.95	18.12.95
	AS	5.5 dage	4.1 dage	5.8 dage
	Min	22.11.94	07.04.95	15.12.95
	Max	01.01.95	26.04.95	17.01.95
Nedtagings- tidspunkt	AM	30.01.95	28.06.95	09.03.96
	AS	3.9 dage	7.9 dage	6.6 dage
	Min	24.12.94	08.06.95	03.03.96
	Max	11.02.95	04.08.95	08.04.96
Eksponerings- tid	AM	67 dage	81 dage	83 dage
	AS	5.2 dage	8.6 dage	6.0 dage
	Min	33 dage	56 dage	73 dage
	Max	79 dage	123 dage	116 dage
Transittid	AM	3.6 dage	3.3 dage	3.6 dage
	AS	2.2 dage	1.6 dage	1.3 dage
	Min	3.0 dage	1.5 dage	3.0 dage
	Max	34.0 dage	14.0 dage	17.0 dage

trationen af stue og soveværelse for de enkelte huse. Det fremgår af tabellen, at der forekommer målinger i intervallet fra omkring 0 til 1400 Bq m^{-3} . Målingerne i de 270 huse i vinteren 1994–95 har en geometrisk middelværdi på 99 Bq m^{-3} og en geometrisk standardafvigelse på 2.3. Der er ikke umiddelbart stor forskel mellem de tre områder: de geometriske middelværdier for vinteren 1994–95 er 92 Bq m^{-3} for Ramsø, 101 Bq m^{-3} for Allinge-Gudhjem og 106 Bq m^{-3} for Thisted. Årstidsvariationer for radonkoncentrationen forekommer i alle områder. Eksempelvis er den geometriske middelværdi for alle 42 huse i kontrolgruppen i foråret-sommeren 1995 126 Bq m^{-3} mod omkring 200 Bq m^{-3} for de to vinterperioder. Det fremgår af tabellen, at de 21 huse i reduktionsgruppen i vinteren 1994–95 har koncentrationer fra omkring 250 til 1400 Bq m^{-3} og en geometrisk middelværdi på 385 Bq m^{-3} . Efter reduktionsforanstaltningerne er koncentrationerne i vinteren 1995–96 faldet til 80–600 Bq m^{-3} og en geometrisk middelværdi på 273 Bq m^{-3} .

Resultater for stue og soveværelse

Tabel 6 angiver de målte radonkoncentrationer i stue og soveværelse i vinteren 1994–95. Tabellen viser, at radonkoncentrationen i et givet hus generelt er lavere i soveværelset end i stuen. For huse, hvor stue og soveværelse begge er beliggende i husets stueplan, er den geometriske middelværdi af soveværelse-til-stue forholdene ($c_{\text{sov}}/c_{\text{stu}}$) 0.78 for de tre områder lagt sammen. For huse, hvor stuen ligger i husets stueplan og soveværelset ligger på husets 1. sal, er den geometriske middelværdi af soveværelse-til-stue forholdene 0.56.

Årsmiddelværdier

*Vinter-til-årsmiddel
forhold*

Tabel 7 viser, at radonkoncentrationen målt om vinteren generelt er højere end radonkoncentrationen vurderet for et helt år. For den kombinerede reduktions- og kontrolgruppe er vinterkoncentrationen i Ramsø i 1994–95 i gennemsnit 20.6 %

Tabel 5. Husmidlede radonkoncentrationer inddelt efter område, måleperiode og gruppe. De huse i kontrol- (kon.) og reduktionsgruppen (red.), som ikke medvirker i hele undersøgelsen er kun indregnet i gruppen "Alle". Følgende statistiske mål angives: antallet af huse (N), aritmetisk middelværdi (AM) og standardafvigelse (AS), geometrisk middelværdi (GM) og standardafvigelse (GS) og minimum- (Min) og maksimumkoncentration (Max). N og GS er dimensionsløse. Alle andre størrelser angives i enheden $Bq\ m^{-3}$.

Område		Vinter 1994-95				Forår-som. 1995			Vinter 1995-96		
		Alle	Rest	Kon.	Red.	Alle	Kon.	Red.	Alle	Kon.	Red.
Ramsø	N	100	76	14	7	22	14	7	21	14	7
	AM	120	83	191	325	162	138	190	250	222	307
	AS	81	40	25	33	57	45	44	90	47	129
	GM	92	69	189	323	152	131	186	236	217	279
	GS	2.4	2.3	1.1	1.1	1.4	1.4	1.3	1.4	1.2	1.7
	Min	0.3	0.3	163	276	65	65	142	101	150	101
	Max	382	162	246	382	295	222	262	516	310	516
Allinge-Gudhjem	N	80	54	16	8	26	16	8	24	16	8
	AM	161	77	198	621	241	153	412	264	245	303
	AS	211	44	25	425	176	36	224	114	89	152
	GM	101	63	197	521	200	148	359	241	229	266
	GS	2.6	2.0	1.1	1.8	1.8	1.3	1.8	1.6	1.5	1.8
	Min	10	10	171	257	81	81	176	78	113	78
	Max	1435	161	246	1435	801	204	801	603	435	603
Thisted	N	90	67	12	6	18	12	6	18	12	6
	AM	129	93	193	323	141	106	210	226	197	285
	AS	79	38	26	71	74	50	68	80	63	82
	GM	106	82	192	317	124	98	200	213	188	274
	GS	2.0	1.8	1.1	1.2	1.7	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4
	Min	10	10	162	263	65	65	113	126	126	174
	Max	448	161	244	448	291	236	291	385	300	385
Alle	N	270	197	42	21	66	42	21	63	42	21
	AM	135	85	194	437	187	134	280	249	223	299
	AS	134	41	25	295	128	46	175	97	71	122
	GM	99	71	193	385	160	126	244	231	213	273
	GS	2.3	2.0	1.1	1.6	1.7	1.4	1.7	1.5	1.4	1.6
	Min	0.3	0.3	162	257	65	65	113	78	113	78
	Max	1435	162	246	1435	801	236	801	603	435	603

højere end den estimerede årsmiddelværdi (dvs. at vinter-til-årsmiddelforholdet er 1.206). Thisted har en mere udpræget sæsonvariation med en vinterkoncentration, som er 28.4 % højere end årsmiddelværdien, og Allinge-Gudhjem har en mindre variation idet vinterkoncentrationen kun er 15.3 % højere end årsmiddelværdien. En t-test viser, at sæsonvariationen for Allinge-Gudhjem er signifikant forskellig fra den, som observeres i Thisted ($p < 1\%$). Dette er baggrunden for at beregningerne af de årsmidlede radonkoncentrationer for husene i restgruppen sker på baggrund af områdespecifikke korrektionsfaktorer. Det fremgår af Tabel 7, at enkelte huse har en sæsonvariation, som afviger markant fra gennemsnittet: Der observeres således vinter-til-årsmiddelforhold i intervallet fra 0.892 til 1.54.

Fordelingen af de husmidlede årsmiddelværdier for alle 270 huse er vist i Figur 6. Der er foretaget statistiske tests af om de vurderede årsmiddelværdier er normalfordelte eller logaritmisk normalfordelte. Disse tests gennemføres områdevis og for områderne sammenlagt. En Kolmogorov-Smirnov test af om resultaterne er konsistente med fordelingsfunktioner af normalfordelingstypen kan afvises for Allinge-Gudhjem ($p = 0.008$) og områderne sammenlagt ($p = 2 \cdot 10^{-7}$). Deri-

*Statistiske
fordelingsfunktioner*

Tabel 6. Radonkoncentration i stue og soveværelse mv. for målingerne i vinteren 1994–95 opdelt efter område og beliggenheden af stue og soveværelse. Tabellen angiver desuden den beregnede husmiddelværdi og forholdet mellem radonkoncentrationen målt i soveværelset og radonkoncentrationen målt i stuen. Følgende statistiske mål angives: antallet af huse (N), aritmetisk middelværdi (AM) og standardafvigelse (AS), geometrisk middelværdi (GM) og standardafvigelse (GM), minimum- (Min) og maksimumværdi (Max).

Område	N	Radonkoncentration [$Bq\ m^{-3}$]						Soveværelse-til-stue forhold [-]						
		Husmiddel		Stue		Sovevær.		AM	AS	GM	GS	Min	Max	
		GM	GS ^a	GM	GS ^a	GM	GS ^a							
A	Ramsø	86	101	2.0	109	2.1	86	2.2	0.88	0.40	0.79	1.71	0.1	2.7
	Al.-Gud.	55	106	2.5	114	2.7	90	2.7	0.95	0.84	0.79	1.80	0.1	6.4
	Thisted	72	125	1.8	139	1.8	104	2.0	0.84	0.37	0.75	1.66	0.1	1.7
	Alle	213	110	2.1	120	2.2	93	2.3	0.89	0.54	0.78	1.71	0.1	6.4
B	Ramsø	13	49	4.9	54	5.3	41	4.6	0.84	0.41	0.76	1.61	0.3	1.7
	Al.-Gud.	24	89	2.8	114	2.9	57	3.1	0.59	0.31	0.50	1.99	0.1	1.2
	Thisted	13	54	1.9	67	2.1	36	2.0	0.65	0.53	0.53	1.85	0.2	2.2
	Alle	50	67	3.1	82	3.3	46	3.2	0.67	0.41	0.56	1.89	0.1	2.2
Alle	Ramsø	100	92	2.4	100	2.5	78	2.6	0.88	0.40	0.78	1.69	0.1	2.7
	Al.-Gud.	80	101	2.6	115	2.7	79	2.9	0.84	0.73	0.68	1.92	0.1	6.4
	Thisted	90	106	2.0	120	2.0	86	2.2	0.81	0.39	0.72	1.69	0.1	2.2
	Alle	270	99	2.3	111	2.4	81	2.5	0.84	0.52	0.73	1.76	0.1	6.4

A: Både stue og soveværelse er beliggende i husets stueplan.

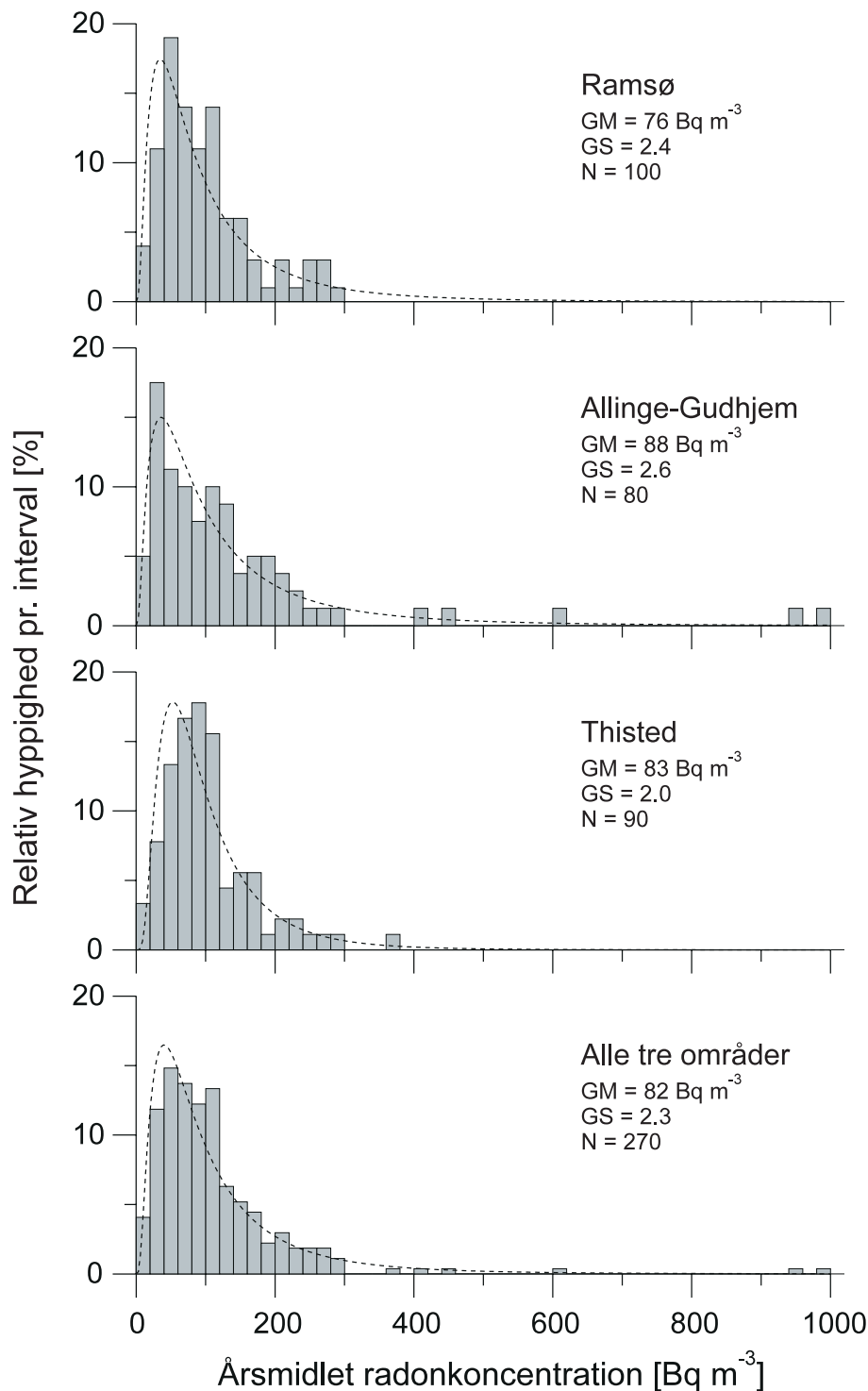
B: Stue ligger i husets stueplan og soveværelse ligger på 1. sal.

^a GS er dimensionsløs.

Tabel 7. Vinter-til-årsmiddelt forhold (defineret side 12) for de husmidlede radonkoncentrationerne inddelt efter gruppe og område. Følgende statistiske mål angives: antallet af huse (N), aritmetisk middelværdi (AM) og standardafvigelse (AS), og minimum- (Min) og maksimumværdi (Max). Alle størrelser er dimensionsløse.

Område	Gruppe	N	AM	AS	Min	Max
Ramsø	Kontrol	14	1.176	0.160	0.910	1.487
	Reduktion	7	1.266	0.121	1.124	1.458
	Kontrol+reduktion	21	1.206	0.152	0.910	1.487
Allinge-Gudhjem	Kontrol	16	1.140	0.092	1.021	1.355
	Reduktion	8	1.180	0.138	1.000	1.453
	Kontrol+reduktion	24	1.153	0.108	1.000	1.453
Thisted	Kontrol	12	1.315	0.180	0.892	1.540
	Reduktion	6	1.223	0.148	0.986	1.442
	Kontrol+reduktion	18	1.284	0.172	0.892	1.540
Alle	Kontrol	42	1.202	0.159	0.892	1.540
	Reduktion	21	1.221	0.134	0.986	1.458
	Kontrol+reduktion	63	1.208	0.151	0.892	1.540

mod kan det ikke afvises på 5 %-niveau, at resultaterne for Ramsø og Thisted er normalfordelte. En tilsvarende test mod fordelingsfunktioner af typen logaritmisk normalfordeling kan ikke afvises på 5 %-niveau for områderne separat eller sammenlagt. Resultaterne er således bedst beskrevet ved logaritmiske normalfordelinger. Sammenligninger af radonkoncentrationerne mellem områderne indbyrdes bør derfor foretages ved anvendelse af geometriske middel- og standardafvigelser,



Figur 6. Fordelingen af husmidlede årsmiddelværdier for reduktionsforanstaltningerne (uanset kælderforhold). De indtegnede fordelingsfunktioner er logaritmiske normalfordelinger svarende til de angivne parametre (se Tabel 8 nederst).

eller ved sammenligning af logaritmen til radonkoncentrationerne.

Tabel 8 sammenfatter de husmidlede årsmiddelværdier for alle 270 huse fordelt efter kælderforhold og område. Det fremgår, at husene betragtet under ét har en geometriske middelværdi og standardafvigelse på hhv. 82 Bq m⁻³ og 2.3, og at antallet af huse med en vurderet årsmiddelværdi større end 200 Bq m⁻³ er 11.8 %.

Tabel 8. Husmidlede årsmiddelværdier for radonkoncentrationen i de 270 huse, som deltog i undersøgelsens første del (vinteren 1994–95) opdelt efter kælderforhold og område. Følgende statistiske mål angives: antallet af huse (N), aritmetisk middelværdi (AM) og standardafvigelse (AS), minimum- (Min) og maksimumværdi (Max). f_{200} og f_{400} angiver procentdelen af huse, som har en vurderet årsmiddelværdi højere end hhv. 200 og 400 $Bq\ m^{-3}$.

Kælderforhold	Område	N	Radonkon. (hus-årsmidlet) [$Bq\ m^{-3}$]						f_{200} %	f_{400} %
			AM	AS	GM	GS ^a	Min	Max		
Fuld kælder	Ramsø	4	45	37	32	2.7	13	88	0	0
	Al.-Gudhjem	20	83	66	60	2.4	13	242	10.0	0
	Thisted	3	35	24	26	2.8	8	53	0	0
	Alle	27	72	61	50	2.5	8	242	7.4	0
Delvis kælder	Ramsø	3	55	49	43	2.3	24	111	0	0
	Al.-Gudhjem	26	176	188	126	2.2	29	956	15.4	11.5
	Thisted	6	149	135	100	2.8	21	369	33.3	0
	Alle	35	161	173	110	2.4	21	956	17.1	8.6
Krybekælder	Ramsø	4	54	30	47	1.9	20	93	0	0
	Al.-Gudhjem	11	88	79	58	2.8	9	265	9.1	0
	Thisted	8	93	47	81	1.8	30	167	0	0
	Alle	23	84	62	63	2.3	9	265	4.3	0
Ingen kælder	Ramsø	89	105	67	83	2.4	0	299	12.3	0
	Al.-Gudhjem	23	167	218	100	2.7	18	987	26.1	8.6
	Thisted	72	101	58	86	1.8	13	300	8.3	0
	Alle	184	111	98	86	2.2	0	987	12.5	1.1
Alle	Ramsø	100	99	67	76	2.4	0	299	11.0	0
	Al.-Gudhjem	80	138	168	88	2.6	9	987	16.3	6.3
	Thisted	90	101	65	83	2.0	8	369	8.9	0
	Alle	270	112	108	82	2.3	0	987	11.8	1.8

^a GS er dimensionsløs.

Parvise t-tests viser, at såfremt der ses bort fra kælderforhold, er der ingen statistisk signifikant forskel mellem de geometriske middelværdier for de tre områder. Eksempelvis kan det ikke på 5 %-niveau afvises, at de geometriske middelværdier er ens for Ramsø og Allinge-Gudhjem ($p = 0.3$). Stort set samme resultat opnås, dersom der tages hensyn til husenes kælderforhold. Eksempelvis kan det ikke på 5 %-niveau afvises, at gruppen af huse med fuld kælder i Ramsø har samme geometriske middelværdi som gruppen af huse med fuld kælder i Allinge-Gudhjem ($p=0.2$). Kun én af sådanne parvise sammenligninger viser en signifikant forskel mellem områderne. Gruppen af huse med delvis kælder i Ramsø har en geometrisk middelværdi, som er signifikant forskellig fra gruppen af huse med delvis kælder i Allinge-Gudhjem ($p=0.03$).

Parvise F-tests viser, at når der ses bort fra kælderforhold, er den geometriske standardafvigelse for Thisted (2.0) signifikant forskellig fra værdien for de to andre områder ($p < 0.01$). Derimod er der ingen signifikant forskel på de geometriske standardafvigelser for Ramsø og Allinge-Gudhjem.

Andel af huse over 200 og
400 $Bq\ m^{-3}$

På baggrund af de tilpassede parametre (geometrisk middelværdi og standardafvigelse) for de logaritmiske normalfordelingsfunktioner kan andelen af huse med niveauer større end 200 og 400 $Bq\ m^{-3}$ estimeres område for område. Under anvendelse af en simpel Monte Carlo teknik kan de tilhørende usikkerheder på estimaterne beregnes. De beregnede andele af huse med årsmidlede radonkoncentrationer over 200 $Bq\ m^{-3}$ er $14 \pm 3\ %$ for Ramsø, $19 \pm 4\ %$ for Allinge-Gudhjem og $10 \pm 2\ %$ for Thisted. Tilsvarende er de beregnede andele af huse med kon-

centrationer over 400 Bq m^{-3} : $3 \pm 1 \%$ for Ramsø, $6 \pm 2 \%$ for Allinge-Gudhjem og $1.1 \pm 0.6 \%$ for Thisted. Disse værdier er—bortset fra 400 Bq m^{-3} -værdien for Ramsø—i overensstemmelse med de observerede værdier for f_{200} og f_{400} , som fremgår af den nederste del af Tabel 8.

Næsten uanset hvilket mål i Tabel 8 som betragtes, fremstår Allinge-Gudhjem som det område, hvor radonbelastningen er størst. Allinge-Gudhjem har således den største geometriske middelværdi (88 Bq m^{-3}), de største enkeltniveauer, den største andel af huse med mere end 200 Bq m^{-3} (16.3%) og området er det eneste med registrerede enkeltniveauer over 400 Bq m^{-3} (6.3%). Sammenlignes områdernes geometriske middelværdier under hensyntagen til kælderforhold, overgås Allinge-Gudhjem kun af ét af de to andre områder (nemlig Thisted) for gruppen af huse med krybekælder. Som tidligere nævnt er forskellen dog ikke signifikant.

Det er uklart, hvilket af de to andre områder, som er mindst belastet. Når der ses bort fra kælderforhold, har Ramsø eksempelvis den laveste geometriske middelværdi (76 Bq m^{-3}), mens Thisted har det mindste antal af huse med niveauer over 200 Bq m^{-3} (8.9%).

Sammenligninger mellem områderne

Årsmiddelværdier før og efter reduktionsforanstaltningerne

Figur 7 viser de vurderede årsmiddelværdier før og efter tiltagene for de enkelte huse i reduktions- og kontrolgrupperne. Den øvre del af figuren viser årsmiddelværdien for husene sorteret efter niveau. Den usikkerhed, som iht. Appendix D er tilskrevet de enkelte vurderinger, er vist på graferne. I den nedre del af figuren er husenes vurderede årsmiddelværdier *efter* reduktionstiltagene vist. Rækkefølgen af husene er her den samme som i den øvre del af figuren, så det er muligt at danne sig et vist overblik over variationen fra det ene år til det andet.

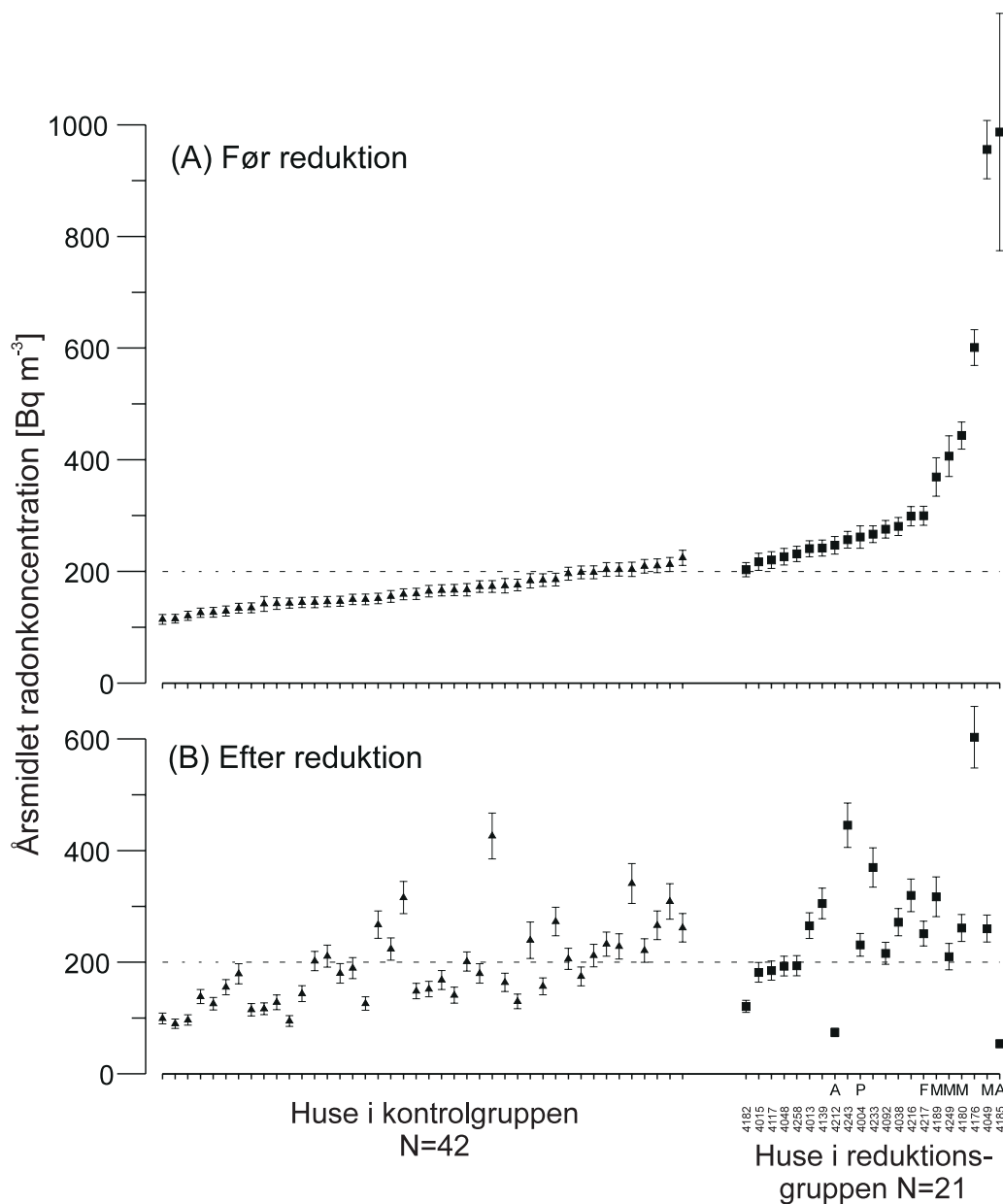
Det fremgår af den øvre del af figuren, at grænseniveauet mellem kontrolgruppe og reduktionsgruppe er omkring 200 Bq m^{-3} . I den nedre del af figuren ses det, at det i undersøgelsen kun er lykkedes at bringe tre af husene i reduktionsgruppen markant under 200 Bq m^{-3} -grænsen, og at to af husene i reduktionsgruppen efter tiltagene har vurderede årsmiddelværdier over 400 Bq m^{-3} .

Det fremgår desuden af figuren, at de vurderede årsmiddelværdier for husene i kontrolgruppen ingeniende er konstante fra år til år. I flere tilfælde er årsmiddelværdierne markant højere for vinteren 1995–96 i forhold til vinteren 1994–95. I et tilfælde er den vurderede årsmiddelværdi f.eks. steget fra omkring 180 Bq m^{-3} til 420 Bq m^{-3} . Tilsvarende er den vurderede årsmiddelværdi for andre huse i kontrolgruppen faldet markant. Når effekten af de forskellige reduktionstiltag skal vurderes, er det således af afgørende betydning, at der tages hensyn til, at radonkoncentrationen i et givet hus i reduktionsgruppen kan have ændret sig fra det ene år til det andet af grunde, som intet har med reduktionsforanstaltningerne at gøre.

Vinter-til-vinterforhold

Kontrolgruppehusene har i gennemsnit signifikant forskellige vinterkoncentrationer før og efter reduktionsforanstaltningerne ($p = 0.026$).

Det fremgår af Tabel 9, at for husene i kontrolgruppen er vinterkoncentrationen i gennemsnit 14.9% højere i 1995–96 i forhold til 1994–95. Samme tabel viser, at vinter-til-vinter forholdet for husene i kontrolgruppen i gennemsnit antager forskellige værdier i de tre områder: I Thisted har husene i gennemsnit stort set den samme koncentration i de to vintre; det observerede vinter-til-vinter forhold er her 1.007. I Allinge-Gudhjem er radonkoncentrationen i gennemsnit 23.8% højere i vinteren 1995–96 i forhold til vinteren 1994–95. Variationen fra hus til



Figur 7. Vurderede hus-årsmiddelværdier for radonkoncentrationen før og efter reduktionstiltagene. Resultaterne er sorteret efter koncentrationen før tiltagene. De angivne usikkerhedsintervaller er beregnet som anført i Appendiks D. Identifikationsnumrene for de enkelte huse i reduktionsgruppen er vist under x-aksen. Desuden er der angivet et bogstav for huse med aktivt sug under terrændæk (A), passivt sug under terrændæk (P), membrandækning (F) og mekanisk udsugning (M). De huse i reduktionsgruppen, hvor der alene blev opsat udeluftventiler, er ikke markeret.

hus er imidlertid større end variationen fra område til område. Hypotesen, om at vinter-til-vinter forholdet er ens for de tre områder, kan således ikke afvises på 5 %-niveau (t-test). Ved beregningen af reduktionsforanstaltningernes effektivitet (se side 78) anvendes derfor en fælles værdi på 1.149 for vinter-til-vinter forholdet.

Tabel 9. Vinter-til-vinter forhold (defineret side 12) for de husmidlede radonkoncentrationer inddelt efter gruppe og område. Følgende angives: antallet af huse (N), aritmetisk middelværdi (AM) og standardafvigelse (AS), og minimum- (Min) og maksimumværdi (Max). Alle størrelser er dimensionsløse.

Område	Gruppe	N	AM	AS	Min	Max
Ramsø	Kontrol	14	1.169	0.234	0.845	1.673
	Reduktion	7	0.959	0.432	0.300	1.734
	Kontrol+reduktion	21	1.099	0.319	0.300	1.734
Allinge-Gudhjem	Kontrol	16	1.238	0.480	0.660	2.465
	Reduktion	8	0.688	0.404	0.054	1.262
	Kontrol+reduktion	24	1.055	0.520	0.054	2.465
Thisted	Kontrol	12	1.007	0.249	0.778	1.453
	Reduktion	6	0.894	0.261	0.594	1.386
	Kontrol+reduktion	18	0.969	0.252	0.594	1.453
Alle	Kontrol	42	1.149	0.357	0.660	2.465
	Reduktion	21	0.837	0.381	0.054	1.734
	Kontrol+reduktion	63	1.045	0.391	0.054	2.465

Reduktionseffektivitet

De beregnede reduktionseffektiviteter for de 21 huse i reduktionsgruppen fremgår af Tabel 10. Tabellen er inddelt efter typen af reduktionstiltag og disses effektivitet. Det fremgår af tabellen, at reduktionstiltagens effektivitet ligger i intervallet fra 95 % og nedefter.

En test af hypotesen af om at de observerede reduktionseffektiviteter for de enkelte huse er mindre end eller lig med den gennemsnitlige reduktionseffektivitet for kontrolgruppen² (t-test med forudsat ens varians) kan kun afvises for 4 af husene i reduktionsgruppe; nemlig, hus nr. 4185 ($p = 0.002$), 4212 ($p = 0.01$), 4049 ($p = 0.01$) og 4249 ($p = 0.04$). Det er altså kun for disse huse, at det med stor sikkerhed kan hævdes, at reduktionsforanstaltningerne har haft en målbar effekt. I de 19 andre huse i reduktionsgruppen kan det ikke på 5 %-niveau afvises, at reduktionsforanstaltningerne har været virkningsløse eller at de ligefrem har øget radonkoncentrationen. Sidstnævnte er muligvis tilfældet for husene nr. 4139, 4233 og 4243.

Reduktionsforanstaltningernes effektivitet er yderligere illustreret i Figur 8. Figuren viser, at ordnet efter stigende (gennemsnitlig) effektivitet optræder typerne af tiltag i følgende rækkefølge:

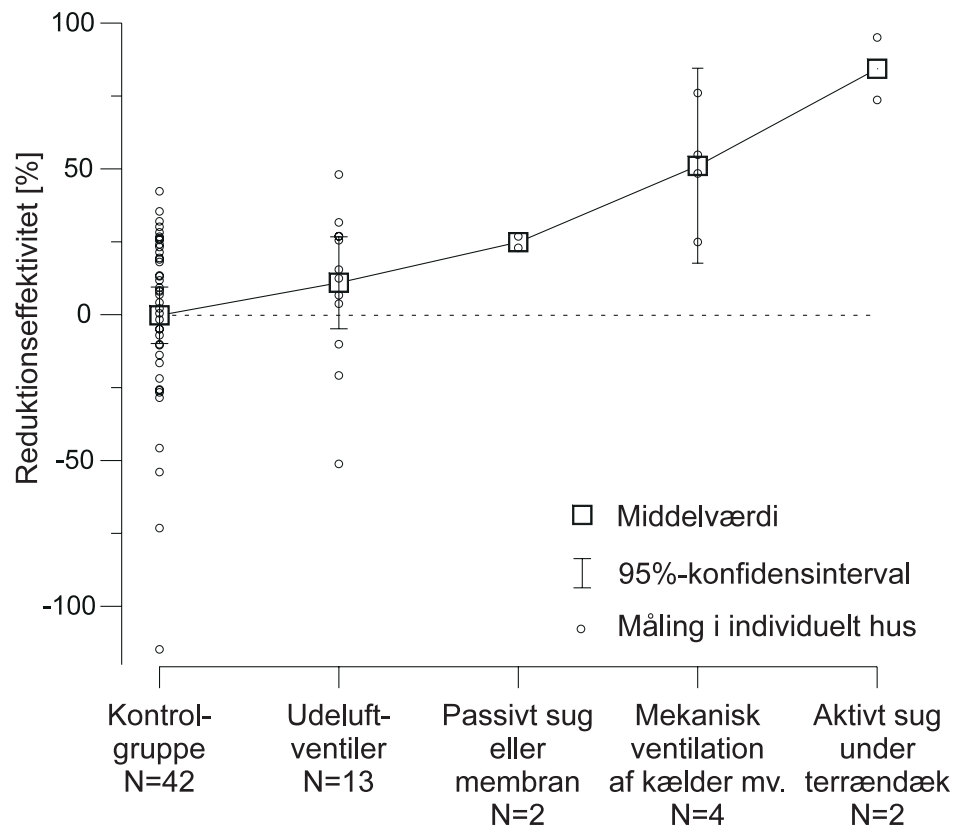
- opsætning af udeluftventiler har en gennemsnitlig effektivitet på 11 % ($N=13$),
- passivt sug under terrændæk eller membrandækning af gulv har en gennemsnitlig effektivitet på 25 % ($N=2$),
- mekanisk udsugning i ubeboede kælderum og lign. har gennemsnitlig effektivitet på 51 % ($N=4$) og
- aktivt sug under terrændæk har en gennemsnitlig effektivitet på 85 % ($N=2$).

Figur 8 viser desuden resultaterne for husene i kontrolgruppen. Disse huse har definitionsmæssigt har en gennemsnitlig reduktionseffektivitet på 0 %.

²Det kan måske virke meningsforstyrrende at tale om "reduktionseffektiviteter" R_v for kontrolgruppehusene, idet der jo netop ikke blev foretaget nogen reduktionsindgreb i disse huse. Meningen er blot, at R_v beregnes for hvert enkelt hus, ganske som havde det været et hus i reduktionsgruppen (se Appendiks C). Definitionsmæssigt vil gennemsnitsværdien af R_v for kontrolgruppen være lig 0 %, så det interessante er, hvor stor variationen er fra hus til hus. Som det fremgår af Figur 8 er der en stor spredning omkring $R_v=0$ %.

Reduktionseffektiviteten for individuelle huse

Reduktionseffektiviteten for grupper af huse



Figur 8. Reduktionseffektiviteter for de undersøgte grupper af tiltag. N er antallet af huse i hver gruppe. 95 %-konfidensintervallet for gruppemiddelværdien er anført for de grupper, som indeholder mere end to huse.

For de huse hvor der (alene) opsættes udeluftventiler, er der foretaget en statistisk analyse af, om husene *i gennemsnit* har forskellig radonkoncentration i de to vintre, og om ændringen i givet fald er forskellig fra den, der blev observeret for husene i kontrolgruppen. Analysen viser, (1) at det kan ikke afvises på 5 %-niveau, at radonkoncentrationen i husene med opsatte udeluftventiler var uændret eller steg fra vinteren 1994–95 til vinteren 1995–96, og (2) at det heller ikke kan afvises, at reduktionseffektiviteten for husene med opsatte udeluftventiler var ”ringere” end for kontrolgruppen. Der kan altså hverken påvises en statistisk signifikant effekt af de opsatte udeluftventiler når det enkelte hus (jf. ovenfor) eller den samlede gruppe af huse med opsatte udeluftventiler betragtes.

En tilsvarende analyse viser, at for gruppen af huse med membrandækning af gulv eller passivt sug under terrændæk er der ingen påviselig reduktionseffekt ($p = 0.13$; $N = 2$). Det er derimod tilfældet for gruppen af huse med mekanisk udsugning i ubeboede kælderrum og lign. ($p = 0.001$; $N = 4$) og for gruppen af huse med aktivt sug under terrændæk ($p = 0.0002$; $N = 2$).

Hus nr.	Tiltag	Radon før reduktion Vinter 1994-95 [Bq m ⁻³]		Radon før reduktion Forår-sommer 1995 [Bq m ⁻³]		Radon efter reduktion Vinter 1995-96 [Bq m ⁻³]		Radon årsmiddel Husværdi [Bq m ⁻³]		Reduktions- effektivitet [-]
		Stue	Sov.	Stue	Sov.	Stue	Sov.	Før	Efter	
4185	Aktivt sug	1500±460	1300±400	590 ± 50	490±40	90 ±10	70 ±10	990±210	50 ± 10	0.95 ±0.02
4212	Aktivt sug	390 ± 40	290 ± 30	220 ± 20	90 ±10	110±10	90 ±10	250±20	70 ± 10	0.74 ±0.09
4049	Mekanisk udsug	1800±150	380 ± 30	1400±110	210±20	550±50	50 ±10	960± 50	260± 20	0.76 ±0.08
4249	Mekanisk udsug	460 ± 70	410 ± 70	400 ± 40	350±30	240±20	210±20	410± 40	210± 20	0.55 ±0.16
4180	Mekanisk udsug	630 ± 50	340 ± 30	560 ± 50	250±20	330±30	250±20	440± 20	260± 20	0.49 ±0.17
4189	Mekanisk udsug	700 ±100	200 ± 30	450 ± 50	130±20	520±50	250±30	370± 30	320± 40	0.25 ±0.26
4217	Membran	430 ± 40	300 ± 30	250 ± 20	220±20	340±30	270±20	300± 20	250± 20	0.27 ±0.24
4004	Passivt sug	400 ± 40	360 ± 40	140 ± 20	150±20	330±30	340±30	260± 20	230± 20	0.23 ±0.26
4182	Udeluftventiler	350 ± 30	240 ± 20	140 ± 10	80 ±10	240±20	100±10	200± 10	120± 10	0.48 ±0.17
4092	Udeluftventiler	420 ± 40	230 ± 20	260 ± 20	190±20	320±30	190±20	280± 20	220± 20	0.32 ±0.22
4117	Udeluftventiler	270 ± 30	280 ± 30	170 ± 20	160±20	220±20	240±20	220± 10	180± 20	0.27 ±0.24
4258	Udeluftventiler	330 ± 30	220 ± 20	220 ± 20	150±20	300±30	160±20	230± 10	190± 20	0.27 ±0.24
4015	Udeluftventiler	280 ± 30	230 ± 30	200 ± 20	160±20	260±20	170±20	220±20	180± 20	0.27 ±0.25
4048	Udeluftventiler	250 ± 30	330 ± 30	150 ± 10	180±20	230±20	270±20	230± 10	190± 20	0.26 ±0.25
4038	Udeluftventiler	410 ± 40	260 ± 20	170 ± 20	280±30	410±40	240±20	280± 20	270± 20	0.16 ±0.28
4176	Udeluftventiler	610 ± 50	600 ± 50	560 ± 50	640±50	610±50	590±50	600± 30	600± 60	0.13 ±0.29
4216	Udeluftventiler	340 ± 30	330 ± 30	250 ± 20	270±30	360±30	360±30	300± 20	320± 30	0.07 ±0.31
4013	Udeluftventiler	420 ± 40	220 ± 20	190 ± 20	140±10	420±40	280±30	240± 10	270± 20	0.04 ±0.32
4139	Udeluftventiler	190 ± 20	420 ± 40	170 ± 20	180±20	220±20	560±50	240± 10	310± 30	-0.10±0.36
4233	Udeluftventiler	310 ± 30	220 ± 20	300 ± 30	240±20	360±30	370±30	270± 20	370± 40	-0.21±0.40
4243	Udeluftventiler	420 ± 40	180 ± 20	350 ± 30	90 ±10	630±50	400±30	260± 10	450± 40	-0.51±0.50

Table 10. Resultater af målinger og beregninger af vinter-reduktionseffektiviteter for husene i reduktionsgruppen.

4.3 Ventilationsmålinger

Måleperioder Der blev foretaget ventilationsmålinger af ca. 2 ugers varighed i alle huse i reduktionsgruppen i foråret 1995, dvs. før iværksættelsen af reduktionsforanstaltninger og i næsten alle huse i reduktionsgruppen i foråret 1996, dvs. efter indgrebene. Som vist i Tabel 11 blev målingerne ikke foretaget helt samtidig i de tre områder. Eksempelvis, foregik hovedparten af målingerne foråret 1996 i Thisted i perioden 11. til 24. marts, mens målingen samme år i Ramsø var centreret omkring første halvdel af april. Måleperioderne for de enkelte huse fremgår af Appendiks E.

Hovedresultater Tabel 12 sammenfatter de målte luftskifter områdevis. En t-test (parvis dobbelt stikprøve) viser, at på 5%-niveau er der områdevis signifikante forskelle mellem udeluftskifterne for de to perioder for Ramsø, Allinge-Gudhjem og de tre områder sammenlagt. Forskellen er derimod ikke signifikant for Thisted ($p=10\%$).

Tabel 11. Gennemsnitlige perioder for ventilationsmålingerne i de tre områder.

Område	Forår 1995	Forår 1996
Ramsø	30.03.95–22.04.95	01.04.96–17.04.96
Allinge-Gudhjem	11.04.95–23.04.95	16.03.96–04.04.96 ^a
Thisted	06.04.95–22.04.95	11.03.96–24.03.96

^a Undtaget måling i hus nr. 4249, som grundet særlige omstændigheder foregik i perioden 25.05.96–06.06.96.

Tabel 12. Sammenfatning af målinger af luftskiftet i husene i reduktionsgruppen i de tre områder i foråret 1995 og 1996. Hus nr. 4013 og 4049 indgår ikke i tabellen, da der i disse huse ikke blev målt luftskifte i begge perioder. AM og AS er hhv. aritmetisk middelværdi og standardafvigelse.

Område	Antal huse ^a	Luftskifte [h^{-1}]			
		Forår 1995		Forår 1996	
		AM	AS	AM	AS
Ramsø	6	0.34	0.09	0.42	0.10
Allinge-Gudhjem	7	0.34	0.09	0.44	0.14
Thisted	6	0.22	0.06	0.29	0.12
Alle	19	0.30	0.10	0.39	0.13

^a Antal huse, hvor der blev foretaget ventilationsmålinger i begge de angivne perioder.

Tabel 13. Sammenfatning af målinger af luftskiftet i de huse i reduktionsgruppen, hvor der som eneste reduktionsforanstaltning blev opsat udeluftventiler. Hus nr. 4013 indgår ikke i tabellen, da der i dette hus ikke blev målt luftskifte i begge perioder. AM og AS er hhv. aritmetisk middelværdi og standardafvigelse.

Område	Antal huse ^a	Luftskifte [h^{-1}]			
		Forår 1995		Forår 1996	
		AM	AS	AM	AS
Ramsø	4	0.36	0.10	0.45	0.10
Allinge-Gudhjem	4	0.32	0.11	0.37	0.14
Thisted	4	0.22	0.07	0.27	0.14
Alle	12	0.30	0.11	0.36	0.14

^a Antal huse, hvor der blev foretaget ventilationsmålinger i begge de angivne perioder.

Tabel 14. Ventilationsmålinger i husene i reduktionsgruppen i foråret 1995 og i foråret 1996.

Hus	Luftskifte [h^{-1}]		Zoneopdelt udeluftskifte [h^{-1}]		
	Forår 1995	Forår 1996	Zone	Forår 1995	Forår 1996
4004	0.27±0.02	0.28±0.03	Stue, køkken, bryggers Soveværelse, 3 værelser	0.22 0.34	0.33 0.23
4013	0.23±0.03	^a	Hele huset ex. udestue Udestue	0.20 0.36	^a ^a
4015	0.44±0.09	0.47±0.11	Oprindeligt hus Tilbygning	0.51 0.13	0.51 0.34
4038	0.36±0.04	0.49±0.06	Stue, køkken, bryggers Soveværelse, 4 værelser	0.49 0.20	0.53 0.45
4048	0.29±0.06	0.35±0.05	Stue, spisestue, køkken Soveværelse, 2 værelser	0.26 0.35	0.36 0.33
4049	0.21±0.06	^b	Huset, ubenyttet rum Kælder	0.15 0.90	^b ^b
4092	0.47±0.07	0.50±0.14	Stue, spisepl., køkken Soveværelse Arbejdsværelse, vær.	0.34 0.81 1.09	0.40 0.71 1.02
4117	0.38±0.04	0.56±0.07	Stue, køkken, værelse Soveværelse, børnevær.	0.40 0.31	0.85 0.46
4139	0.31±0.05	0.34±0.07	Stue, køkken Soveværelse, 2 værelser	0.44 0.11	0.49 0.11
4176	0.17±0.02	0.18±0.03	Stue, køkken Soveværelse, 3 værelser	0.16 0.18	0.11 0.22
4180	0.37±0.07	0.59±0.11	Stueetage 1. sal (et rum) Kælder	0.39 0.30 0.37	0.73 0.35 0.44
4182	0.25±0.06	0.42±0.06	Stue, køkken, bryggers Soveværelse, 3 værelser	0.25 0.24	0.50 0.34
4185	0.34±0.07	0.46±0.17	Pejsestue, stue, køkken Soveværelse, 2 værelser	0.25 0.45	0.52 0.40
4189	0.23±0.02	0.28±0.04	Stue, køkken, kontor Soveværelse, 2 værelser Kælder	0.28 0.19 0.16	0.26 0.26 0.37
4212	0.32±0.08	0.45±0.08	Stue, spisestue Soveværelse, vær. Køkken, bryggers, vær.	0.19 0.17 0.53	0.41 0.13 0.60
4216	0.37±0.06	0.38±0.04	Stue Soveværelse, 3 værelser	^c ^c	0.41 0.35
4217	0.24±0.04	0.37±0.08	Stue, spisestue, køkken 4 værelser, mellemgang	0.28 0.21	0.44 0.31
4233	0.12±0.01	0.15±0.02	Stue, spiseafd., køkken Soveværelse, 3 værelser	0.17 0.06	0.22 0.08
4243	0.22±0.04	0.35±0.12	Stue, køkken, bryggers 2 soveværelser, kontor	0.19 0.26	0.27 0.43
4249	0.42±0.06	0.56±0.13 ^d	Stueetage, 1. sal Kælder	0.29 ^d 0.72 ^d	0.35 ^d 1.07 ^d
4258	0.20±0.03	0.15±0.02	Stue, spisestue, køkken Soveværelse, 2 værelser	0.26 0.13	0.19 0.09

^a Ikke målt. ^b Kasseret på grund af målefejl. ^c De målte sporgaskoncentrationer tillader ikke beregning af zoneluftskifter. ^d Denne måling blev foretaget i perioden 25.05.96–06.06.96, altså væsentlig senere end de øvrige huse.

Tabel 13 indeholder alene data for de huse, hvor opsætning af udeluftventiler blev anvendt som den eneste form for reduktionsmetode. For alle tre områder er luftskiftet steget fra foråret 1995 til 1996. Imidlertid er forskellen mellem udeluftskifterne ikke signifikant forskellig (5 %-niveau) inden for nogen af områderne. Betragtes områderne under et kan der dog påvises en signifikant forskel ($p=1.1\%$) mellem udeluftskifterne i de to perioder.

Tabel 14 viser såvel totalluftskifte som zoneopdelte udeluftskifter for hvert enkelt hus. Udeluftskiftet for en zone er beregnet som forholdet mellem udelufttilførslen til zonen og zonenets nettovolumen. Samtlige målinger er gennemført som 2- eller 3-zone målinger. I tidligere bredt tilrettelagte undersøgelser, hvor blandt andet fugtforholdene i boliger har været undersøgt, har voksen-soveværelset konsekvent været betragtet som en separat zone [Be94^b]. I denne undersøgelse, hvor

Enkeltmålinger og zoneopdeling

Tabel 15. Supplerende ventilationsmålinger i hus nr. 4185 og 4249 i forbindelse med tænd/sluk undersøgelser af effekten af forskellige former for mekanisk udsugning. Målingerne beskrives nærmere i forbindelse med Figur 12 side 38 og Figur 14 side 40.

Hus	Luftskifte [h ⁻¹]			Bemærkninger
	Udsugning tændt	Udsugning slukket	Udsugning tændt	
4185 ^a	0.46	0.38	0.46	Aktivt sug under terrændæk
4249 ^b	0.56	0.58	1.05	Mekanisk udsugning i kælder

^a Målingerne blev foretaget i perioden 15.03.96–01.05.96. ^b Disse målinger blev foretaget meget sent; nemlig i perioden 25.05.96–18.07.96. Målingerne afspejler derfor muligvis husets brug snarere end om den mekaniske ventilation var tændt eller slukket.

Supplerende ventilationsmålinger

indtrængning af radon er i fokus, har kælderen, i de tilfælde, hvor huset indbefatter en sådan, været betragtet som en separat zone, hvorimod zoneopdeling i øvrigt har været mindre konsekvent. Zoneopdeling har navnlig været foretaget på baggrund af en naturlig sektionering af det enkelte hus (f.eks. oprindeligt hus/tilbygning) eller på grundlag af beboernes brug og indretning af huset (f.eks. opholdsafdeling/soveafdeling/kontor eller voksenafdeling/børneafdeling). Den foretagne zoneopdeling i det enkelte hus har været den samme ved de to målinger gennemført i henholdsvis foråret 1995 og foråret 1996.

Der er gennemført supplerende ventilationsmålinger i to huse i forbindelse med såkaldte tænd/sluk undersøgelser af mekanisk udsugning. Disse omtales nærmere på side 36. Målingerne er gennemført i forlængelse af hinanden og i umiddelbar forlængelse af den ordinære måling. Den ordinære måling er foretaget, mens den mekaniske udsugning var i drift, hvorimod den første supplerende måling er foretaget, mens den mekaniske udsugning var slukket. Den anden supplerende måling er foretaget, mens udsugningen atter var i drift. Tabel 15 sammenfatter resultaterne.

4.4 Supplerende undersøgelser

Meteorologiske data

Meteorologi for radonmålingerne

Tabel 16 sammenfatter de meteorologiske forhold for områderne i de tre perioder, hvor der blev foretaget radonmålinger. Måleperiodernes start og ophør fremgår af Tabel 4 side 20. Da vurderingen af reduktionsforanstaltningernes effektivitet primært bygger på en sammenligning af radonmålinger i de to vinterperioder, er det af interesse, at kunne vurdere i hvilken udstrækning de to vinterperioder havde samme meteorologiske forhold.

Det fremgår af tabellen, at vinteren 1995–96 adskiller sig markant fra vinteren 1994–95. I forhold til den forudgående vinter var vinteren 1995–96 væsentlig koldere (5 °C), den havde en 9 % lavere gennemsnitlig vindhastighed, den globale indstråling var dobbelt så stor og nedbørsmængden var omkring 75 % lavere. Disse forhold gør sig stort set gældende i hvert af de tre områder.

Snedække

DMI's dagsobservationer for graden af snedække ved Roskilde Lufthavn ved Tune benyttes som indikator for sneforholdene igennem undersøgelsen. Der er således ikke indhentet sneedata for de tre måleområder specifikt. Ved Roskilde Lufthavn var der i vinteren 1994–95 20 dage med sne i perioden 27.12.94–01.02.95, mens der i vinteren 1995–96 var sne i omkring 72 dage i perioden 04.11.95–30.03.96. De akkumulerede snehøjder³ var 92 cm for vinteren 1994–95 og 648 cm for vinteren 1995–96.

³Snehøjden registres hver morgen, og de her angivne akkumulerede snehøjder er blot summen af disse daglige observationer.

Tabel 16. Aritmetiske middelværdier af meteorologiske parametre (døgnværdier) svarende til de perioder, hvor der blev foretaget radonmålinger. Måleperioderne fremgår af Tabel 4 side 20.

Område	Vintermåling 1994–95	Forår-sommer måling 1995	Vintermåling 1995–96
Udetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]			
Ramsø	2.2	10.5	-2.8
Allinge-Gudhjem	3.3	9.5	-0.9
Thisted	3.0	9.5	-2.5
Vindhastighed [m s^{-1}]			
Ramsø	5.1	3.8	4.7
Allinge-Gudhjem	9.2	6.9	8.5
Thisted	6.5	5.2	5.7
Global indstråling [W m^{-2}]			
Ramsø	20	202	39
Allinge-Gudhjem	17	218	37
Thisted	17	211	32
Middelnedbør [mm d^{-1}]			
Ramsø	2.4	1.4	0.64
Allinge-Gudhjem	2.2	1.3	0.79
Thisted	2.6	1.3	0.41

Tabel 17. Aritmetiske middelværdier af meteorologiske parametre (døgnværdier) svarende til de perioder, hvor der i de tre områder blev foretaget ventilationsmålinger. Det bemærkes, at målingerne ikke foregik samtidigt i de tre områder (se Tabel 11 side 30).

Område	Forårsmåling 1995	Forårsmåling 1996
Udetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]		
Ramsø	4.7	(2.6) ^a
Allinge-Gudhjem	4.9	0.5
Thisted	5.0	-0.68
Vindhastighed [m s^{-1}]		
Ramsø	4.9	(6.2) ^a
Allinge-Gudhjem	7.1	7.2
Thisted	6.0	6.6
Global indstråling [W m^{-2}]		
Ramsø	130	(190) ^a
Allinge-Gudhjem	166	118
Thisted	169	69
Middelnedbør [mm d^{-1}]		
Ramsø	2.4	(1.0) ^a
Allinge-Gudhjem	1.6	0.8
Thisted	0.87	0.0

^a De angivne tal er for målestationerne på Bornholm, da der fejlagtigt ikke blev rekvireret data til undersøgelsen for Ramsø for den angivne periode.

Tabel 18. Målinger af radon i brugsvand i 20 huse i reduktionsgruppen. N angiver antallet af huse i de enkelte områder, hvor der blev udtaget vandprøver fra vandhaner i køkken, toiletrum eller bryggers. N_0 angiver antallet af huse, hvor vandprøven indeholdt radon over analysemetodens detektionsgrænse (2 Bq L^{-1}). AM og AS angiver den aritmetiske middelværdi og standardafvigelse af de N_0 målinger, som var over detektionsgrænsen.

Område	Prøvetagningsdage	N	N_0	Radon i vand [Bq L^{-1}]		
				AM	AS	Max
Ramsø	07.08.95	7	1	2	-	2
Allinge-Gudhjem	26.06.95–27.06.95	6	6	13	4	16
Thisted	29.06.95	6	0	-	-	<2

Tabel 19. Målinger af radonkoncentrationen i jorden omkring 19 huse i reduktionsgruppen. AM og AS angiver hhv. aritmetisk middelværdi og standardafvigelse.

Område	Prøvetagningsdage	Antal huse	Antal prober	Dybde [cm]		Radon i jordluft [kBq m^{-3}]	
				AM	AS	AM	AS
Ramsø	07.08.95	6	16	84	14	33.2	14.3
Al.-Gudhjem	26.06.95–27.06.95	7	17	88	18	60.2	26.9
Thisted	29.06.95	6	17	84	17	5.6	2.0

Meteorologi for ventilationsmålingerne

De meteorologiske forhold for de perioder, hvor der blev foretaget ventilationsmålinger, fremgår af Tabel 17. Måleperioderne start og ophør i de tre områder fremgår af Tabel 11 side 30. Det ses af Tabel 17, at der bl.a. er væsentlige forskelle mellem udetemperaturerne i de to perioder. Eksempelvis gælder det for Thisted, at udetemperaturen ved forårsmålingen i 1996 var $5.7 \text{ }^\circ\text{C}$ lavere end ved forårsmålingen i 1995.

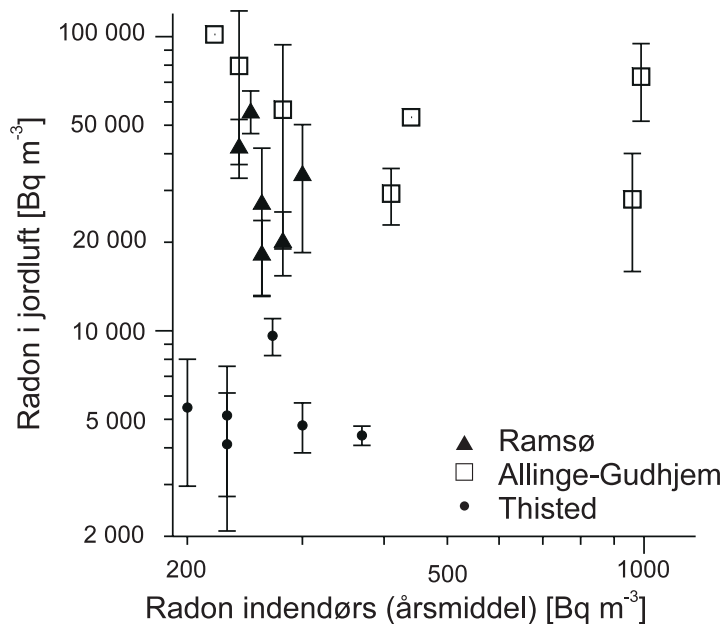
Radonmålinger i vand

Tabel 18 sammenfatter SIS's målinger af radon i brugsvand. Der blev foretaget målinger i alle huse i reduktionsgruppen undtaget hus nr. 4049 og 4176. Med en enkelt undtagelse var radonniveauet i vandet for alle målinger i Ramsø og Thisted under analysemetodens detektionsgrænse (2 Bq L^{-1}). For Allinge-Gudhjem var der i alle tilfælde detekterbare radonkoncentrationer til stede. I gennemsnit var radonniveauet i Allinge-Gudhjem 13 Bq L^{-1} .

Radonmålinger i jordluft

Med undtagelse af hus nr. 4117 og 4176 blev der udtaget jordluftprøver på grundarealerne for alle huse i reduktionsgruppen. Som det fremgår af Tabel 19 blev der i alt udtaget 50 jordluftprøver fordelt på 19 huse. Målingerne for de enkelte huse fremgår af Appendiks E. Pga. jordens hårdhed og den til rådighed værende tid for prøvetagningen lykkedes det kun i 12 tilfælde at etablere proberne i den ønskede dybde på 1 m (se Figur 4 side 15). Dette er af betydning, da radonkoncentrationen kan forventes at afhænge af dybden under jordoverfladen [An92], således at jo tættere på jordoverfladen der måles, des lavere bliver måleværdien. Prøvetagningen foregik dog i alle tilfælde mindst 54 cm under terræn, og i gennemsnit fra dybden 85 cm. Til trods for de geologiske forskelle mellem områderne, var der ingen signifikant forskel mellem den gennemsnitlige prøvetagningsdybde for de tre områder

Måledybder



Figur 9. Jordluftens radonindhold ca. 0.85 m under overfladen som funktion af den årsmidlede indendørs radonkoncentrationer for 19 huse i reduktionsgruppen. For huse, hvor der er foretaget måling mere end et sted omkring huset, er den observerede standardafvigelse angivet på figuren som usikkerhedsinterval omkring middelværdien af målingerne.

(se Tabel 19), så det kan ikke af den grund afvises, at det er meningsfuldt at sammenligne de målte jordluft-radonkoncentrationer for de tre områder. Det fremgår af Tabel 19, at koncentrationen var 5.6 kBq m^{-3} for Thisted, 33 kBq m^{-3} for Ramsø og 60 kBq m^{-3} for Allinge-Gudhjem. Radonkoncentrationen i jordluften (midlet over 1–3 luftprøver udtaget forskellige steder på husets grund) er vist i Figur 9 som funktion af husenes indendørs årsmiddelværdi. Det ses, at der ikke er en klar sammenhæng mellem jordluftens radonniveau og radonkoncentrationen indendørs.

Kontinuerte radonmålinger mv.

I 1995 (dvs. før reduktionsforanstaltningerne blev gennemført) blev der foretaget kontinuerte radonmålinger i følgende huse i reduktionsgruppen: 4004 (43 dage), 4038 (122 dage), 4185 (75 dage), 4189 (122 dage), 4217 (83 dage) og 4249 (123 dage). Disse målinger blev foretaget med én monitor i stuen i hvert hus. Efter iværksættelsen af reduktionsforanstaltningerne blev der foretaget såkaldte tænd/sluk undersøgelser (se senere) med kontinuerte målinger af radonkoncentrationen i husene: 4185 (53 dage), 4189 (21 dage) og 4249 (99 dage). Denne gang blev der anvendt to eller tre monitører i hvert hus, således at radonkoncentrationen i forskellige rum kunne måles samtidig. Disse undersøgelser blev desuden ledsaget af kontinuerte målinger af udendørstemperaturen i husenes umiddelbare nærhed.

I tre huse blev der i foråret 1995 foretaget kontinuerte radonmålinger i perioder, som stort set faldt sammen med de tidsmidlede radonmålinger med sporfolieteknikken (se afsnit 4.2). Disse resultater kan derfor umiddelbart sammenlignes. Det fremgår af Tabel 20, at målingerne med de kontinuerte monitører gav gennemsnitlige radonkoncentrationer, som var højere end de tilsvarende resultater fra sporfoliemetoden. For hus nr. 4185 er afvigelsen omkring en faktor 2. Kilden til denne afvigelse diskuteres nærmere side 59.

Sammenligning med sporfoliemetode

Tabel 20. Samtidige målinger af radonkoncentrationen i tre huse i foråret-sommeren 1995 foretaget med hhv. kontinuerte radonmonitører og sporfolie.

Hus	Kontinuerte radonmonitører		Radonmålinger med sporfolie		
	Periode	Radonkon. i stuen (middel) Bq m ⁻³	Periode (Risø datoer)	Radonkon.	
				Stue Bq m ⁻³	Sovevær. Bq m ⁻³
4004	25.04.95–08.06.95	210	06.04.95–09.06.95	140±20	150±20
4185	11.04.95–26.06.95	1300	06.04.95–28.06.95	590±50	490±40
4217	07.04.95–29.06.95	290	06.04.95–27.06.95	250±20	220±20

Tabel 21. Reduktionseffektiviteter for tre huse i foråret-sommeren 1996 beregnet ud fra tænd/sluk undersøgelser med kontinuerte radonmonitører sammenlignet med reduktionseffektiviteter beregnet for vinterforhold vha. radonmålingerne foretaget med sporfolieteknikken og korrektion for naturlige variationer på baggrund af resultaterne for husene i kontrolgruppen.

Hus	Kontinuerte radonmonitører					Vinter-reduktions-effektivitet %
	Periode	Middel Rn i stue/sovevær.			Reduktions-effektivitet %	
		Tændt Bq m ⁻³	Slukket Bq m ⁻³	Tændt Bq m ⁻³		
4185	08.03.96–01.05.96	113	735	87	86	95±2
4189	08.02.96–29.02.96	492	559	509	11	25±26
4249	01.05.96–08.08.96	179	389	99	64	55±16

Tidslige variationer

Et af formålene med de kontinuerte radonmålinger var at undersøge, om de tidsmæssige variationer for huse med relativt høje radonniveauer ville være væsentligt forskellige fra, hvad der ellers er målt i Danmark [Ma88]. Som et eksempel viser Figur 10 radonkoncentrationen målt i den første uge af maj i 1995 i tre huse—ét i hver af de tre områder. Det ses af figuren, at radonkoncentrationen indendørs er meget varierende, men at der typisk (især mandag til fredag) forekommer en klar døgnrytme med maksimum tidligt om morgenen (kl. 5–7) og minimum om eftermiddagen. Hus nr. 4217 har desuden et lokalt maksimum omkring kl. 13.

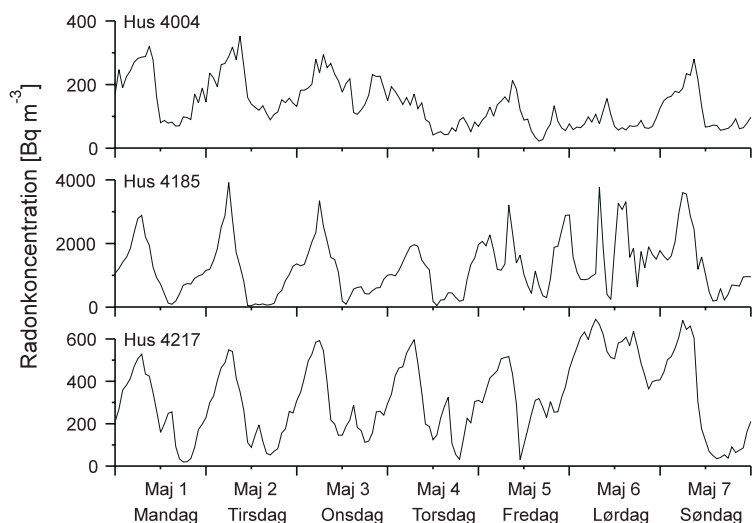
Figur 11 viser sammenhørende værdier for radonkoncentrationen i stuen og den indendørs-udendørs temperaturforskelle. Det ses, at der er en klar sammenhæng mellem radonkoncentrationen og temperaturforskellen. Der er ikke i undersøgelsen foretaget en nøjere bestemmelse af, hvilken del af variabiliteten af radonkoncentrationen indendørs, der kan forklares ved ændringer i temperatur, vind, atmosfæretryk, husets brug eller andre forhold.

Tænd/sluk undersøgelser

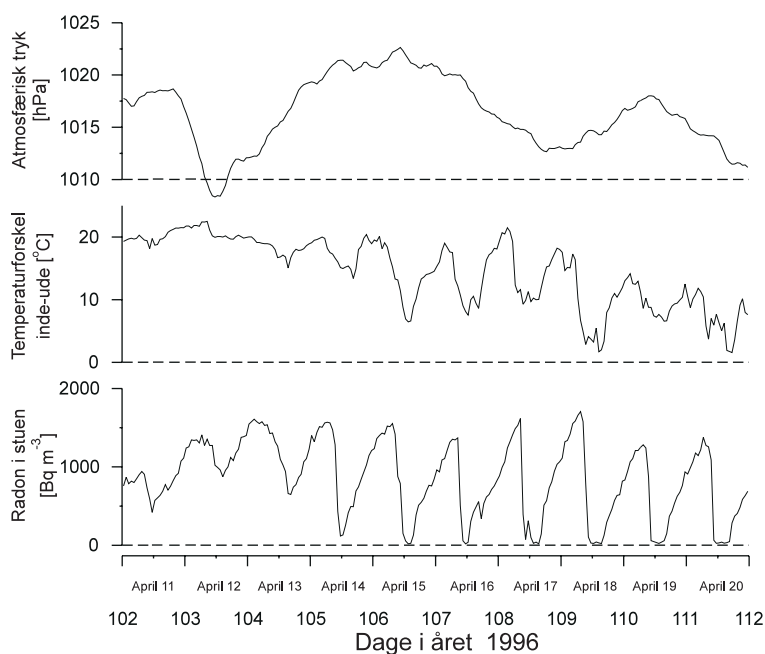
I tre huse (et med aktivt sug under terrændæk og to med mekanisk udsugning fra kælder) blev der i 1996 gennemført såkaldte tænd/sluk undersøgelser. Ved disse undersøgelser var anlæggene først tændt, dernæst slukket og derefter tændt igen. Resultaterne fremgår af Figurene 12, 13 og 14. Det ses af figurene, at tiltagene i husene nr. 4185 og 4249 har en markant reducerende indflydelse på radonkoncentrationen i husenes beboelsesdele. For hus nr. 4189 kan man derimod ikke umiddelbart se nogen effekt.

Alternativ beregning af reduktionseffektivitet

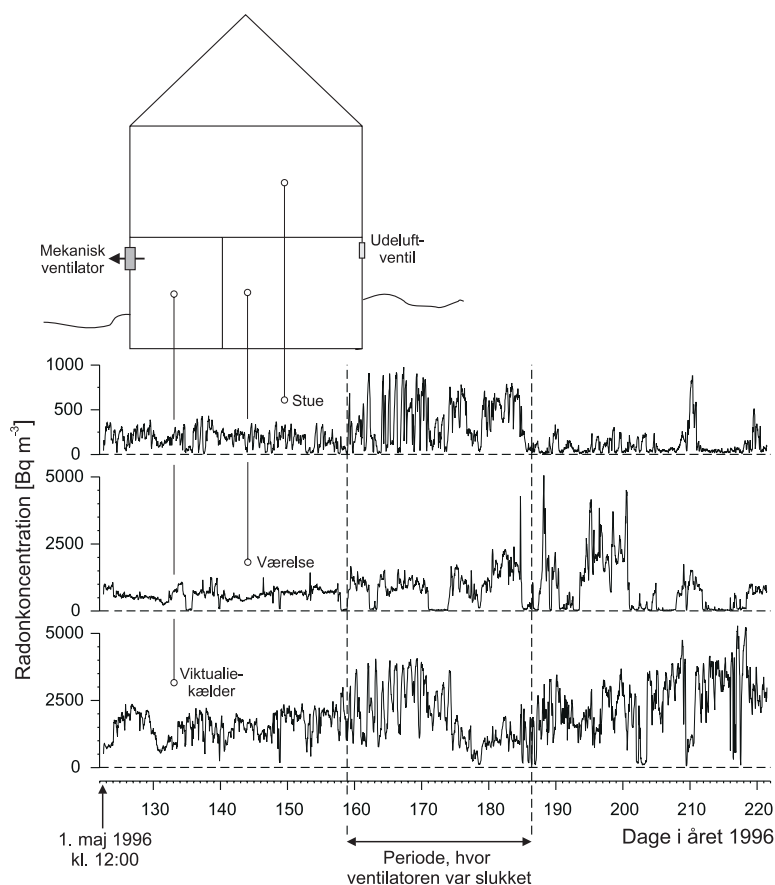
De gennemsnitlige radonkoncentrationer for tænd- og slukperioderne giver mulighed for beregning af tiltagenes reduktionseffektivitet. Denne beregning gennemføres på en måde, der helt svarer til metoden for sporfoliemålingerne (se side 79), idet der i dette tilfælde dog ikke korrigeres for naturlige variationer og lign. Tabel 21 viser de beregnede reduktionseffektiviteter baseret på hhv. de kontinuerte radonmålinger og vintermålingerne af radonkoncentrationen vha. sporfolieteknikken. Det ses, at der er god overensstemmelse mellem resultaterne.



Figur 10. Samtidige målinger af radonkoncentrationen i tre huse (hus nr. 4004, 4185 og 4217) – et i hver af undersøgelsens tre områder. Målingerne foregik i den første uge af maj 1995, og alle målinger blev foretaget i stuen.



Figur 11. Kontinuerte målinger af atmosfæretryk, indendørs-udendørstemperaturforskelle og radonkoncentration i stuen for hus nr. 4185 i perioden fra den 11. til den 20. april 1996. Bemærk, at variationen af radonkoncentrationen i stor udstrækning følger temperaturændringerne. Ændringer i det atmosfæriske tryk ser ikke ud til at spille nogen væsentlig rolle for indtrængningen af radonholdig jordluft til huset i forhold til indtrængning af jordluft forårsaget af andre drivkræfter. Målingerne er foretaget efter at det aktive sug under terrændæk var sat op, men i den angivne periode var anlægget slukket. De viste radonmålinger indgår også i Figur 14.

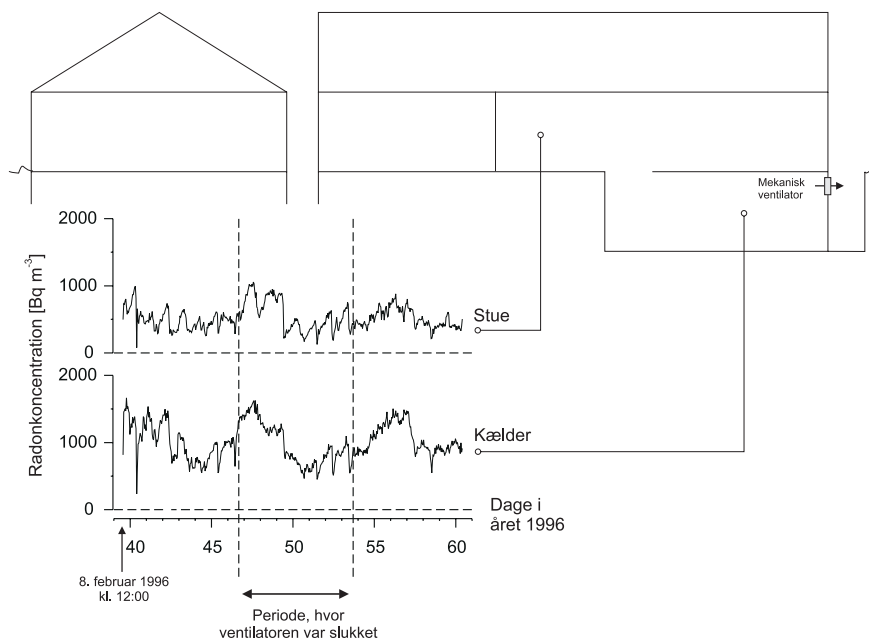


Figur 12. Tænd/sluk undersøgelse i hus nr. 4249. Målingerne strækker sig fra den 1. maj (dag nr. 122) til 8. august 1996. Den mekaniske ventilator var tændt i hele perioden på nær fra den 6. juni til den 4. juli. Bemærk, at den mekaniske udsugning har en klart reducerende indvirkning på radonkoncentrationen i stuen (dvs. i husets egentlige beboelsesdel). Der er derimod ingen umiddelbar sammenhæng mellem radonkoncentrationen i de tre rum. Dog var radonkoncentrationen normalt højest i viktualiekælderen og lavest i stuen. For dag nr. 120–159 var radonkoncentrationen i gennemsnit 1554, 600 og 179 Bq m^{-3} for hhv. viktualiekælderen, kælderværelset, og stuen. For dag nr. 159–186 var den gennemsnitlige koncentration de samme steder 1944, 914 og 389 Bq m^{-3} . For dag 186–219 var de tilsvarende værdier hhv. 2397, 811 og 99 Bq m^{-3} .

Radon-, tryk- og strømningsforhold for hus med aktivt sug under terrændæk

Ved afslutningen den 1. maj 1996 af tænd/sluk undersøgelsen i hus nr. 4185 (se Figur 14) blev der foretaget en række supplerende undersøgelser vedr. virkemåden af det aktive sug under terrændæk. Som antydnet i Figur 14 har anlægget tre sugesteder under huset. Der hører en lodret kanal til hver af disse sugesteder. På loftet samles kanalerne til én kanal, som i det følgende betegnes som *centerkanalen*. Ventilatoren er monteret i denne kanal; se Figur 15.

Den første del af undersøgelserne foregik på husets loft. Som vist i Figur 15(a), blev en del isoleringsmateriale omkring rørene aftaget, så målinger af tryk, strømningshastighed og radon i rørsystemet kunne foretages. Eksempelvis, kunne det vha. et differensmanometer konstateres, at undertrykket var 120 Pa i kanalen under normal drift i forhold til rumluften. Dette var i overensstemmelse med visningen på kontrolmanometret i bryggerset, se Figur 15(b).



Figur 13. Tænd/sluk undersøgelse i hus nr. 4189. Målingerne strækker sig fra 8. til 29. februar 1996. Den mekaniske ventilator var tændt i hele perioden på nær fra den 15. til 22. februar. Det var ikke nogen umiddelbar effekt af tilkoblingen af den mekaniske udsugning på radonkoncentrationen i kælder eller stue. Time for time var radonkoncentrationen højere i kælderen i forhold til stuen, og i mange tilfælde skete ændringerne af radonkoncentrationen de to steder synkront. Som antydnet på figuren er der en mere end 2 m² stor trappeåbning mellem stue og kælder. For perioden 8.–15. februar var den gennemsnitlige radonkoncentration i stue og kælder hhv. 492 og 1010 Bq m⁻³. For perioden 22.–29. februar var koncentrationen de samme steder hhv. 509 og 1049 Bq m⁻³. For mellemprioden fra den 15.–23. februar var de tilsvarende værdier 559 og 966 Bq m⁻³.

Dernæst blev radonkoncentrationen i centerkanalen bestemt. En tynd PVC slange blev stukket ca. 25 cm ind i kanalen, og der blev udtaget 3 luftprøver. Disse blev analyseret vha. scintillationscellemetoden, og radonkoncentrationen i centerkanalen blev bestemt til at være 3.6 ± 0.3 kBq m⁻³ under normal drift (dvs. ved 120 Pa). Suget blev herefter indstillet til 170 Pa, og vha. et pitotrør blev den maksimale lufthastighed målt til at være (1) 5–6 m s⁻¹ i centerkanalen, (2) < 1 m s⁻¹ i kanalen, som fører til suget under soveværelset, og (3) 3.5 ± 0.5 m s⁻¹ for kanalen, som bringer luft fra husets to andre sugesteder. Da tværsnitsarealet af kanalen er ca. 0.011 m² kan det beregnes, at den totale volumenstrøm i centerkanalen var ca. 220 m³ h⁻¹ ved 170 Pa. Under hensyntagen til at målingerne blev gennemført under meget simple forhold⁴ er dette resultat i acceptabel overensstemmelse med ventilatorens specifikationer, som angiver volumenstrømmen til 230 m³ h⁻¹ ved 0 Pa (dvs. fritblæsende) og 140 m³ h⁻¹ ved 170 Pa. Det vurderes, at ved normal drift (120 Pa) er volumenstrømmen i det pågældende anlæg ca. 150 m³ h⁻¹.

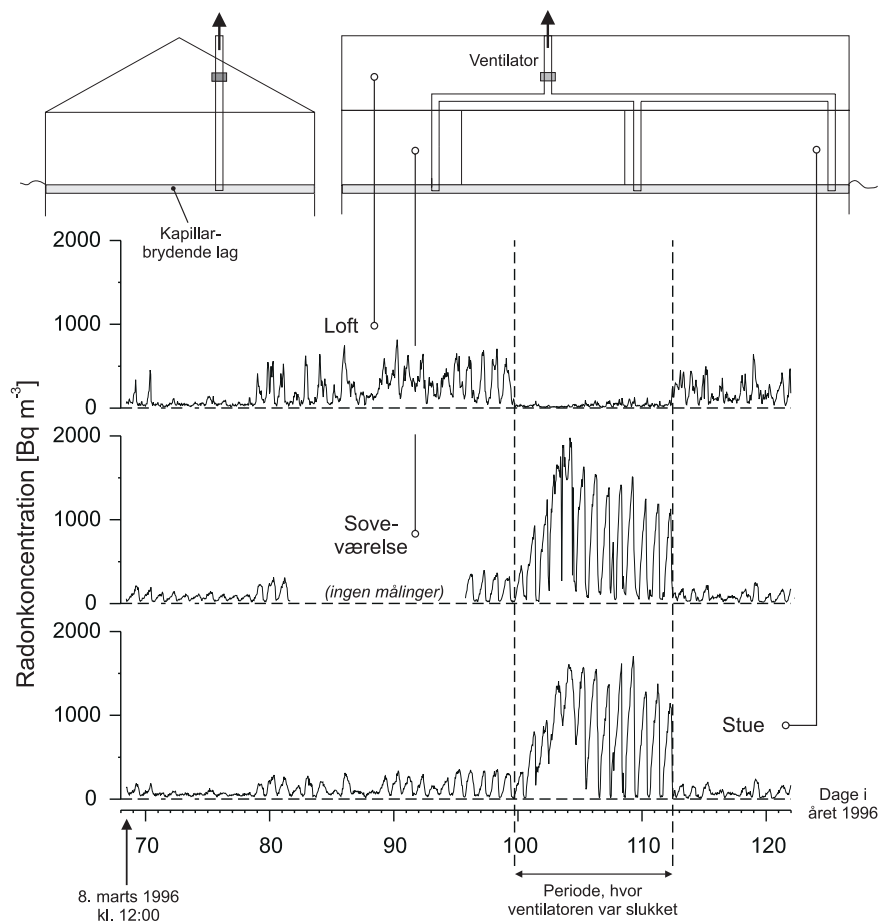
Som vist i Figur 16 blev der etableret 8 jordprober R1–R8 omkring huset. Disse jordprober, som var af typen som vist i Figur 4 side 15, gjorde det muligt, at udtage jordluftprøver 1 m under terræn. Der blev foretaget målinger af radonkoncentrationen i alle prober, og resultaterne fremgår af Figur 16. Det ses, at radonkoncentrationen ca. 50 cm fra fundamentets yderkant var omkring 7 kBq m⁻³, mens radonkoncentrationen længere væk fra huset var 70–100 kBq m⁻³. Som sam-

⁴Bl.a. måtte pitotrøret indsættes tæt på rørbøjninger og samlinger.

Radonkoncentration i kanal

Lufthastighed i kanal

Radon i jordluft



Figur 14. Tænd/sluk undersøgelse i hus nr. 4185. Målingerne strækker sig fra den 8. marts (dag nr. 68) til den 1. maj 1996 (dag nr. 122). Det aktive sug under terrændæk var tændt i hele perioden på nær fra den 8. til 21. april. Bemærk, at radonkoncentrationen på loftet var høj (i gennemsnit 200 Bq m^{-3}) når det aktive sug var tændt og lav (40 Bq m^{-3}) når det var slukket. For radonkoncentrationen i stue og soveværelse var forholdene omvendt, således at radonkoncentrationen der straks faldt, når suget blev tændt. Bemærk ligeledes, at radonkoncentrationen i stue og soveværelse varierede synkront, og havde samme størrelse. Med suget slukket var radonkoncentrationen i stue og soveværelse i gennemsnit hhv. 719 og 751 Bq m^{-3} . Med suget tændt var koncentrationen de samme steder 110 og 115 Bq m^{-3} for den første del af perioden (8. marts til 8. april) og 88 og 85 Bq m^{-3} for den sidste del af perioden (21. april til 1. maj).

menligningsgrundlag indeholder figuren også radonmålingerne fra sommeren 1995 (dvs. før der var opsat aktivt sug under terrændæk). Disse prober er markeret som probe RA, RB og RC i Figur 16. Der ses af figuren, at der ikke var væsentlig forskel mellem resultaterne for RA–RC (1995) og R7–R8 (1996).

Trykkoblinger

Som et sidste element i undersøgelsen blev der foretaget en opmåling af trykket i proberne i forhold til atmosfæren⁵. Med 170 Pa sug på anlægget kunne undertrykket i probe R4 bestemmes til $3.3 \pm 0.5 \text{ Pa}$. Ved frakobling af terrændækssuget kunne det tilsvarende konstateres, at undertrykket i probe R4 faldt til $0.0 \pm 0.3 \text{ Pa}$. Det kunne således påvises, at der var en markant trykkobling på lidt under 2 % ($3.3 / 170$) mellem terrændækssuget og jorden omkring probe R4. For de øvrige prober kunne der ikke med sikkerhed konstateres nogen trykkobling.

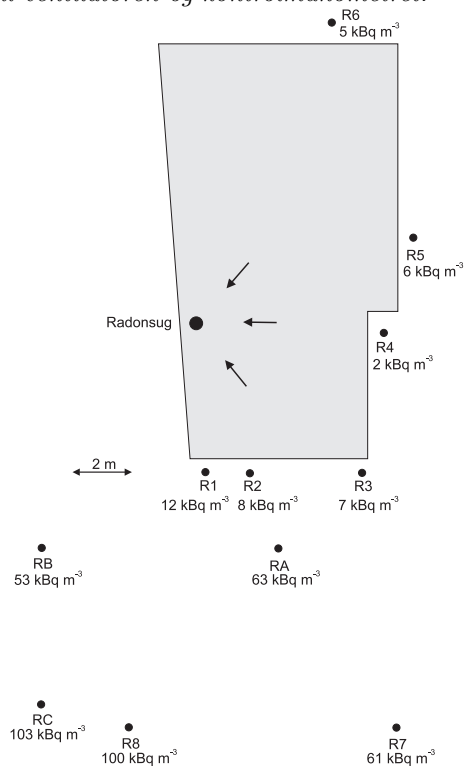
⁵For at minimere indflydelsen af vindpåvirkninger blev differenstrykmålingerne foretaget i forhold til en referenceprobe placeret i de øverste jordlag 10 m fra huset.



(a) Udsugningssystem på loft

(b) Reguleringsenhed

Figur 15. Systemkomponenter i hus nr. 4185 til sug under terrændæk. Den lyse plastfatning øverst i (a) er kanalventilatoren. Denne er også markeret på hussskitzen i Figur 14. På billedet er isoleringsmaterialet midlertidig krænget af. (b) viser reguleringsenheden til ventilatoren og kontrolmanometret.



Figur 16. Skitse (set fra oven) af placeringen af prober i jorden omkring hus nr. 4185. Figuren viser kun en del af husets bygningsareal. Alle prober er placeret i 1 m's dybde. Tallene ved hver probe viser målte radonkoncentrationer i jordluften. For proberne RA, RB og RC blev målingerne foretaget den 26. juni 1995 dvs. før installationen af det aktive sug (disse resultater indgår i Tabel 19). Målingerne i proberne R1–R8 blev foretaget den 1. maj 1996.

5 Diskussion

Diskussionen er inddelt i tre dele. Den første del omhandler generelle aspekter vedr. radon og radonindtrængning. På basis af de indledende målinger i 270 huse diskuteres eksempelvis områdernes radonbelastning i forhold til Danmark som helhed. Diskussionens anden del omhandler effektiviteten af de afprøvede reduktionsforanstaltninger. For hver type af tiltag diskuteres den observerede effekt bl.a. på basis af tiltagens (teoretiske) virkemåde og de erfaringer, som er gjort i tidligere undersøgelser. Endelig afsluttes kapitlet med en diskussion af gyldigheden af de anvendte undersøgelsesmetoder.

5.1 Områdernes radonforhold

Kilder og indtrængningsmekanismer

Radon i vand

Målingerne af radonkoncentrationen i brugsvand var i Ramsø og Thisted under detektionsgrænsen, og i Allinge-Gudhjem var alle målinger mindre end 20 Bq L^{-1} . Anvendelse af radonholdig brugsvand indendørs (f.eks. ved brusebad og tøjvask) giver anledning til afgang af radon fra vandet til rummet. Overslagsmæssigt kan man regne med at forholdet mellem husets og vandets radonkoncentration er i størrelsesordenen $1 : 10\,000$ [He88]. En radonkoncentration i vandet på 20 Bq L^{-1} kan således forventes at bidrage med omkring 2 Bq m^{-3} til radonkoncentrationen indendørs. Dette bidrag er uden betydning i sammenligning med andre kilder til radon i indendørsluften. Denne undersøgelse bekræfter således tidligere vurderinger [SIS87^a], at vand ikke generelt kan anses for at være en vigtig kilde til indendørs radon i Danmark. Det kan dog forsat ikke udelukkes, at der faktisk eksisterer huse (f.eks. huse som forsynes med vand fra private brønde), hvor radonkoncentrationen i vandet er af betydning for indeklimaet eller hvor radon i drikkevandet kan være uacceptabel højt af andre grunde⁶.

Radon i jordluft

Poreluftmålingerne i dybden 50–100 cm under terræn på grundarealerne for huse i reduktionsgruppen bekræfter, at områderne Ramsø og Allinge-Gudhjem har et højt radonpotentiale. For Ramsø var den gennemsnitlige koncentration 36 kBq m^{-3} , mens den i Allinge-Gudhjem var 55 kBq m^{-3} . I Allinge-Gudhjem målte flere steder koncentrationer over 100 kBq m^{-3} . I Thisted var poreluftkoncentrationen væsentligt lavere end i de to andre områder. I gennemsnit var koncentrationen 6 kBq m^{-3} og maksimumkoncentrationen var 11 kBq m^{-3} . De observerede forskelle mellem poreluftkoncentrationerne i de tre områder afspejler sandsynligvis geologiske forskelle mellem områderne (se Appendiks B): De højeste værdier findes i Ramsø og Allinge-Gudhjem, idet moræneler og grundfjeld indeholder forhøjede koncentrationer af radium-226. I Thisted, som domineres af opsprækket kalk, er der derimod relativt mindre radium-226 i selve kalken (se side 76). I Thisted findes hovedkilden til radon sandsynligvis i mineraler og lerarter i sprækker og forkastningszoner i kalken.

En alternativ forklaring på at jordluft-radonkoncentrationerne i Thisted var væsentligt lavere end i de to andre områder kunne dog også være, at den opsprækkede kalk giver anledning til et anderledes prøvetagningsmønster sammenlignet med de to andre områder [An95]. Eksempelvis kunne prøvetagningen være under indflydelse af sprækker fra prøvetagningskaviteten til jordens overflade. Risø har god erfaring med jordluftmålinger i moræneler og tilsvarende jordarter, men det er

⁶Radonholdigt drikkevand kan forårsage optagelse af radon i en del af kroppen, hvilket kan tænkes at forøge risikoen for forskellige former for kræft. Først og fremmest er det mave-tarmkanalen, som i den forbindelse udsættes for bestråling fra radon og radons henfaldsprodukter. I flere lande er der indført eller stillet forslag til grænseværdier for radon i vand omkring $100\text{--}1000 \text{ Bq L}^{-1}$ afhængig af vandets anvendelse.

første gang at Risø anvender metoden på kalk. Der er ikke inden for projektet foretaget undersøgelser af disse forhold, men det vides, at en ofte forekommende fejlkilde ved målinger af jordluft radon netop er selve prøvetagningen [Hu95]. Det skal dog nævnes, at resultaterne understøttes af tidligere målinger udført af SIS i et kalkområde på Mors [Da88]. I den undersøgelse blev medianværdien af 24 jordluftmålinger i omkring 50 cm's dybde bestemt til at være 4.5 kBq m^{-3} .

Undersøgelsen viste, at der ikke er en simpel sammenhæng mellem radonkoncentrationen målt i jordluften i 1 m's dybde omkring husene og radonkoncentrationen inde i husene (se Figur 9 side 35). Undersøgelsen demonstrerer således, at det er vanskeligt at gøre meningsfulde forudsigelser vedr. radonniveauet i givne huse på baggrund af sådanne jordluftmålinger.

Der blev ikke foretaget målinger af, i hvilket omfang byggematerialer og udeluft bidrager til radonkoncentrationen i de undersøgte huse. Men på baggrund af tidligere undersøgelser [Ul84, SIS87^b, An96^b] må det antages, at advektiv og diffusiv indtrængning af radon fra jorden er den helt dominerende kilde til indendørs radon i husene i kontrol- og reduktionsgruppen.

En tilbagevendende diskussion i forbindelse med radonindtrængning fra jord til huse omhandler mekanismerne for indtrængning, dvs. om indtrængningen f.eks. sker ved diffusion igennem betondæk mv. eller advektivt som følge af jordluftstrømning i revner i betondækket [Na88^c, Wa93, Ga94^a, An96^a]. For huse med høje niveauer, anses advektion for at være den dominerende indtrængningsmekanisme [Na92]. At dette er en rimelig beskrivelse støttes af denne undersøgelse, idet membranafdækningen af 70 % af gulvarealet i hus nr. 4217 gav en reduktion af radonniveauet i huset, som var væsentlig lavere end 70 %. Et tilsvarende argument er anvendt af Nazaroff og Doyle [Na85]. Disse forhold diskuteres nøjere side 58.

Undersøgelsen bekræfter tidligere observationer, at radonkoncentrationen indendørs varierer på flere tidsskalaer: igennem døgnet (normalt med maksimum tidligt om morgenen), ugen (med særlige radonforhold mandag til fredag i forhold til lørdag-søndag), året (normalt med maksimum om vinteren) og fra år til år (normalt med maksimum i strenge vintre). Disse variationer må tilskrives ændringer i radonindtrængning og udeluftskifte forårsaget af ændringer af lokalklimaet (primært udetemperatur og vindpåvirkninger), beboervaner (udluftninger) og jorden under husene (fugtforhold herunder grundvandsspejlets dybde). Det er ikke muligt umiddelbart at bestemme den relative betydning af disse effekter, da disse i flere tilfælde er kobledede. Eksempelvis "hjælpes" den fine sammenhæng mellem indendørs radon og inde-udetemperaturforskellen i Figur 11 på vej af, at husets beboere dagligt foretager regelmæssige udluftninger morgen og formiddag. Desuden skal det bemærkes, at årsagen til at vinter-til-årsmiddelforholdet er lav for Allinge-Gudhjem i sammenligning med de to andre områder (se side 21) kan være, at huse af terrændækstypen ikke forekommer så hyppigt i det udvalgte område i Allinge-Gudhjem som i Ramsø og Thisted (se Tabel 2 side 18). Det vides fra en tidligere dansk undersøgelse [Ma92], at terrændækhuse har en mere udtalt radon-sæsonvariation end f.eks. krybekælderhuse eller huse med fuld kælder.

Sammenligninger mellem områderne

De tre områder repræsenterer tre forskellige former for geologi. Som gennemgået i Appendiks B omfatter forskellene både områdernes kildestyrke (radiumkoncentration) og disses evne til at lede luft (dvs. gaspermeabiliten). Samtidig er det dog vigtigt af være opmærksom på at områderne også på anden vis adskiller sig fra hinanden. Bl.a. er byggeskikken forskellig (se afsnit 4.1). Radonmæssige forskelle mellem husmålingerne i de tre områder behøver derfor ikke nødvendigvis at afspejle geologiske forhold.

Da de højeste værdier for radon i brugsvand såvel som poreluft blev målt i

Andre kilder

Diffusion versus advektion

Tidslige variationer

Allinge-Gudhjem og da den opsprækkede granit formodes at have gode egenskaber for gastransport, er det forventeligt, at dette område har den højeste radonbelastning indendørs. Som nævnt side 25 fremstår Allinge-Gudhjem da også som det område, hvor radonbelastningen er størst. Eksempelvis, er Allinge-Gudhjem det eneste område, hvor der er registreret huse med årsmiddelværdier større end 400 Bq m^{-3} . Imidlertid har det ikke været muligt at påvise, at de tre områder på væsentlige punkter adskiller sig statistisk signifikant sig fra hinanden. Dette gælder også, hvis der foretages sammenligninger under hensyntagen til husenes konstruktion mod jord. Kun for grupperne af huse med delvis kælder betragtet isoleret kan en signifikant forskel påvises, nemlig mellem de geometriske middelværdier for Allinge-Gudhjem og Thisted. For andre kælderforhold er der ingen signifikante forskelle mellem områdernes geometriske middelværdier.

Områdernes radonniveauer i dansk perspektiv

Det er muligt at sammenligne resultaterne for denne undersøgelse med hvad der blev fundet i den repræsentative landsdækkende undersøgelse af naturlig stråling i danske boliger [SIS87^b]. Ved tolkningen af sådanne sammenligningsresultater er det, som i det forudgående afsnit, vigtigt at være opmærksom på at eventuelle forskelle mellem undersøgelsesresultaterne kan hidrøre fra bl.a. måletekniske, geologiske, meteorologiske og byggetekniske forskelle. Et godt udgangspunkt for det følgende er derfor at sammenligne undersøgelsesresultater, hvor disse forhold formodes at have været nogenlunde ens.

Morænelersmålinger

En sådan indledende sammenligning kan foretages på baggrund af Tabel 22. Tabellen indeholder hovedresultaterne for radonmålingerne i morænelersområdet i Ramsø i vinteren 1994–95 og målingerne i vinteren 1985–86 i huse placeret på moræneler forskellige steder i Danmark [SIS87^b]. Den øvre del af tabellen omhandler alle undersøgelsesernes huse⁷, mens den nedre del kun omhandler målinger i terrændækhuse. De gennemsnitlige udetemperaturer var stort set ens i de to måleperioder: $2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ for målingerne i Ramsø (se Tabel 16) og $1.6 \text{ }^\circ\text{C}$ for den landsdækkende undersøgelse. Det fremgår af tabellen, at der kun er omkring 10 % forskel mellem de geometriske middelværdier for målingerne i Ramsø og den landsdækkende undersøgelse. Når alle huse medtages er den geometriske middelværdi højest i Ramsø. Når kun terrændækhuse betragtes, har Ramsø den laveste geometriske middelværdi. En statistisk analyse viser, at forskellene ikke er statistisk signifikante ($p \approx 0.5$). Det kan således hævdes, at der er god overensstemmelse mellem denne undersøgelse og den landsdækkende, såfremt sammenligningen foretages på grundlag af sæt af huse med nogenlunde ens geologiske, meteorologiske og byggetekniske forhold.

Områderne vs. Danmark som helhed

Hovedresultaterne for de årsmidlede radonniveauer i enfamiliehuse i den landsdækkende undersøgelse fremgår af Tabel 23. Disse resultater kan direkte sammenlignes med indeværende undersøgelse, som resumeret i Tabel 8 side 24. Sammenligningen viser, at den geometriske middelværdi for husene i Ramsø er 45 % højere end den geometriske middelværdi for det repræsentative landsdækkende resultat. De tilsvarende værdier for Allinge-Gudhjem og Thisted er 69 % og 60 %. Statistiske tests viser, at de nævnte forskelle alle er signifikante ($p < 10^{-5}$). De udvalgte områder har således højere gennemsnitlige radonkoncentrationer end landet som helhed. Tabellerne viser desuden, at antallet af huse med vurderede årsmiddelværdier over 200 Bq m^{-3} er markant højere i hver af de tre områder i forhold til landet som helhed. Eksempelvis vurderes det, at 16.3 % af husene i

⁷I Ramsø var omkring 90 % uden nogen form for kælder (se Tabel 2), mens det tilsvarende tal var omkring 44 % for husene på moræneler i den landsdækkende undersøgelse. For vintermålingen i den landsdækkende undersøgelse blev det fundet at huse uden kælder eller med delvis kælder havde højere radonkoncentrationer end huse med fuld kælder eller krybekælder.

Tabel 22. Sammenligning mellem vintermålinger af radonkoncentrationen i morænelersområdet i Ramsø (denne undersøgelse) og Danmark som helhed [SIS87^b]. De to første rækker omfatter alle huse uanset kælderforhold. De to nederste rækker indeholder kun terrændækhuse. *N* er antallet af huse. *AM* er aritmetisk middelværdi, og *GM* og *GS* er hhv. geometrisk middelværdi og standardafvigelse.

Område	Måleperiode	Radonkoncentration vintermåling [Bq m ⁻³]			
		<i>N</i>	<i>AM</i>	<i>GM</i>	<i>GS</i> ^a
Huse på moræneler i Ramsø uanset kælderforhold (denne undersøgelse)	25.11.94–30.01.95 (67 dage)	100	120	92	2.4
Huse på moræneler i Danmark generelt uanset kælderforhold [SIS87 ^b]	01.10.85–31.03.86 (180 dage)	106	118	85	2.2
Huse på moræneler i Ramsø uden kælder (denne undersøgelse)	25.11.94–30.01.95 (67 dage)	89	127	99	2.4
Huse på moræneler i Danmark generelt uden kælder [SIS87 ^b]	01.10.85–31.03.86 (180 dage)	46	144	108	2.2

^a *GS* er dimensionsløs.

Tabel 23. Resultater fra den repræsentative landsdækkende undersøgelse i 1985–86 [SIS87^b]. Værdierne er årsmidlede husværdier (middelværdi af måling i stue og soveværelse) for tilfældigt valgte danske enfamiliehuse, som anvendes til helårsbolig. Resultaterne kan direkte sammenlignes med Tabel 8 side 24. *N* er antallet af huse. *AM* og *AS* er hhv. aritmetisk middelværdi og standardafvigelse. *GM* og *GS* er hhv. geometrisk middelværdi og standardafvigelse. *Min* og *Max* angiver de mindste hhv. største målinger. *f*₂₀₀ og *f*₄₀₀ angiver procentdelen af huse, som har en vurderet årsmiddelværdi højere end hhv. 200 og 400 Bq m⁻³.

Område	<i>N</i>	Radonkon. (hus-årsmidlet) [Bq m ⁻³]						<i>f</i> ₂₀₀ %	<i>f</i> ₄₀₀ %
		<i>AM</i>	<i>AS</i>	<i>GM</i>	<i>GS</i> ^a	<i>Min</i>	<i>Max</i>		
Danmark generelt [SIS87 ^b]	348	68	63	52	2.0	10	560	3.2	0.6

^a *GS* er dimensionsløs.

det udvalgte område i Allinge-Gudhjem har værdier over 200 Bq m⁻³, hvilket er 5 gange så mange som i landet som helhed. Forklaringen på de observerede forskelle formodes primært at kunne tilskrives geologiske og byggetekniske forhold i tråd med de grundlæggende overvejelser bag udvælgelsen af områderne. Disse blev fremført side 9.

I forhold til tidligere danske undersøgelser [Sø85, Ma88, SIS87^b, Da88, Ma92] er der i denne undersøgelse registreret en række nye danske maksimumværdier. Eksempelvis, er det registreret,

Maksimumværdier

- at indendørs radonniveauer, over korte tidsrum (f.eks. en time) kan være op til 7000 Bq m⁻³
- at for enkelte rum i stueniveau, kan den gennemsnitlige vinterkoncentration være op til 1800 Bq m⁻³
- at for enkelte rum på 1. etage kan vinterkoncentrationen være op til 400 Bq m⁻³
- at der findes huse med en vurderet årsmiddelværdi omkring 1000 Bq m⁻³.

Endelig kan det nævnes, at det undersøgte område i Allinge-Gudhjem Kommune er det første område i Danmark, der i henhold til anbefalingerne fra ICRP⁸ [ICRP93] sandsynligvis må betegnes som et *radon-prone area*. Det skal her understreges, at det undersøgte område ikke nødvendigvis er repræsentativt for Allinge-Gudhjem Kommune som helhed. I ICRP-forstand er et *radon-prone area* et område der er karakteriseret ved at mere end 1 % af husene har årsmiddelværdier, der overstiger det gennemsnitlige landsniveau med en faktor 10. For Danmark betyder det, at mere end 1 % af husene i området skal have årsmiddelværdier over 470 Bq m⁻³. I Allinge-Gudhjem blev antallet af huse med årsmiddelværdier over 500 Bq m⁻³ observeret til at være 3.8 % (3 ud af 80 huse).

5.2 Introduktion til diskussionen af reduktionsmetoderne

Diskussionen af hver enkelt metode er struktureret omkring spørgsmålene:

- Demonstrerede undersøgelsen, at metoden er effektiv?
- Hvad er metodens virkemåde?
- Hvordan er erfaringerne fra tidligere undersøgelser?
- Hvordan er reduktionseffekten set i forhold til den teoretiske virkemåde og faktiske implementering i husene?
- Hvordan indvirker reduktionstiltaget på husets luftskifte og andre forhold i huset?
- Hvordan er de økonomiske forhold (materialer, opsætning og drift)?
- I hvilken grad kan metoden benyttes i andre danske huse?

Diskussionen foretages på baggrund af resultaterne fra kapitel 4. Hovedresultaterne og de faktiske udgifter til materialer og håndværkere er sammenstillet i Tabel 24 ordnet efter reduktionsmetode og effektivitet. Udgangspunktet for diskussionen er taget i *opsætning af udeluftventiler*, da denne metode indgår i kombination med flere af de øvrige typer af tiltag. Dernæst gennemgås tiltagene i rækkefølgen: mekanisk udsugning i ubeboede kælderrum og lign., aktivt og passivt sug under terrændæk og membrandækning af gulv.

5.3 Udeluftventiler

Demonstreret effekt

Metoden *opsætning af udeluftventiler* blev afprøvet i 13 huse, og undersøgelsen demonstrerer, at metoden generelt ikke har nogen væsentlig effekt på den indendørs radonkoncentration. I gennemsnit blev en reduktionseffektivitet på 11 % registreret, men under hensyntagen til naturlige variationer var effekten ikke signifikant forskellig fra nul.

Virkemåde

Opsætning af udeluftventiler kan nedbringe radonkoncentrationen indendørs, idet:

- Huset kan få et forbedret luftskifte, hvorved radonkoncentrationen indendørs fortyndes med radonfattig udeluft (fortyndingseffekten) [He88]. I de tilfælde, hvor luftskiftet kan forbedres uden samtidig at øge radonindtrængningsraten,

⁸The International Commission on Radiological Protection.

Tabel 24. Undersøgelsens hovedresultater ordnet efter reduktionsmetode og effektivitet. Negativ reduktionseffektivitet betyder, at det vurderes, at reduktionstiltaget muligvis har givet anledning til at radonkoncentrationen er steget. Betegnelserne Før og Efter refererer til om målingen er foretaget før eller efter opsætningen af reduktionsforanstaltningen. De angivne priser er de faktiske udgifter til håndværkere og materialer excl. moms.

Hus nr.	Reduktionsmetode	Radon		Luft-		Vinter reduktions- effektivitet %	Pris kkr
		årsmiddel		skifte			
		Bq m ⁻³		h ⁻¹			
		Før	Efter	Før	Efter		
4185	Aktivt sug 3 steder	990	50	0.34	0.46	95 ± 2	50
4212	Aktivt sug 1 sted & 3 udeluftv.	250	70	0.32	0.45	74 ± 9	20
4049	Mekanisk udsug & 2 udeluftvent.	960	260	0.21	-	76 ± 8	5
4249	Mekanisk udsug & 1 udeluftvent.	410	210	0.42	0.56	55 ± 16	10
4180	Mekanisk udsug & 1 udeluftvent.	440	260	0.37	0.59	49 ± 17	5
4189	Mekanisk udsug	370	320	0.23	0.28	25 ± 26	2
4217	Membran & 6 udeluftvent.	300	250	0.24	0.37	27 ± 24	15
4004	Passivt sug & 6 udeluftvent.	260	230	0.27	0.28	23 ± 26	10
4182	Udeluftventiler, 6 stk.	200	120	0.25	0.42	48 ± 17	2
4092	Udeluftventiler, 4 stk.	280	220	0.47	0.50	32 ± 22	2
4117	Udeluftventiler, 5 stk.	220	180	0.38	0.56	27 ± 24	3
4258	Udeluftventiler, 5 stk.	230	190	0.20	0.15	27 ± 24	1
4015	Udeluftventiler, 7 stk.	220	180	0.44	0.47	27 ± 25	6
4048	Udeluftventiler, 5 stk.	230	190	0.29	0.35	26 ± 25	2
4038	Udeluftventiler, 6 stk.	280	270	0.36	0.49	16 ± 28	7
4176	Udeluftventiler, 7 stk.	600	600	0.17	0.18	13 ± 29	4
4216	Udeluftventiler, 5 stk.	300	320	0.37	0.38	7 ± 31	3
4013	Udeluftventiler, 4 stk.	240	270	0.23	-	4 ± 32	3
4139	Udeluftventiler, 4 stk.	240	310	0.31	0.34	-10 ± 36	4
4233	Udeluftventiler, 6 stk.	270	370	0.12	0.15	-21 ± 40	2
4243	Udeluftventiler, 5 stk.	260	450	0.22	0.35	-51 ± 50	5

vil den indendørs radonkoncentration i det væsentlige nedbringes omvendt proportionalt med luftskiftet (et fordoblet luftskifte vil halvere radonkoncentrationen).

- Et forøget åbningsareal kan medvirke til at udligne det undertryk, som huset har i forhold til omgivelserne, således at indtrængningsraten af jordluft formindskes (neutraliseringseffekten) [He88]. Denne effekt er dog kun gældende såfremt udeluftventilerne fungerer som tilsigtet, nemlig som tilluftåbninger (således at luften strømmer igennem udeluftventilerne i retningen fra omgivelserne til huset). Hvis luftens strømningsretning er den modsatte vej, kan udeluftventilerne forårsage et forøget undertryk i huset og dermed risiko for en øget indtrængning af jordluft. Dette kan forekomme ved utilstrækkelige aftræksforhold f.eks. ved blokerede eller ukorrekt dimensionerede aftrækskanaler. Disse forhold er baggrunden for, at en amerikansk vejledning [He88] anbefaler, at forbedret naturlig ventilation ud fra et radonmæssigt synspunkt tilvejebringes ved at øge åbningsarealet af de nederste ventilationsåbninger i huset, hvorved neutralplanet rykkes nedad.

Tidligere erfaringer

I en finsk undersøgelse af 6 huse blev det fundet, at installation af udeluftventiler reducerede radonkoncentrationen 10–60 % [Ho93]. Tilsvarende resultater er fundet i Sverige ved undersøgelser af 68 huse, hvor alun-skifer indgik som byggemateriale,

og 22 huse, hvor dette ikke var tilfældet [Sw90]. Det bemærkes, at alun-skifer kan være en vigtig kilde til indendørs radon. Effekten af forbedret naturlig ventilation er desuden undersøgt i et dansk og flere udenlandske studier.

I en dansk undersøgelse [U194] blev der foretaget sammenhørende radon- og luftskiftemålinger i 117 naturligt ventilerede enfamiliehuse. Undersøgelsen viste, at gruppen af huse med luftskifter over 0.5 h^{-1} havde en indendørs radonkoncentration, som var en faktor 2 lavere end for gruppen af huse med luftskifter under 0.5 h^{-1} [An96^b]. Forskellen var statistisk signifikant. På baggrund af en tilhørende inspektion af husene og en spørgeskemaundersøgelse kunne det konstateres, at gruppen af huse med udeluftventiler ikke i gennemsnit havde en radonkoncentration, som var lavere end gruppen af huse uden [U194].

I Sverige er erfaringerne, at forbedret naturlig ventilation i gennemsnit kan halvere radonkoncentrationen [Sw90]. I Storbritannien har man observeret tilsvarende forhold, og BRE⁹ vurderer, at metoden kan anvendes for radonkoncentrationer op til 400 Bq m^{-3} [Sc93].

Metoden *opsætning af udeluftventiler* viste i denne undersøgelse en lav effektivitet i forhold til tidligere erfaringer vedr. metoden *forbedret naturlig ventilation*. Som det vil blive diskuteret i det følgende, sikrer opsætning af udeluftventiler alene ikke forbedrede ventilationsforhold.

Diskussion af observeret effektivitet

Ventiltipe Den anvendte udeluftventiltipe er en relativt nyudviklet version af den såkaldte tallerkenventil, som erfaringsmæssigt kun i begrænset omfang medfører trækgener i opholdszonen under normale vejrforhold. Udeluftventilerne fungerer dog kun optimalt når beboerne aktivt åbner og lukker ventilerne i forhold til vejrændringer. Ventilens åbningsareal kan reguleres trinløst fra lukket til fuldt åben tilstand, og ifølge fabrikanten har ventilen i fuldt åben tilstand en kapacitet på 8 L s^{-1} ved 10 Pa. Den indvendige ventildel er forsynet med kondensisolering og støvfilter. Desuden kan luftens spredningsbillede justeres ved hjælp af supplerende afdækningsplader.

Luftskifte Forårsmålingerne af 12 huses udelufttilførsel før og efter opsætningen af udeluftventilerne viste (se Tabel 13 side 30), at luftskifterne var steget markant; nemlig, 20 % i gennemsnit. Imidlertid skønnes det, at en stor del (dog næppe mere end halvdelen) af den registrerede forbedring *ikke* skyldes opsætningen af udeluftventiler, men snarere beror på, at temperaturforskellen mellem inde (ca. $20 \text{ }^\circ\text{C}$) og ude (se Tabel 17 side 33) i gennemsnit var 27 % større i perioden efter reduktionsforanstaltningerne i forhold til perioden før. Da øgede termiske drivkræfter kan forventes at give anledning til en tilsvarende forøgelse af jordluftindtrængningen [Na88^a], er det forventeligt, at den resulterende effekt på radonkoncentrationen indendørs var lille eller nul¹⁰.

Det fremgår af Tabel 24, at tre af husene (hus nr. 4176, 4233 og 4258) havde særdeles lave udeluftskifter både før og efter opsætningen af udeluftventilerne. Dette indikerer, at husene er forholdsvis tætte, og at ventilationen i disse huse i overvejende grad kontrolleres af beboerne.

Undersøgelsen viser, at opsætning af udeluftventiler (alene) ikke havde en væsentlig effekt på radonkoncentrationen indendørs, idet opsætningen af udeluftventilerne ikke *i sig selv* gav en væsentlig forøget udelufttilførsel. Dette kan skyldes

⁹Building Research Establishment, Storbritannien.

¹⁰Som beskrevet af Nazaroff *et al.* [Na88^a] kan det forventes, at en øgning af indendørs-udendørs temperaturforskellen øger jordluftindtrængningen forholdsvis mere end udelufttilførslen. Dette er sandsynligvis baggrunden for at kontrolgruppen i den kolde vinter 1995–96 i gennemsnit havde en højere indendørs radonkoncentration end i vinteren 1994–95, der var mere mild.

to forhold. Den første mulighed er, at udeluftventilerne—på trods af detaljerede instruktioner—blev holdt permanent lukkede. Den anden mulighed er, at begrænsningen ved husenes naturlige ventilation ikke var manglende udeluftventiler men snarere utilstrækkelige aftræksforhold (f.eks. som følge af blokerede aftrækskanaler eller dårlige luftstrømningsforhold fra opholdsrum til køkken og bad).

Parameterstudier [Be96] af funktionen af naturlige ventilationssystemer i enfamiliehuse har vist, at ved at forøge såvel udeluftventilarealet som dimensionerne på aftrækskanalerne i forhold til reglerne i Bygningsreglement for småhuse (1985), kan der opnås en forøgelse af selve ventilationssystemets ydelse i størrelsesordenen 30–35 %. I dette projekt er der alene sket en forøgelse af udeluftventilarealet, men i de fleste tilfælde var der *ingen* udeluftventiler i forvejen, så forøgelsen er sket fra 0 cm². Som allerede nævnt i forbindelse med metodens virkemåde kan forbedrede aftræksmuligheder i et hus forventes at øge husets undertryk og dermed muligheden for jordluftindtrængning.

Det har i undersøgelsen ikke været muligt at påvise en direkte sammenhæng mellem ændrede ventilationsforhold og ændrede radonkoncentrationer for de enkelte huse. Det må dog her fremhæves, at radonmålingerne er foretaget over 70–80 dage i en vinterperiode, mens ventilationsmålingerne er foretaget om foråret over væsentligt kortere tidrum. Desuden skal det nævnes, at der kun blev målt ventilationsforhold i husene i reduktionsgruppen—ikke i husene kontrolgruppen.

Andre forhold

Opsætning af udeluftventiler kan forbedre ventilationen af huset til gavn for husets generelle indeklima. Forkert placering eller justering af ventilerne kan dog give trækgener.

Økonomi

I gennemsnit kostede indkøb og opsætning 300–500 kr per ventil.

Anvendelsen af metoden i andre boliger

Såvel denne undersøgelse som tidligere undersøgelser (f.eks. [Be94^b]) viser, at luftskifter omkring 0.35 h⁻¹ er almindelige for danske enfamiliehuse. Almindeligvis betragtes et luftskifte på 0.5 h⁻¹ som et nødvendigt basislufskifte i boligen. For så vidt at man på simpel vis kan forbedre den naturlige ventilation uden samtidig at øge indtrængningen af radonholdig jordluft, foreligger der derfor en potentiel mulighed for at opnå lavere radonkoncentrationer i mange danske huse. En forøgelse af luftskiftet fra 0.35 til 0.50 h⁻¹ kan forventes at have en reduktionseffektivitet på 30 % (under antagelse af uændrede radonindtrængningsforhold). Tiltaget er derfor ikke egnet som isoleret indgreb mod radon i huse med høje radonniveauer, med mindre luftskiftet er ekstraordinært lavt.

5.4 Mekanisk udsugning i ubeboede kælderrum og lign.

Demonstreret effekt

Metoden *mekanisk udsugning i ubeboede kælderrum og lign.* blev afprøvet i fire huse. I tre tilfælde blev udsugningen etableret i kælderen, og i et tilfælde i en krybekælder. For to af husene blev der desuden opsat udeluftventiler i stuen. I et tilfælde blev der opsat udeluftventil i et kælderværelse. Undersøgelsen demonstrerer, at metoden kan være effektiv. For undersøgelsens 4 anlæg var den gennemsnitlige

effektivitet 51 %, og i det bedste tilfælde var effektiviteten 76 %. I et tilfælde kunne reduktionseffekten observeres ved en såkaldt tænd/sluk undersøgelse og kontinuerede radonmålinger (se Figur 13 side 39).

Virkemåde

Metoden *mekanisk udsugning i ubeboede kælderrum og lign.* kan anvendes i de tilfælde, hvor radon i husets beboelsesdel primært trænger ind fra jorden via en ubeboet kælder eller krybekælder. Man kan indrette udsugningen i ”indtrængningszonen” efter to principper:

- Udsugningen giver anledning til et øget undertryk i kælderrummet i forhold til omgivelserne, hvilket forårsager en øget tilførsel af såvel udeluft som jordluft. Hvis man samtidig forbedrer tilgangen af udeluft, vil det primært være den radonfattige udelufttilførsel, som øges. Den luft, som trænger videre op i beboelsesdelen af huset, vil følgelig have en reduceret radonkoncentration.
- En anden metode er at undlade at forbedre tilgangen af udeluft til kælderen, således at undertrykket i kælderrummet øges, og strømmingen af luft igennem etageadskillelsen mindskes. Derved begrænses luftoverføringen fra kælder til husets beboelsesdel. Evt. kan man samtidig søge at tætne etageadskillelsen. Det skal understreges, at den øgede jordluftindtrængning til kælderrummet kan forårsage en stigning i radonkoncentration, og det er derfor vigtigt, at rummet er ubeboet. Samtidig skal der tages hensyn til husets fugtforhold (se senere).

Tidligere undersøgelser

Metoden er i litteraturen bl.a. beskrevet i relation til krybekældre af Henschel [He92]. En undersøgelse udført af Findlay *et al.*'s viser, at mekanisk udsugning fra en krybekælder giver en reduktion på 70–90 % (4 huse) af radonkoncentrationen i husets beboelsesdel [Fi90]. Som forventet reduceres radonkoncentrationen i krybekælderen ikke tilsvarende, da den forbedrede ventilation modsvares af en øget jordluftindtrængning. Effekten skyldes således primært en ændring af luftstrømningen fra krybekælder til husets beboelsesdel.

En finsk undersøgelse af forbedret krybekælderventilation for 7 krybekælderhuse gav reduktionseffektiviteter (i husets beboelsesdel) fra 30 til 90 % [Ho93]. Den samme undersøgelse viste, at forbedret kælderventilation i 6 kælderhuse gav reduktionseffektiviteter fra 10 til 90 %.

Metoden omtales tilsyneladende ikke direkte i den ellers meget fyldige EPA¹¹-manual. EPA anbefaler, at mekanisk ventilation skal foretages ved at ventilatoren blæser luft *ind* i huset [He88, s. 53 og 149]. Det argumenteres, at mekanisk *udsugning* kan øge indtrængningen af radon til den zone, hvorfra der suges. Situationen, hvor denne er ubeboet diskuteres ikke. En vanskelighed ved denne teknik er imidlertid, at den kan også give anledning til en øget luftoverføringen fra indtrængningszone til beboelsesdel. Disse forhold diskuteres bl.a. af Woolliscroft i relation til valget mellem mekanisk udsugning og indblæsning af luft i forbindelse med ventilation af hulrummet under *suspended timber floors*¹² [Wo94^a].

¹¹Environmental Protection Agency, USA.

¹²*Suspended timber floors* er traditionelle britiske bræddegulve. Gulvkonstruktionen svarer stort set til trægulv mod jord i ældre danske huse.

Diskussion af observeret effektivitet

Hensigten med de anlæg, som blev afprøvet i denne undersøgelse, var at mindske lufttilførslen fra kælder til beboelsesdel. I det følgende fremhæves resultaterne fra to huse: ét, hvor der var en høj grad af reduktion og, ét, hvor effekten var lille. I begge huse blev der foretaget tænd/sluk undersøgelser—se Figur 12 og 13 side 38 og 39.

Hus nr. 4249 I dette hus blev det vurderet, at en vigtig indtrængningsvej for radon var via en kælder med blotlagt undergrund. Mekanisk udsugning blev installeret i to ubeboede kælderrum og en udeluftventil blev opsat i et tilstødende værelse. Pga. risikoen for at udsugningen kunne øge radonkoncentrationen i det beboede værelse blev der opsat en tæt lem mod et tilstødende kælderrum med mekanisk udsugning. Desuden blev der opsat en udeluftventil i det beboede værelse. Ud fra radonmålinger i husets stue og soveværelse blev den resulterende reduktionseffektivitet bestemt til at være 55 ± 16 % (det bemærkes, at husets soveværelse er placeret på 1. sal—se husbeskrivelsen side 103). De kontinuerte radonmålinger i rummet (se side 38) bekræftede, at den mekaniske udsugning havde en direkte effekt på radonkoncentrationen i husets beboelsesdel over kælderen, mens radonkoncentrationen i værelset ikke blev påvirket på en entydig måde. Målingerne antyder, at den mekaniske udsugning primært virkede ved at hindre luftstrømning fra kælderrum til husets øvre beboelsesdel—ikke ved at nedbringe radonkoncentrationen i kælderen.

Hus nr. 4189 I dette hus, havde den mekaniske udsugning i kælderen en reduktionseffektivitet på 25 ± 26 %, men med en meget stor åbning på ca. 2 m^2 mellem stue og kælder må udsugningen antages at ske fra kælder og stue under et (se Figur 13). Da beboervaner kan indvirke på såvel radon- som ventilationsforhold, skal det desuden bemærkes, at huset skiftede ejer i efteråret 1995. Eventuelle ændringer af beboervaner kendes ikke, men det vides, at kælderen nu benyttes i langt højere grad end tidligere. Den kontinuerte monitoring af radonkoncentrationen kunne ikke understøtte hypotesen om en kausal sammenhæng mellem anvendelsen af ventilatoren og radonkoncentrationen i kælder eller stue. Radonkoncentrationen var dog 10 % lavere de nævnte steder i de perioder, hvor ventilatoren var tændt i forhold til perioden, hvor den var slukket (se Tabel 20 side 36). Det fremgår af ventilationsmålingerne (se Tabel 14 side 31), at kældrens udeluftskifte var mere end fordoblet i foråret 1996 i forhold til foråret 1995. Tiltagets relativt lave effekt kan skyldes, at udsugningen skete fra kælder og stue under et eller at huset tilføres radon direkte fra jorden og ikke kun via kælderen. Kælderen dækker ca. 25 % af husets areal; resten er terrændæk.

Andre forhold

Etablering af en mekanisk udsugning i uisolerede og uopvarmede krybekældre og kældre (ubeboede) kan medføre en risiko for kondensdannelse i krybekælderen/kælderen.

Fugtforhold

- I opvarmningssæsonen vil risikoen optræde, såfremt der i væsentligt omfang overføres luft fra den ovenliggende beboelse. Luften i beboelsesrummene må formodes at have fået et fugttilskud på grund af beboernes tilstedeværelse og brug af boligen. Den varmere og fugtigere luft fra beboelsen kan kondensere på kolde overflader i krybekælderen/kælderen, f.eks. på ydervægge og gulv. I praksis vil kondensrisikoen imidlertid formodentlig være begrænset. Erstatningsluften for den udsugede luft vil kun i ringe grad bestå af luft fra ovenliggende rum, dels fordi den mekaniske udsugning kun i mindre omfang

vil kunne overvinde termiske drivkræfter, dels fordi der vil være en betydelig udelufttilførsel gennem tilsigtede åbninger og tilfældige revner og sprækker i klimaskærmen.

- På særligt varme og fugtige sommerdage kan der kan derimod være en realistisk risiko for kondensdannelse i en uisoleret og uopvarmet krybekælder/kælder. Uanset om erstatningsluften for den udsugede luft består af luft fra den ovenliggende beboelse eller af udeluft, vil denne være varmere og have et højere vandindhold end luften i krybekælderen/kælderen. Der kan derfor i kortere perioder optræde såkaldt sommerkondens. På sådanne dage bør krybekælderen/kælderen holdes lukket, og den mekaniske udsugning bør afbrydes midlertidigt.

Økonomi

Anskaffelsesprisen for en mekanisk udsugningsventilator incl. montering er 1000–3000 kr. Levetiden for en ventilator af denne type er omkring 15 000 drifttimer, hvilket ved konstant drift udenfor sommerperioder giver en levetid på ca. 3 år. Herefter udskiftes selve ventilatoren til en pris af ca. 300 kr. Det samlede strømforbrug vurderes til ca. 80 kWh pr. år.

Anvendelsen af metoden i andre boliger

Metodens anvendelighed begrænses til huse med kælder eller krybekælder. I huse af de nævnte typer er metoden dog særdeles velegnet til at nedbringe selv høje radonkoncentrationer.

5.5 Aktivt sug under terrændæk

Demonstreret effekt

Metoden *aktivt sug under terrændæk* blev afprøvet i to 1-plans huse, og undersøgelsen demonstrerer, at metoden er pålidelig og effektiv. I hus nr. 4185 blev et anlæg med tre sugepunkter installeret, og den observerede effektivitet var 95 ± 2 %. Dette betød, at husets vurderede årsmiddelværdi faldt fra omkring 1000 til 50 Bq m^{-3} . Før reduktionstiltaget havde huset undersøgelsens højeste årsmidlede radonkoncentration. Efter tiltaget var årsmiddelværdien lavere end i alle andre huse i reduktions- og kontrolgruppen. Tiltagets indvirkning på husets radonkoncentration kunne observeres på basis af kontinuerte radonmålinger ved en tænd/sluk undersøgelse (se Figur 14 side 40).

I hus nr. 4212 blev et mindre anlæg opsat med ét sug under husets stue. Effektiviteten af dette anlæg blev bestemt til 74 ± 9 %.

Virkemåde

Aktivt sug under terrændæk virker efter følgende to principper [He88, BRE92, Ga94^b]:

- Kanalventilatoren frembringer et undertryk af størrelsesordenen 100 Pa under dækket. Dette undertryk er væsentligt større end det undertryk på 1–3 Pa, som huset normalt har i forhold til udeluften. Undertrykket giver derfor anledning til, at luft strømmer fra huset gennem revner i dækket mod jorden—altså modsat af hvad der normalt er tilfældet. Herved modvirkes indtrængning af jordluft til huset. For at metoden kan være effektiv er det vigtigt, at der under *hele* dækket (eller i det mindste under alle væsentlige revner og sprækker)

er et undertryk i forhold til husets indre. Hvis der eksempelvis etableres et 100 Pa-sugepunkt under dækkets centrum, er det afgørende, at undertrykket også ved dækkets yderkant (hvor der navnlig kan forventes revner mellem dæk og fundament) er større end ovennævnte 1–3 Pa. Det er muligt, at opnå en god trykudbredelse under dækket ved (1) at placere sugepunkter i det kapillarbrydende gruslag (som normalt er højpermeabelt i forhold til jorden under huset), (2) ved at have sugepunkter under forskellige rum i huset og (3) ved at sørge for god kobling mellem eventuelt isolerede dele af det kapillarbrydende gruslag. Endelig bør det nævnes, at gennemføringen af (suge)røret igennem betondækket skal gøres tæt, thi ellers kan man risikere, at en stor del af suget ”kortsluttes” direkte til husets ovenend.

- En sekundær effekt af et aktivt sug under terrændæk er, at der etableres en strømning af luft igennem jorden umiddelbart omkring og under huset. Denne luft kommer fra atmosfæren omkring huset og har derfor en meget lav radonkoncentration (typisk af størrelsesordenen 5 Bq m^{-3} i forhold til en typisk jordluftkoncentration på $50\,000 \text{ Bq m}^{-3}$). Strømning igennem jorden af radonfattig luft kaldes for jordventilation og bidrager til, at radonkoncentrationen i området omkring og under huset nedbringes. Hvis trykket ikke er vendt over alle dele af betondækket (dvs. hvis mekanismen beskrevet ovenfor ikke helt har forhindret indtrængning af jordluft til huset) er det derfor en hjælp at jordluftens radonkoncentration er lavere end før. Jordventilation bidrager derfor også til, at den advektive indtrængning af radon fra jorden mindskes.

Tidligere undersøgelser

I Sverige, Storbritannien og USA er aktive sug under terrændæk en meget anvendt teknik, og gode erfaringer eksisterer alle steder [He88, BRE92, Cl92, St92]. Reduktionseffektiviteter omkring 80–100 % opnås ofte [He94].

Diskussion af observeret effektivitet

For hus nr. 4185 er der foretaget en række supplerende målinger, som belyser anlæggets virkemåde og effektivitet.

Som beskrevet side 40 blev der foretaget trykkoblingsmålinger i jordprober placeret i 1 m's dybde omkring husets yderfundament. I ét målepunkt kunne det registreres, at trykket relativt til udeluften faldt omkring 3 Pa, når det aktive sug blev tændt (det størst mulige sug på 170 Pa blev anvendt ved denne undersøgelse). Dette indikerer, at det aktive sug—under denne del af huset—har forårsaget en vending af trykdifferensen over dækket. I de resterende prober kunne der ikke med sikkerhed registreres trykkobling. Disse målinger af trykforholdene omkring huset svarer til de såkaldte *pressure-field extension tests*, som omtales i amerikansk og britisk litteratur i forbindelse med design af nye anlæg eller ved diagnostik af eksisterende anlæg, som ikke virker tilfredsstillende [He88, BRE92, Be94^a, Le94].

I 8 steder omkring huset blev der foretaget måling af jordluftens radonkoncentration i 1 m's dybde. Tæt på husets yderfundament var værdierne i intervallet 2–12 kBq m^{-3} (se Figur 16 side 41) og den gennemsnitlige koncentration var omkring 7 kBq m^{-3} . De målte radonkoncentrationer tæt på huset var væsentligt lavere end koncentrationen på 70–100 kBq m^{-3} længere væk. Dette indikerer, at det aktive sug—omkring denne del af huset—forårsager en væsentlig ventilation af jorden. I den forbindelse er det interessant at bemærke, at den laveste radonkoncentration (tæt på huset) netop blev målt i den probe, hvor der var den største trykkobling. Dette skyldes muligvis, at strømningshastigheden af luft (jordventi-

Trykudbredelse omkring huset

Jordventilation

lation) var størst netop dér.

Antal af sugepunkter

I hus 4185 blev det valgt at placere aktive sug tre steder under huset. En efterfølgende pitotrørsmåling (se side 39) i sugekanalerne viste, at suget i soveværelset (selv ved et undertryk på ca. 170 Pa) var uden væsentlig luftstrømning. Dette sugepunkt kunne derfor muligvis have været udeladt. For et givet hus er det vanskeligt at forudsige det optimale antal af sugepunkter og placeringen af sugene.

Loftlækage

Tænd/sluk undersøgelsen (se figur 14 side 40) viste, at tilkoblingen af det aktive sug gav anledning til en forøgelse af radonkoncentrationen på loftet (i gennemsnit fra ca. 40 til 200 Bq m⁻³). En stikprøvemåling af radonkoncentrationen i hovedkanalen for det aktive sug viste, at radonkoncentrationen under drift var omkring 3.6 kBq m⁻³. Pga. den høje radonkoncentrationen i rørsystemet kan forskellige forklaringsmodeller opstilles for, hvorfor driften af det aktive sug fører til en forhøjet radonkoncentration på loftet:

- diffusion igennem en vibrationsdæmpende gummikobling umiddelbart under kanalventilatoren (se Figur 15(a) side 41).
- lækager på systemets trykside dvs. mellem kanalventilatoren og det udendørs afkast (ca. 1.5 m rør).
- indtrængning til loftet af udeluft med en høj radonkoncentration stammende fra det udendørs afkast fra kanalventilatoren [Yu94, He95].

Der er ikke foretaget en nøjere undersøgelse af den aktuelle årsag til den forhøjede radonkoncentration på loftet. Ved udformning af aktive sug under terrændæk bør det overvejes, om de nævnte forhold kan påvirke radonkoncentrationen i husets beboede rum, og om forholdene i givet fald kan undgås (se anvisningerne i [BRE92]).

Andre forhold

En ulempe ved aktive sug er, at de kan give anledning til støj i huset [BRE94^b]. Dette blev der taget hensyn til ved installationen af begge undersøgelsens to anlæg. I hus nr. 4185 blev ventilatoren placeret på loftet, og alle rør blev ophængt på en vibrationsdæmpende måde. I hus nr. 4212 blev ventilatoren placeret i et udhus. I ingen af de to huse blev der rapporteret om støjgener fra ventilatorerne.

Forøget undertryk og udelufttilførsel

Aktive sug under terrændæk kan give anledning til et forøget undertryk i huset. Dette kan give problemer ved brug af åben pejsg og lign. [BRE94^a], og husets luftskifte kan blive forøget [Cl90, Fi95, Ri96]. Sidstnævnte er dog ikke nødvendigvis et problem med mindre luftskiftet i forvejen er højt. Det er på den baggrund af interesse at vide, hvor stor en luftstrøm det aktive sug giver anledning til, samt hvor stor en del heraf, der kommer fra jorden, og hvor stor en del, som kommer fra huset. Bonnefous *et al.* har foretaget teoretiske beregninger af disse forhold [Bo94].

Luftstrømning fra jord og hus

I hus nr. 4185 blev der som nævnt side 32 foretaget målinger af husets luftskifte i to perioder med tændt sug og en periode med slukket sug. Disse målinger viste, at husets luftskifte øgedes omkring 20 %, når suget blev tændt. Dette svarer til en udelufttilførsel på 30 m³ h⁻¹. På baggrund af pitotrørsmålinger og ventilatorens specifikationer (se side 39) vurderes volumenstrømmen i suget ved normal drift (120 Pa) til at være ca. 150 m³ h⁻¹, hvilket svarer til, hvad der er rapporteret f.eks. for britiske anlæg [Cr94]. Ud fra disse (usikre) vurderinger kan det anslås, at 80 % ((150 - 30)/150) af den opsugede luft kom fra jorden, mens resten var rumluft, som blev suget igennem revner i betondækket til det kapillarbrydende gruslag. En alternativ beregning, som ganske vist er endnu mere usikker, kan foretages ved at betragte den målte radonkoncentration i sugerøret på 3.6 kBq m⁻³, som en blanding af to luftstrømme: en fra huset med en radonkoncentration omkring 100 Bq m⁻³, og en fra jorden med en koncentration på omkring 7 kBq m⁻³

(den gennemsnitlige radonkoncentration i jorden tæt på husets yderfundament, se Figur 16 side 41). I dette tilfælde kan det beregnes, at omkring 50 % af den opsugede luft kom fra jorden, hvilket er i rimelig overensstemmelse med ovenstående estimat (80 %). Tilsvarende tal er rapporteret i litteraturen [C190].

I forbindelse med vurderinger af om aktive sug kan anvendes i givne huse bør fugtforholdene vurderes. Det aktive sug giver anledning til at (varm) rumluft trækkes igennem revner i gulvkonstruktionen til det kapillarbrydende gruslag. Det kapillarbrydende gruslag tilføres samtidig jordluft i store mængder (se ovenstående). En del af denne jordluft er ”udeluft”, som er suget ned omkring husets yderfundament. Under vinterforhold forårsager dette en generel sænkning af temperaturen under dækket, og aktive sug øger derfor risikoen for kolde gulve og frostska-der på uisolerede installationer under huset. Af disse grunde kan der opstå kondens i eller under gulvkonstruktionen. I Sverige, er der ikke rapporteret tilfælde med frostska-der, men problemet med kolde gulve er et velkendt komfortproblem [C192].

Endelig bør det nævnes, at rørføring f.eks. fra loft til under dæk igennem stuer og værelser kan være en ”æstetisk omkostning” for husets beboere.

Kondens og kolde gulve

Økonomi

Anlæg med aktivt sug under terrændæk har to driftmæssige omkostninger for beboerne [He88, Bo94, Fi95, Ri96]: Elektricitet til drift af ventilatoren og varmetab. Elforbruget er omkring 30–70 W afhængig af valget af kanalventilator. Varmetabet fra det forøgede luftskiftet [C190] er ikke beregnet for undersøgelsens to huse med aktivt sug, da luftskiftet i husene stadig er under 0.5 h^{-1} under anlæggets drift. Anskaffelsesomkostningerne vurderes under danske forhold at være 30 000–40 000 kr. udført af håndværkere. I Sverige markedsføres en gør-det-selv pakke med specialventilator, styreenhed og kontrolmanometer samt forskellige specialfit-tings. Øvrige komponenter i form af rør, taghætter mm. vælges fra byggemarkedes standardlager. På denne måde vil en ”gør-det-selv” håndværker kunne klare sig med materialeudgifter på omkring 5000 kr. for et simpelt anlæg.

Anvendelsen af metoden i andre boliger

Aktivt sug under terrændæk er en metode, som kan anvendes i enfamiliehuse af kælder- eller terrændækstypen. På grund af metodens høje reduktionseffektivitet og robusthed er metoden egnet til huse med høje radonkoncentrationer og til situationer, hvor det er vigtigt, at radonkoncentrationen nedbringes i første forsøg.

5.6 Passivt sug under terrændæk

Demonstreret effekt

Undersøgelsen har demonstreret, at installation af passivt sug under terrændæk kombineret med opsætning af almindelige udeluftventiler ikke generelt er en effektiv foranstaltning mod radon. I hus nr. 4004, som er det eneste hus i undersøgelsen, hvor teknikken blev afprøvet, blev en reduktionseffektivitet på $23 \pm 26 \%$ observeret. Når der tages hensyn til naturlige variationer er reduktionseffektiviteten altså ikke signifikant forskellig fra nul. På det givne grundlag er det ikke muligt at vurdere den relative betydning af hhv. det passive sug og udeluftventilerne.

Virkemåde

Grundlæggende er virkemåden for passive sug den samme som for aktive sug [Ho96]. Forskellen mellem teknikkerne er, at et passivt sug alene virker ved termi-

ske drivkræfter og vindpåvirkninger, mens et aktivt sug er baseret på en eldreven kanalventilator. I sagens natur er det begrænset, hvor store undertryk, der kan etableres med et passivt sug. Dette er baggrunden for, at teknikken ikke er en sikker metode til radonreduktion. Sandsynligheden for at et passivt sug virker kan øges ved at udføre anlægget, så det størst mulige drivtryk tilvejebringes i røret. Dette gøres ved:

- at anvende et så højt rør som muligt (skorstenshøjden) fra laget under dækket til udeluften
- at føre røret gennem varme rum (i forbindelse med uopvarmede loftrum, bør røret isoleres)
- ved at undgå rørbøjninger (tryktab)

I forbindelse med nybyggeri kan man også på anden vis forbedre muligheden for at opnå en høj reduktionseffektivitet vha. passive sug under terrændæk [Fi95]. En nærmere beskrivelse af hvorledes passive sug kan dimensioneres er givet af Saum og Osborne [Sa90].

Tidligere undersøgelser

I Storbritannien viser forsøg med passive sug, at der kan opnås reduktionseffektiviteter op til 90 % med en typisk effektivitet omkring 60 % [We95]. I USA er reduktionseffektiviteten typisk fra 30–70 % [He94]. En amerikansk undersøgelse af nye huse konkluderer, at passive sug under terrændæk er (1) mere effektive end løsninger, hvor dækket søges tætnet vha. membraner og lign. og (2) mindre effektive end aktive sug under terrændæk [Br90].

Andre forhold

Passive systemer giver ingen støj.

Økonomi

Systemer til passivt sug under terrændæk kan forventes at koste det samme, som systemer til aktivt sug under terrændæk (se ovenfor) minus kanalventilator og kontrolmanometer [Ho96]. Der er ingen driftudgifter forbundet med de passive systemer.

Anvendelsen af metoden i andre boliger

Erfaringerne fra Storbritannien og USA viser, at metoden især er egnet i forbindelse med nybyggeri [He94]. I de tilfælde, hvor reduktionseffektiviteten for et passivt sug er utilstrækkelig, kan anlægget suppleres med en kanalventilator (modifikation til aktivt sug under terrændæk).

5.7 Membrandækning

Demonstreret effekt

Undersøgelsen demonstrerer, at anvendelse af membrandækning af gulve i et eksisterende hus, ikke generelt er en effektiv metode til reduktion af radonkoncentrationen. I det hus, hvor metoden blev afprøvet, blev en reduktionseffektivitet på 27 ± 24 % registreret. Det er muligt, at en del af effekten skyldtes, at der samtidig blev opsat udeluftventiler. Effektiviteten er ikke signifikant forskellig fra nul, når der tages hensyn til naturlige variationer.

Virkemåde

I princippet kan indtrængning af radonholdig jordluft igennem gulvkonstruktionen hindres ved at gøre denne lufttæt. Da gaspermeabiliteten for intakt beton er lav [CMHC91], kan dette gøres ved at tætne revner og sprækker i betondækket [He88, Py93]. En alternativ løsning er at foretage en membranafdækning af gulvet. En membranafdækning mindsker desuden diffusiv indtrængning af radon til huset. Dette må dog anses for at være af mindre betydning for terrændækhuse med et højt indendørs radonniveau.

En vanskelighed ved metoden er, at membranafdækningen skal udføres med stor tæthed, idet der først opnås en effekt når gulvkonstruktionen (som helhed) har en tæthed der er sammenlignelig med (eller bedre end) tætheden af jorden under huset [Mo86, Br90, CMHC91]. Det betyder, at der ikke generelt er en lineær sammenhæng mellem afdækket (eller tætnet) areal og reduktionen af jordluftindtrængningen. Som dokumenteret af Robinson og Sextro [Ro95] skyldes dette, at det kapillarbrydende gruslag under huset udgør en ideel grænseflade mellem hus og jord. Pga. gruslaget bliver placeringen af revnerne og antallet af dem af ringe betydning for den totale indtrængning, når blot antallet er over en vis størrelse (f.eks. svarende til et lækageareal på 25 cm²). Delvis afdækning (eller tætning) af gulve vil blot give anledning til en omfordeling af jordluftindtrængningen mellem tilgængelige revner. For et hus uden et kapillarbrydende gruslag er der derimod en lineær sammenhæng mellem afdækket (eller tætnet) areal og reduktionen af jordluftindtrængningen. For et hus, hvor den primære indtrængning hidrører fra diffusion igennem betondækket, vil der ligeledes være en lineær sammenhæng mellem afdækket areal og reduktionen af radonindtrængningen.

For fuldstændighedens skyld skal det nævnes, at der findes membrantyper, som er designet således, at der dannes et hulrum under "membranen", hvorfra der kan etableres mekanisk ventilation. Disse systemer kan eksempelvis anvendes i de tilfælde, hvor det ikke er muligt at installere et aktivt sug under terrændæk.

Tidligere undersøgelser

Membranafdækning af gulve (eller vægge) i eksisterende huse nævnes i litteraturen [He88, Cl92, Cl94], men en nøjere dokumentation af metodens effektivitet kunne ikke identificeres. Cliff *et al.* [Cl94] redegør for britiske erfaringer med membranafdækning i relation til *suspended timber floors* (se fodnoten side 50) på følgende måde :

Membrane covering the floor: Where the ground floor construction is of suspended timber, early advice was given that radon levels might be reduced by covering the floor with a membrane and sealing it to the walls. Adequate ventilation of the underfloor void is essential. This is no longer recommended because it was found not to be very effective and difficult to carry out and because adequate underfloor ventilation is difficult to define.

Der er veldokumenterede erfaringer med membraner til reduktion af radonindtrængning til eksisterende huse med krybekælder, hvor membranen placeres i krybekælderen (se [An96^a] og de deri givne referencer). Desuden er der dokumenterede erfaringer med anvendelse af membraner i nybyggeri. En canadisk undersøgelse baseret på en kombination af laboratorie- og feltforsøg viser, at anvendelse af polyethylenmembraner i nybyggeri effektivt *kan* hindre indtrængning af jordluft til huset (reduktionseffektivitet større end 90 %). Britiske erfaringer med anvendelse af membraner i nybyggeri tyder på, at sådanne tiltag i praksis i gennemsnit reducerer radonniveauerne med 50 % [Wo94^b]. Britiske, amerikanske og finske erfaringer med tætning af betondæk mv. i eksisterende huse med forskellige former

for tætningsmasse viser, at en gennemsnitlig reduktion på meget mere end 50 % ikke kan forventes [He88, Ar93, Py93].

Diskussion af observeret effektivitet

Formålet med membranafdækningen i hus nr. 4217 var at tilvejebringe en lufttæt gulvkonstruktion. Membranen (0.3 mm polyethylen) blev leveret som hele flader, der rumvis helt dækkede gulvene i de enkelte rum. Der blev pålagt membran i rum med væg-til-væg tæppe (dvs. alle rum fraregnet køkken, badeværelse, gang og fyrrum) svarende til 70 % af husarealet. Membranen blev stukket under fejelisterne, og ifølge det oplyste blev der fuget langs liste og membran¹³. Den observerede effektivitet på kun 27 % (hvoraf en del muligvis skyldes de opsatte udeluftventiler) dokumenterer to ting:

- Det forhold at afdækning af en væsentlig del af husets gulvareal (70 %) ikke nedbragte husets radonkoncentration mere markant indikerer, at diffusiv indtrængning af radon igennem betondækket er af ringe betydning i sammenligning med den totale indtrængning¹⁴. Som nævnt side 43 kan man altså benytte resultatet af membranafdækningen som et argument for, at det primært er indtrængning af jordluft igennem revner i betondækket (og ikke diffusion), som bringer radon ind i huset.
- Resultatet dokumenterer, at gulvkonstruktionen ikke blev gjort lufttæt. Tilsyneladende er der andre indtrængningsveje for radon til huset end de afdækkede arealer. Sådanne indtrængningssteder kan f.eks. forekomme langs væggene (hvis membranen ikke blev fastgjort med tilstrækkelig tæthed), ved dørtrin og uafdækkede gulvflader.

Andre forhold

Et kritisk punkt i forbindelse med denne form for reduktionsforanstaltning er, at membranen skal være robust, således at der ikke opstår skader ved pålægningen, samt at der kan udføres en tæt montage til vægge, omkring rørgennemføringer og lign., og at radon ikke kan trænge ind via indvendige skillevægge (f.eks. af porebeton). Endelig skal det altid overvejes, om den begrænsning, membranen udgør for gulvets evne til at afgive fugt til rummet, er acceptabel for den givne gulvkonstruktion [Cl92, s. 65].

¹³I den projekterede fastgørelsesprocedure skulle membranen have været bukket ind under og holdt fast af fejelisterne. Denne procedure blev ikke fulgt af den udførende håndværker.

¹⁴Polyethylen har en diffusionskoefficient på omkring $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [An96^a, s. 8], så en membran på 0.3 mm kan i relation til radonindtrængning til huse anses for at være "diffusionstæt". Hvis det antages, at forskellen i radonkoncentration over membranen er så høj som $50\,000 \text{ Bq m}^{-3}$, og hvis der ses bort fra radioaktivt henfald i forbindelse med diffusionsprocessen, da kan en maksimal radonindtrængningsrate til et hus med 100 m^2 afdækket gulvareal beregnes til [An96^a]:

$$J = AD \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (1)$$

$$= 100 \text{ m}^2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \frac{5 \cdot 10^4 \text{ Bq m}^{-3}}{0.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 0.17 \text{ Bq s}^{-1} = 600 \text{ Bq h}^{-1} \quad (2)$$

Hvis husets volumen og luftskifte er hhv. 250 m^3 og 0.5 h^{-1} , og hvis der ikke er andre kilder til radon i huset, da vil diffusion af radon igennem membranen give anledning til en indendørs radonkoncentration af størrelsen:

$$c = \frac{J}{\lambda_v V} \quad (3)$$

$$= \frac{600 \text{ Bq h}^{-1}}{0.5 \text{ h}^{-1} 250 \text{ m}^3} = 5 \text{ Bq m}^{-3} \quad (4)$$

hvilket er en radonkoncentration, som svarer til den der typisk findes i udeluften.

Økonomi

En membranafdækning, som den der blev anvendt i denne undersøgelse, kan forventes at koste 10 000–15 000 kr. for et almindeligt enfamiliehus. Der er ingen direkte driftudgifter forbundet med metoden, men da membranen kan beskadiges f.eks. ved tilskæring af tæpper kan det være nødvendigt med opfølgende radonmålinger, for at teste om tætningen forbliver effektiv.

Anvendelsen af metoden i andre boliger

Metoden kan anvendes i alle former for boliger.

5.8 Undersøgelsens gyldighed og begrænsninger

Dette afsnit omhandler primært kvaliteten og gyldigheden af den valgte undersøgelsesmetodik. Der gives en kort belysning af de rå radonmålinger, samt beregningerne af radonårsmiddelværdier og reduktionseffektiviteter.

Radonmålingerne

Sporfolieteknikken, som er anvendt ved de tidsintegrerede målinger af radon, er veletableret og har været i brug på Risø i mere end 10 år [Ma86^a, Ma86^b]. De procedurer, som anvendes ved ætsning, sportælling og databehandling forbedres dog løbende, og der er således også foretaget systemændringer fra undersøgelsens indledende målinger i vinteren 1994–95 til dem, som blev foretaget i vinteren 1995–96. Et vigtigt element til opretholdelsen af en konstant (høj) kvalitet af målemetoden er, at systemet kalibreres mod internationale standarder, og Risø har derfor siden 1980'erne jævnligt deltaget i internationale kalibreringsøvelser.

I forbindelse med projektets supplerende undersøgelser foreligger der tre husmålinger, hvor der blev foretaget (næsten) samtidige målinger med sporfolieteknikken og med kontinuerte radonmonitører af ionkammertypen. Som det fremgår af Tabel 20 side 36 gav sporfolierne i alle tre tilfælde lavere gennemsnitskoncentrationer i forhold til de kontinuerte radonmonitører. Afvigelsen var størst for hus nr. 4185, hvor sporfoliet i stuen gav resultatet 590 Bq m⁻³ mod 1300 Bq m⁻³ for den kontinuerte radonmonitor samme sted.

Følgende potentielle forklaringer på denne store afvigelse kan umiddelbart identificeres:

Kalibreringsfejl Sporfoliemetodens kalibrering er sporbar til NRPB¹⁵, som er det europæiske referencelaboratorium inden for det internationale radonkalibreringsprogram. De kontinuerte radonmonitører er kalibreret af det tyske firma, som har fremstillet dem. Kalibreringen hævdes at være sporbar til NIST¹⁶. Undersøgelser har vist, at monitorernes kalibrering er i overensstemmelse med den kalibrering, man ville opnå, dersom man lagde Risø's radonkilder til grund. Risø har to radonkilder, som er fremstillet efter samme princip som den svenske reference [Fa90]. Begge kilder bygger på radium-226 *Standard Reference Materials (SRM's)* fra NIST. Desuden har Risø en radonkilde fra Pylon Electronics Inc. i Canada. Denne kilde er sporbar til NIST.

Det vurderes, at sporfolieteknikkens resultater er behæftet med en usikkerhed på 6.5 % hidrørende fra kalibreringen, og det vurderes, at resultaterne fra de kontinuerte radonmonitører er behæftet med en usikkerhed på omkring 10 % hidrørende fra kalibreringen. Forskellen mellem metodernes tilgrundliggende kalibreringer vurderes derfor, ikke at kunne redegøre for mere end omkring

¹⁵National Radiological Protection Board, Storbritannien.

¹⁶National Institute of Standards and Technology, USA.

10–15 % af forskellen mellem de to metoders resultater i hus nr. 4185. Ved en høj eksponering (svarende til at være i et hus med ca. 1000 Bq m^{-3} i 80 dage) blev der under laboratorieforhold dog registreret en afvigelse på 25 % mellem sporfoliemetoden og de kontinuerede radonmonitører. Denne måling foregik dog ikke under forhold, som var ideelle for sporfoliemetoden. I den konkrete laboratoriesammenligning viste den kontinuerede radonmonitor den højeste værdi.

Thoron De kontinuerede radonmonitører kan ikke direkte skelne mellem radon (radon-222) og thoron (radon-220). Det kan sporfoliemetoden for så vidt heller ikke, men da thoron er meget kortlivet (56 sekunder halveringstid) henfalder hovedparten inden gassen når ind i pastkapslen, som beskytter foliet – se Figur 2 side 11. I princippet kan den observerede afvigelse derfor forklares, dersom thoronkoncentrationen i huset var passende høj. For at thoron alene skulle kunne redegøre for afvigelsen, kræves der imidlertid, at den indendørs thoronkoncentration i gennemsnit var omkring 6000 Bq m^{-3} , hvilket er urealistisk højt i sammenligning med (1) hvad der er målt i andre lande, (2) de geologiske forhold, og (3) rummets radonkoncentration (ca. 600 Bq m^{-3}). Det kan dog naturligvis ikke afvises, at der faktisk *var* thoron til stede i lokalet, og at dette forklarer en del af afvigelsen (måske op til 10 %) mellem sporfoliemålingen og målingen med den kontinuerede radonmonitor.

Rumlig fordeling af radonkoncentrationen Den kontinuerede radonmonitor var ved målingen i hus nr. 4185 placeret på gulvet under et lille bord i et hjørne af stuen, og sporfoliedosimetret var, ifølge oplysning fra beboerne, placeret på en nærtstående reol omkring 2 m over gulvet.

Figur 14 side 40 viser, at under målingerne med kontinuerede radonmonitører i foråret-sommeren 1996 var radonkoncentrationen i stue og soveværelse stort set ens. F.eks. var den gennemsnitlige radonkoncentration 719 Bq m^{-3} i stuen og 751 Bq m^{-3} i soveværelset (8. til 21. april 1996). Ved disse målinger var stueмонитøren placeret på samme sted som i foråret 1995, mens monitøren i soveværelset var placeret på gulvet under en seng. Der blev ikke ved den lejlighed målt radon med sporfoliemetoden, men som anført side 29 var sporfoliemålingerne i vinteren 1994–95 såvel som foråret-sommeren 1995 ens i stue og soveværelse.

Ovennævnte forhold viser, at radonkoncentrationen i huset i målehøjderne hhv. ca. 5 cm og ca. 2 m over gulv var ens i de testede perioder, hvilket er et argument for, at der normalt hersker horisontal homogenitet i huset. Dette udelukker dog ikke eksistensen af en vis *vertikal* radonkoncentrationsgradient. En sådan kunne tænkes at eksistere som følge af dårlig luftopblanding samt det forhold, at radon må formodes primært at trænge ind via betondækket.

Andre forhold Fejl ved placering eller behandling af sporfoliedosimeterne kan ikke udelukkes. Hvis eksempelvis dosimetrene blev sat op senere eller nedtaget før de datoer, som er anvendt ved beregningen af radonkoncentrationen, vil sporfoliemålingen give en for lille radonkoncentration. Sådanne problemer blev faktisk registreret i forbindelse med sporfoliemålingerne i huset i vinteren 1994–95, hvilket er baggrunden for at disse målinger blev tilskrevet en stor usikkerhed (se side 19 og 96).

Det har ikke inden for projektet været muligt at afklare kilden til den observerede afvigelse mellem sporfoliemålingerne og målingerne med den kontinuerede radonmonitor i hus nr. 4185. Begge metoder er veletablerede og testes jævnlige. Det kan konkluderes, at uoverensstemmelsen ikke umiddelbart kan forklares ved en enkelt af de nævnte forhold, men muligvis som en kombination.

Tabel 25. Vinter-til-årsmiddelforhold (dvs. sæsonkorrektionsfaktorer) for enfamiliehuse anvendt i denne og to andre danske undersøgelser. *N* angiver antallet af huse. *AM* og *AS* er hhv. aritmetisk middelværdi og standardafvigelse.

Undersøgelse	Vinter-til-årsmiddel forhold			Bemærkninger
	<i>N</i>	<i>AM</i>	<i>AS</i>	
Denne undersøgelse (se Tabel 7 side 22)	21	1.21	0.15	Ramsø
	24	1.15	0.11	Allinge-Gudhjem
	18	1.28	0.17	Thisted
	63	1.21	0.15	Alle tre områder
Undersøgelse i Hvalsø i 1990–91 [Ma92]	67	1.28	0.25	Stue
	67	1.34	0.27	Soveværelse
Landsdækkende dansk undersøgelse i 1985–86 [SIS87 ^b]	~100	1.25	-	Huse på moræneler
	~50	1.12	-	Huse på sand og grus

Årsmiddelværdier

De årsmidlede radonkoncentrationer, som angives i denne rapport, er alle vurderet på baggrund af tidsintegrerede radonmålinger over én eller flere perioder, som hver havde en varighed på typisk 70–80 dage. For at gennemføre beregningerne var det nødvendigt med en række antagelser. Eksempelvis var det ikke muligt at vurdere årsmiddelværdien for husene i reduktionsgruppen *efter* reduktionsforanstaltningerne uden en antagelse om, hvordan foranstaltningerne havde påvirket sæsonvariationen. I mangel af bedre blev den simplest mulige antagelse valgt; nemlig, at reduktionsforanstaltningerne *ikke* havde påvirket årsvariationen. Det er ikke umiddelbart muligt at teste gyldigheden af denne eller andre af de anvendte antagelser og beregningsprincipper, da undersøgelsen ikke omfattede huse, hvor radonkoncentrationen blev målt over et helt år. Usikkerheden ved de enkelte beregninger er dog søgt vurderet, som angivet i Appendiks D. Desuden er de anvendte sæsonkorrektionsfaktorer i acceptabel overensstemmelse med resultaterne fra to tidligere danske undersøgelser (see Tabel 25).

Reduktionseffektiviteter

Det grundlæggende problem i forbindelse med vurderinger af effektiviteten af reduktionstiltag er, at radonkoncentrationen af helt naturlige årsager varierer f.eks. fra den ene vinter til den anden. Det er således uvist hvad radonkoncentrationen ville have været i husene i reduktionsgruppen i vinteren 1995–96, dersom reduktionsforanstaltningerne ikke var indført.

En tidligere dansk undersøgelse af radonkoncentrationen i 7 Risø huse [Ma90] har eksempelvis vist, at radonkoncentrationen indendørs er højere i strenge vintre end i milde. Det fremgår af Tabel 16 side 33, at udetemperaturerne i nærværende undersøgelse netop var meget forskellige i de to vinterperioder, som ligger til grund for beregningen af reduktionseffektiviteterne. På den baggrund er det ikke rimeligt at antage, at radonkoncentrationen i husene i reduktionsgruppen i vinteren 1995–96 ville have været den samme som i vinteren 1994–95, dersom reduktionsforanstaltningerne ikke var indført. Dette måletekniske problem er af betydning især i de tilfælde, hvor reduktionstiltagenes effektivitet er meget lav. Som beskrevet nøjere i Appendiks C, anvendes i denne undersøgelse koncentrationsmålinger i en (kontrol)gruppe af huse, hvor der ikke blev gennemført reduktionsforanstaltninger, til at korrigere for sådanne naturlige variationer i vinterkoncentrationen. Det antages, at husene i denne kontrolgruppe har samme vinter-til-vinter variation som husene i reduktionsgruppen ville have haft dersom tiltagene ikke var gennemført. Denne

Variationer fra den ene vinter til den anden

Korrektion vha. kontrolgruppe

antagelse forekommer rimelig, da husene i kontrol- og reduktionsgrupperne er placeret i de samme områder og således underkastet samme geologi og klimaforhold. På den anden side er der netop det særlige ved husene i reduktionsgruppen, at de alle har radonkoncentrationer større end husene i kontrolgruppen. Således er den geometriske middelværdi for radonkoncentrationen i reduktionsgruppen i vinteren 1994–95 385 Bq m^{-3} mod kun 193 Bq m^{-3} for kontrolgruppen. Arvela har tidligere vist [Ar95], at for finske forhold er sæsonvariationer af indendørskoncentrationen af radon koblet til koncentrationernes størrelse. Finske huse med høje radonkoncentrationer har tendens til at have et større vinter-til-sommer forhold end finske huse med lave koncentrationer. Effekten er imidlertid ikke stor for huse med radonniveauer over 200 Bq m^{-3} , idet vinter-til-årsmiddelforholdet for finske huse med en vinterkoncentration omkring 200 Bq m^{-3} i gennemsnit afviger mindre end 4 % fra vinter-til-årsmiddelforholdet for finske huse med vinterkoncentrationer omkring 400 Bq m^{-3} . Arvela forklarer fænomenet med forskelle i indtrængningsmekanismer (advektion versus diffusion) [Ar95].

Som nævnt er variationer i udetemperaturen en væsentlig årsag til variationer i radonkoncentrationen fra én vinter til en anden og tilsvarende fra én sæson til en anden [Ma90, Ar95]. Hvis husene i kontrolgruppen radonmæssigt skulle opføre sig væsensforskelligt fra husene i reduktionsgruppen mht. vinter-til-vinter forhold (se Tabel 9 side 27) skulle det forventes at det samme ville være tilfældet mht. vinter-til-årsmiddelforholdet (se Tabel 7 side 22). Det er derfor værd at bemærke, at for 1994–95 var der ingen signifikant forskel mellem den gennemsnitlige årstidsvariation for hhv. kontrolgruppen og reduktionsgruppen. Dette gælder både hvis disse betragtes områdevis og samlet. Dette underbygger antagelsen om, at den udvalgte kontrolgruppe har samme vinter-til-vinter variation som husene i reduktionsgruppen ville have haft, dersom tiltagene ikke var gennemført.

Påvirkning af kontrolgruppen

Udgangspunktet for valget af kontrolgruppe er, at der ikke foretages tiltag til reduktion af radonkoncentrationen i disse huse. Det kan imidlertid ikke udelukkes at selve undersøgelsen og den deraf følgende øgede opmærksomhed omkring radonproblematikken (dels i form af direkte vekselvirkninger mellem beboerne og projektet og dels mere indirekte via medieomtale af projektet) har givet anledning til ændrede beboervaner eller at beboerne for egen regning har gennemført mindre tiltag f.eks. til forbedring af husenes luftskifte. I lyset af at kontrolgruppen i gennemsnit havde ca. 15 % højere radonkoncentrationer i vinteren 1995–96 i forhold til vinteren 1994–95 er det ikke sandsynligt, at sådanne forhold har haft væsentlig betydning.

Reduktionseffektivitet om vinteren versus om sommeren

Vurderingerne af reduktionsforanstaltningernes effektivitet er foretaget på grundlag af vintermålinger. Undersøgelsen viser derfor ikke om foranstaltningerne har en tilsvarende effekt i de andre sæsoner. Tænd/sluk undersøgelserne i foråret–sommeren 1996 og de heraf beregnede radonreduktionseffektiviteter (se Tabel 21) tyder dog på, at de rapporterede vinter-reduktionseffektiviteter for de aktive tiltag (dvs. aktivt sug under terrændæk eller mekanisk udsugning i kældre o.lign) også kan udstrækkes til resten af året.

Valg af periode

Det kan diskuteres om vinteren er den bedste periode til at teste effektiviteten af radonreduktionsforanstaltninger. Fra et praktisk synspunkt er vinterperioden den bedste periode da radonkoncentrationen normalt er højst indendørs om vinteren. Desuden anbefaler EPA¹⁷, at sådanne *post-mitigation tests* udføres som 3-måneders radonmålinger om vinteren *to obtain a measure of sustained system performance under the challenging conditions that cold weather represents* [He88].

¹⁷Environmental Protection Agency, USA

6 Konklusion og anbefalinger

Radon-95 projektet er den første større undersøgelse af foranstaltninger til reduktion af radonkoncentrationen i rumluften i eksisterende danske enfamiliehuse. Projektets mål har været at få konkrete erfaringer med metoder til radonreduktion i et antal enfamiliehuse opført efter dansk byggeskik.

Projektets resultat er en analyse af reduktionsindgreb i 21 enfamiliehuse, hvor effekten af fem forskellige metoder til radonreduktion er målt. Projektet har samtidigt givet en forbedret statistisk viden om radonniveauerne i 3 udvalgte geologiske områder karakteriseret ved henholdsvis moræneler, opsprækket granit og opsprækket kalk. De udvalgte områder, der alle kan give anledning til forhøjede radonniveauer i indendørsluften, ligger i Ramsø, Allinge-Gudhjem og Thisted kommuner.

Projektet har omfattet en afprøvning af to aktive og tre passive metoder til sænkning af radonkoncentrationen. Ved aktive metoder anvendes en ventilator til regulering af luftstrømningen, medens de passive metoder er baseret på naturlige drivkræfter.

Aktiv udsugning under terrændæk er anvendt i to huse. Metoden har vist sig at være den mest effektive af de afprøvede tiltag, idet der i de to tilfælde er opnået reduktioner på henholdsvis 74 % og 95 %.

Aktiv udsugning fra kælderrum eller krybekælder under beboelsesrummene kombineret med udeluftventiler blev afprøvet i 4 huse. Metoden viste sig effektiv i tre tilfælde, hvor der blev opnået reduktioner på mere end 50 %. I det fjerde tilfælde havde indgrebet en reduktionseffekt på 25 % med en usikkerhed af samme størrelse som resultatet.

Passiv udsugning under terrændæk kombineret med udeluftventiler er afprøvet i ét hus. Metoden viste en reduktion på 23 %, med en usikkerhed af samme størrelse som resultatet.

Tætning af terrændæk ved membrandækning kombineret med udeluftventiler er afprøvet i ét hus. Denne metode viste en reduktion på 27 %, ligeledes med en tilknyttet usikkerhed af samme størrelse som måleresultatet.

Montering af udeluftventiler er i 13 huse afprøvet som det eneste indgreb over for radon. Indgrebet sigtede mod at forøge ventilationen i husene. Forøgelsen af udeluftventilarealet alene medførte dog ikke et væsentligt forbedret luftskifte. Med hensyn til radonreduktion viste metoden i gennemsnit en effekt på 11 ± 7 %.

Sammenfattende kan det siges, at de aktive reduktionsmetoder baseret på mekanisk udsugning under terrændæk eller i kælderrum under beboelsesrum har vist en god effekt, medens de passive metoder baseret på naturlig ventilation eller tætning af terrændæk kombineret med naturlig ventilation har vist en effekt på ca. 25 % eller mindre. Resultaterne for de passive metoder er behæftet med relativ stor usikkerhed.

Sammenholdes resultaterne med erfaringer i f.eks. Sverige og Storbritannien, kan det konkluderes, at de opnåede reduktionseffektiviteter for de aktive metoder stemmer overens med nabolandenes resultater. For de passive metoder er de opnåede reduktioner tilsyneladende mindre end de resultater, der er opnået i nabolandene.

På grundlag af radonmålingen i de 270 enfamiliehuse i vinteren 1994–95 er årsmiddelværdien af radonkoncentrationen i de enkelte huse vurderet. Den gennemsnitlige radonkoncentration i de tre områder er 99 Bq m^{-3} for Ramsø, 138 Bq m^{-3} for Allinge-Gudhjem og 101 Bq m^{-3} for Thisted, hvilket i alle tre tilfælde er markant højere end landsgennemsnittet for enfamiliehuse, som er 68 Bq m^{-3} .

Den registrerede andel af huse med niveauer større end 200 Bq m^{-3} er 11 % for Ramsø, 16 % for Allinge-Gudhjem og 9 % for Thisted, hvilket også er markant

større end den tilsvarende andel på 3 % for enfamiliehuse på landsplan.

Resultaterne viser, at det undersøgte område i Allinge-Gudhjem Kommune har den største radonbelastning. Området har den største gennemsnitlige radonkoncentration, de største enkeltniveauer, den største andel af huse med en radonkoncentration i rumluften på mere end 200 Bq m⁻³, og området er det eneste med målte årsmiddelværdier over 400 Bq m⁻³ (6 %).

Sammenfattende viser denne del af undersøgelsen, at den anvendte metode for søgning af boliger med forhøjede radonniveauer har været virkningsfuld.

Afslutningsvis kan det konkluderes, at de aktive metoder til radonreduktion fungerer og er til rådighed for en teknisk anvendelse i danske huse. Metoderne er de dyreste at anvende, men prisen kan sandsynligvis sænkes, hvis der opnås rutine med installationsarbejdet. Det anbefales, at metoderne benyttes i tilfælde, hvor der ønskes indgreb over for særligt høje radonkoncentrationer.

Med hensyn til de passive reduktionsmetoder, kan det konkluderes, at de formodentlig har en vis begrænset effekt. Metoderne er billigere end de aktive, og de egner sig bedst til sænkning af moderate radonniveauer. Perspektivet kunne være, at opnå moderate radonreduktioner i en stor del af boligmassen for på længere sigt, at opnå en reduceret strålingsbelastning for befolkningen.

En udvikling i den retning forudsætter imidlertid, at samspillet mellem radonkoncentrationen i indendørsluften og husets naturlige ventilation undersøges nærmere. Herved kan der etableres et bedre grundlag for at opnå et forøget luftskifte uden samtidig at forøge indstrømningen af radon til huset.

Litteratur

- [An92] Andersen C.E.: Entry of Soil gas and radon into houses. Risø-R-623(EN), Forskningscenter Risø (1992).
- [An95] Andersen, C.E.: What are the requirements for accuracy and precision in soil-gas radon measurements? I: Hutter, A.R. og Knutson, E.O.: IRMP-6: International radon metrology programme, exercise no. 6: Workshop on the state of the art in measuring soil gas radon and exhalation from soil. Environmental Measurements Laboratory, New York, NY (US), 12–15 June (1995).
- [An96^a] Andersen, C.E., Koopmans, M. og de Meijer, R.J.: Identification of advective entry of soil-gas radon into a crawl space covered with sheets of polyethylene foil. Risø-R-879(En), Forskningscenter Risø (1996).
- [An96^b] Andersen, C.E. Bergsøe, N.C., Majborn, B. og Ulbak, K.: Radon and natural ventilation in newer Danish single-family houses. Tilsendt tidsskriftet *Indoor Air* (1996).
- [Ap95] Appleton, J.D. og Ball, T.K.: Radon and background radioactivity from natural sources: characteristics, extent and relevance to planning and development in Great Britain. British Geological Survey, technical report WP/95/2 (1995).
- [Ar93] Arvela, H. og Hoving, P.: Finnish experiences in indoor radon mitigation. Proceedings of Indoor Air '93, vol. 4, 563–569 (1993).
- [Ar95] Arvela, H.: Seasonal variation in radon concentration of 3000 dwellings with model comparisons. Radiation Protection Dosimetry, vol. 59(1), 33–42 (1995).

- [Au96] Auvinen, A. Mäkeläinen, I., Hakama, M., Castrén, O., Pukkala, E., Reisbacka, H. og Rytömaa, T.: Indoor radon exposure and risk of lung cancer: A nested case-control study in Finland. *Journal of National Cancer Institute*, vol. 88(14), 966–972 (1996).
- [Be92] Bergsøe, N.C.: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser. Beskrivelse og analyse af PFT-metoden. SBI-rapport 227. Statens Byggeforskningsinstitut (1992).
- [Be94^a] Bell, P. og Cripps, A.: Using pressure field extension tests to improve radon protection in housing. Artikel tilsendt: 15th AIVC conference, Buxton, UK, September (1994).
- [Be94^b] Bergsøe, N.C.: Ventilationsforhold i nyere, naturligt ventilerede enfamiliehuse. SBI-rapport 236. Statens Byggeforskningsinstitut (1994).
- [Be96] Bergsøe, N.C.: Naturlig ventilation i enfamiliehuse. SBI-meddelelse 116. Statens Byggeforskningsinstitut (1996).
- [BEIR88] Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR-IV): Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters. Washington, DC (US), National Academy Press (1988).
- [Bo94] Bonnefous, Y.C., Gadgil, A.J. og Fisk, W.J.: Impact of subslab ventilation technique on residential ventilation rate and energy costs. *Energy and Buildings*, vol. 21, 15–22 (1994).
- [Br90] Brennan, T., Osborne, M.C. og Brodhead, B.: Evaluation of radon resistant new construction techniques. I: The 1990 International symposium on radon and radon reduction technology. Preprints. The 1990 International symposium on radon and radon reduction technology, Atlanta, 19-23 Feb 1990. EPA/600/9-90/005d. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, VIII-1 (1990).
- [BRE92] Building Research Establishment: Radon sumps: A BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. BRE-guide BR-227, Building Research Establishment, Watford, Storbritannien (1992).
- [BRE94^a] Building Research Establishment: Radon and buildings: 1; Spillage of combustion products. BRE guide Building Research Establishment, Watford, Storbritannien (1994).
- [BRE94^b] Building Research Establishment: Radon and buildings: 2; Minimising noise from fan-assisted radon sump systems. BRE guide. Building Research Establishment, Watford, Storbritannien (1994).
- [By87] Byggestyrelsen: Radon i boliger (pjece). Boligstyrelsen (1987).
- [By93] Bygge- og Boligstyrelsen: Radon og nybyggeri (pjece), 2. udgave. Bygge- og Boligstyrelsen (1993).
- [By94] Bygge- og Boligstyrelsen: Undersøgelse af lufttæthed i bygningskonstruktioner (pjece). Bygge- og Boligstyrelsen (1994).
- [Cl90] Clarkin, M., Brennan, T. og Osborne, M.C.: Energy penalties associated with the use of a sub-slab depressurization system. I: The 1990 International symposium on radon and radon reduction technology. Preprints. The 1990 International symposium on radon and radon reduction technology, Atlanta, 19-23

- Feb 1990. EPA/600/9-90/005d. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, D-VII-1 (1990).
- [Cl92] Clavensjö B. og Åkerblom, G.: Radonboken. Åtgärder mot radon. Byggeforskningsrådet. Stockholm (1992).
- [Cl94] Cliff, K.D., Naismith, S.P. Scivyer, C. og Stephen, R.: The efficacy and durability of radon remedial measures. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 56(1-4) 65-69 (1994).
- [CMHC91] Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC): Airtightness of concrete basement slabs. Rapport udført af: G.K. Yuill & Associates (MAN.) LTD. 200-1200 Pembina Highway, Winnipeg, Manitoba, R3T 2A7 Canada (1991).
- [Cr94] Cripps, A.: Flow rates and pressure distributions produced by radon sumps. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 56(1-4), 175-178 (1994).
- [Da88] Damkjær, A. og Korsbech, U.: A search for correlation between local geology and indoor radon concentrations. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 24. 51-53 (1988).
- [Da96] Damkjær, A., Andersen, C.E., Majborn, B., Ulbak, K. og Graveisen, P.: A search profile for dwellings with elevated radon levels. *Environment International*, vol. 22(suppl. 1), 783-788 (1996).
- [Fa90] Falk, R., Möre, H. og Nyblom, L.: Calibration of radon-222 reference instrument in Sweden. *Journal of Research of the National Institute of Standard and Technology*, vol. 95(2), 115-120 (1990).
- [Fi90] Findlay, W.O., Robertson, A. og Scott, A.G.: Testing of indoor radon reduction techniques in central Ohio houses: Phase 2 (Winter 1988-1989). Report EPA-600/8-90-050, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, USA (1990).
- [Fi95] Fisk, W.J., Prill, R.J., Wooley, J., Bonnefous, Y.C., Gadgil, A.J. og Riley, W.J.: New methods of energy efficient radon reduction mitigation. *Health Physics*, vol. 68(5), 689-698 (1995).
- [Ga94^a] Gadd, M.S. og Borak, T.B.: Partitioning og ²²²Rn entry into a structure surrounded by soil. *Health Physics*, vol. 67(1), 53-59 (1994).
- [Ga94^b] Gadgil, A.J., Bonnefous, Y.C., og Fisk, W.J.: Relative effectiveness of sub-slab pressurization and depressurization systems for indoor radon mitigation: Studies with an experimentally verified numerical model. *Indoor Air*, vol. 4, 265-275 (1994).
- [Gr93] Green, B.M.R., Hughes, J.S., og Lomas, P.R.: Radiation atlas: Natural sources of ionizing radiation in Europe. Final report. Commission of the European Communities, Brussels. Directorate-General, Environment, Nuclear Safety and Civil Protection. EUR-14470 (1993).
- [Gu92] Gundersen, L.C.S., Schumann, R.R., Otton, J.K., Dubiel, R.F., Owen, D.E. og Dickinson, K.A.: Geology of radon in the United States. I: Gates, A.E. og Gundersen, L.C.S. (eds.): Geologic controls on radon. Geological Society of America Special Paper 271, 1-15 (1992).

- [He88] Henschel, D.B.: Radon reduction techniques for detached houses; Technical Guidance (second edition). United States Environmental Protection Agency. EPA/625/5-87/019 (1988).
- [He92] Henschel, D.B.: Indoor radon reduction in crawl-space houses: A review of alternative approaches. *Indoor Air*, vol. 2, 272–287 (1992).
- [He94] Henschel, D.B.: Analysis of radon mitigation techniques used in existing US houses. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 56(1–4), 21–37 (1994).
- [He95] Henschel, D.B.: Re-entrainment and dispersion of exhausts from indoor radon reduction systems: Analysis of tracer gas data. *Indoor Air*, vol. 5, 270–284 (1995).
- [Ho93] Hoving, P. og Arvela, H.: Effectiveness of ventilation improvements as a protective measure against radon. *Proceedings of Indoor Air '93*, vol. 4, 615–620 (1993).
- [Ho96] Holford, D.J. og Freeman, H.D.: Effectiveness of a passive subslab ventilation system in reducing radon concentrations in a home. *Environmental Science and Technology*, vol. 30, 2914–2920 (1996).
- [Hu95] Hutter, A.R. og Knutson, E.O.: IRMP-6: International radon metrology programme, exercise no. 6: Workshop on the state of the art in measuring soil gas radon and exhalation from soil. Environmental Measurements Laboratory, New York, NY (US), 12–15 June (1995).
- [ICRP93] ICRP publication 65: Protection against Radon-222 at home and at work. *Annals of the ICRP*, vol. 23(2) (1993).
- [Jo88] Jonassen, N. og McLaughlin, J.P.: Removal of radon and radon progeny from indoor air. I: Nazaroff, W.W. og Nero, A.V. (eds.): Radon and its decay products in indoor air. John Wiley & Sons, 435–458 (1988).
- [Jo96] Jostes, R.F.: Genetic, cytogenetic, and carcinogenic effects of radon: A review. *Mutation Research - Reviews in Genetic Toxicology*, vol. 340(2-3), 125–139 (1996).
- [Le94] Leovic, K.W. og Roth, R.: Radon control strategies. I: Nagda, N.L. (ed): Radon: Prevalence, measurements, health risks and control. ASTM Manual Series: MNL 15, ASTM Publication code number (PCN) 28–015094–17 (1994).
- [Ma86^a] Majborn, B. Measurements of radon in dwellings with CR-39 track detectors. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, vol. 12(1–6), 763–766 (1986).
- [Ma86^b] Majborn, B. Automated counting and analysis of etched tracks in CR-39 plastics. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 17, 153–155 (1986).
- [Ma88] Majborn, B., Sørensen, A., Nielsen, S.P. og Bøtter-Jensen, L.: An investigation of factors influencing indoor radon concentrations. Risø-M-2689, Forskningscenter Risø (1988).

- [Ma90] Majborn, B.: Seasonal variations of indoor radon concentrations. I: The 1990 International symposium on radon and radon reduction technology. Vol. 3. Preprints. The 1990 International symposium on radon and radon reduction technology, Atlanta, 19-23 Feb 1990. EPA/600/9-90/005C. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, C-V-3 (1990).
- [Ma92] Majborn, B.: Seasonal variations of radon concentrations in single-family houses with different sub-structures. *Radiation Protection dosimetry*, vol. 45(1/4), 443–447 (1992).
- [Mo86] Mowris, R.J.: Analytical and numerical models for estimating the effect of exhaust ventilation on radon entry in houses with basements or crawl spaces. LBL-22067. Lawrence Berkeley Laboratory, USA (1986).
- [Na85] Nazaroff, W.W. og Doyle, S.M.: Radon entry into houses having a crawl space. *Health Physics*, vol. 48(3), 265–281 (1985).
- [Na88^a] Nazaroff, W.W., Moed, B.A. og Sextro, R.G.: Soil as a source of indoor radon: Generation, Migration, and Entry. I: Nazaroff, W.W. og Nero, A.V. (eds.): *Radon and its decay products in indoor air*. John Wiley & Sons, 57–112 (1988).
- [Na88^b] Nazaroff, W.W. and Nero, A.V. (eds.): *Radon and its decay products in indoor air*. John Wiley & Sons (1988).
- [Na88^c] Nazaroff, W.W.: Entry by pressure-driven flow or molecular diffusion? A reassessment of ²²²Rn concentrations measured in an energy-efficient house (correspondance). *Health Physics*, vol. 55(6), 1005–1009 (1988).
- [Na92] Nazaroff, W.W.: Radon transport from soil to air. *Reviews of Geophysics*, vol. 30(2), 137–160 (1992).
- [Na94] Nagda, N.L. (ed): *Radon: Prevalence, measurements, health risks and control*. ASTM Manual Series: MNL 15, ASTM Publication code number (PCN) 28–015094–17 (1994).
- [Ne93] Nexø, B. A. og Nielsen, G.D.: Toksikologisk vurdering af indeklimaforureninger. Rapport udarbejdet for Bygge- og Boligstyrelsen (1993).
- [OC93] O’Connor, P.J., Gallagher, V. og Madden, J.S.: Assessment of the geological factors influencing the occurrence of radon hazard areas in a karstic region. RS93/2. Geological Survey of Ireland report series (1993).
- [Pe94] 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*, vol. 330(3), 159–164 (1994).
- [Py93] Pye, P.W.: Sealing cracks in solid floors: A BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. BRE-guide BR-239. Building Research Establishment, Watford, Storbritannien (1993).
- [Ri96] Riley, W.J., Fisk, W.J. og Gadgil, A.J.: Regional and national estimates of the potential energy use, energy cost and CO₂ emissions associated with radon mitigation by sub-slab depressurization. *Energy and Buildings*, vol. 24(3), 203–212 (1996).

- [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*, vol. 69(3), 367–377 (1995).
- [Sa90] Saum, D.W. og Osborne, M.C.: Radon mitigation performance of passive stacks in residential new construction. I: The 1990 International symposium on radon and radon reduction technology. Preprints. The 1990 International symposium on radon and radon reduction technology, Atlanta, 19-23 Feb 1990. EPA/600/9-90/005e. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, VIII-2 (1990).
- [Sc93] Scivyer, C.R.: Surveying dwellings with high indoor radon levels: A BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings BRE-guide BR-250. Building Research Establishment, Watford, Storbritannien (1993).
- [Sc94] Scivyer, C.R.: Major alterations and conversions: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. BRE-guide BR-267. Building Research Establishment, Watford, Storbritannien (1994).
- [SIS87^a] Statens Institut for Strålehygiejne: Radioaktive stoffer i drikkevand (1987).
- [SIS87^b] Statens Institut for Strålehygiejne og Forskningscenter Risø: Naturlig stråling i danske boliger (1987).
- [SIS87^c] Statens Institut for Strålehygiejne: Radon-boliger-strålingsdosis-lungekræftisiko (1987).
- [St92] STUK: Åtgarder mot radon. STUK 1992, Strålsakerhetscentralen, Finland (1992).
- [Sw90] Swedjemark, G.A. og Mäkitalo, A.: Recent Swedish experiences in ²²²Rn control. *Health Physics*, vol. 58(4), 453–460 (1990).
- [Sø85] Sørensen A., Bøtter-Jensen, L., Majborn, B. og Nielsen, S.P.: A pilot investigation of natural radiation in Danish houses. Risø-M-2483, Forskningscenter Risø (1985).
- [Ul84] Ulbak, K., Jonassen, N. og Bækmark, K.: Radon exhalation from samples of concrete with different porosities and fly ash additives. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 7(1–4), 45–58 (1984).
- [Ul94] Ulbak, K., Majborn, B., Andersen, C.E. og Bergsøe, N.C.: Radon i nyere, naturligt ventilerede énfamiliehuse. Rapport fra Sundhedsstyrelsen, Statens Institut for Strålehygiejne (1994).
- [Wa93] Ward, D.C., Borak, T.B. og Gadd, M.S.: Characterization of ²²²Rn entry into a basement structure surrounded by low-permeability soil. *Health Physics*, vol. 65(1), 1–11 (1993).
- [We95] Welsh, P.: Personlig kommunikation. Building Research Establishment, Watford, Storbritannien (1995).
- [Wi82] Wilson, M.R. og Åkerblom, G.V.: Geological setting and geochemistry of uraniumrich granites in the Proterozoic of Sweden. *Mineral. Mag.*, vol. 46, 233–245 (1982).
- [Wo94^a] Woolliscroft, M.: The mechanical ventilation of suspended timber floors for radon remediation—A simple analysis. Artikel tilsendt: 15th AIVC conference, Buxton, UK, September (1994).

- [Wo94^b] Woolliscroft, M., Scivyer, C., og Parkins, L.: Field trials on the effectiveness of radon protection measures in new dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 56(1-4), 33-40 (1994).
- [Yu94] Yuill, G.K. og Coughlin, R.J.: Reentry of radon from mitigation system outlets. *ASHRAE Transactions (OR-94-3-1)*, vol. 100, pt. 2 (1994).

A Projektjournal

- 30.08.94 Møde i følgegruppen. Projektplanen fremlægges og enkelte mindre ændringer vedtages.
- 13.09.94 Tilsagnsskrivelse fra Bygge- og Boligstyrelsen på grundlag af den endelige projektplan dateret 7. september 1994.
- 15.09.94 Møde på GEUS om valg af undersøgelsesområder.
- 23.09.94 Kommunerne orienteres og anmodes om samarbejde. Områder og adresser udvælges.
- okt. 1994 Brev fra SIS til beboerne med anmodning om at deltage.
- 21.11.94 Radondosimetre udsendes.
- primo feb. Radondosimetre retur.
- 16.02.95 Møde i følgegruppen. Resultatet af radonmålingerne forelægges.
- 21.02.95 KU og AD til orienteringsmøde hos Thisted Kommune.
- 22.02.95 KU og AD til orienteringsmøde hos Allinge-Gudhjem Kommune.
- 23.02.95 KU og AD til orienteringsmøde hos Ramsø Kommune.
- 20.03.95 Breve med måleresultater udsendes til beboerne. Anmodninger om deltagelse i reduktionsgruppen og kontrolgruppen vedlagt.
- 30.03.95 JB og NB besøger husene i reduktionsgruppen i Ramsø Kommune samt Teknisk Forvaltning 30. og 31. marts, med henblik på inspektion og ventilationsmåling.
- 06.04.95 JB og NB besøger husene i reduktionsgruppen i Thisted Kommune samt Teknisk Forvaltning 6. og 7. april med henblik på inspektion og ventilationsmåling.
- 06.04.95 Radondosimetre udsendes.
- 11.04.95 JB og NB besøger husene i reduktionsgruppen i Allinge-Gudhjem Kommune samt Teknisk Forvaltning 11. og 12. april med henblik på inspektion og ventilationsmåling.
- 26.06.95 AD og CA besøger husene i reduktionsgruppen i Allinge-Gudhjem Kommune 26. og 27. august.
- 29.06.95 AD og CA besøger husene i reduktionsgruppen i Thisted Kommune.
- 07.08.95 AD og CA besøger husene i reduktionsgruppen i Ramsø Kommune.
- 18.08.95 Møde hos COWI. Oplæg til reduktionsforanstaltninger udarbejdes.
- 24.08.95 Møde hos SIS. Gennemgang af forslag til reduktionsforanstaltninger.
- medio dec. Reduktionsforanstaltninger gennemført.
- 14.12.95 Radondosimetre udsendes til reduktions- og kontrolgruppen.
- primo marts Radondosimetre retur til Risø.
- marts 96 Ventilationsmålinger.
- primo april Sidste radondosimetre retur til Risø.
- 02.05.96 Følgegruppemøde hos SIS. Gennemgang af resultater.
- 06.06.96 Følgegruppemøde hos SIS. Planlægning af resultatbreve til beboerne.
- 11.06.96 Resultatbreve udsendes til reduktions- og kontrolgruppen.
- 24.09.96 Arbejdsgruppemøde på Risø vedr. slutrapporten.
- 02.10.96 Møde med Thisted Kommune. KU og AD orienterer om projektets resultater.
- 03.10.96 Møde med Allinge-Gudhjem Kommune. KU og AD orienterer om projektets resultater.
- 22.10.96 Møde med Ramsø Kommune. KU og AD orienterer om projektets resultater.
- 18.12.96 Følgegruppemøde hos SIS. Fremlæggelse af udkast til slutrapport.
- april 1997 Slutrapport afleveres.

B Geologisk udredning

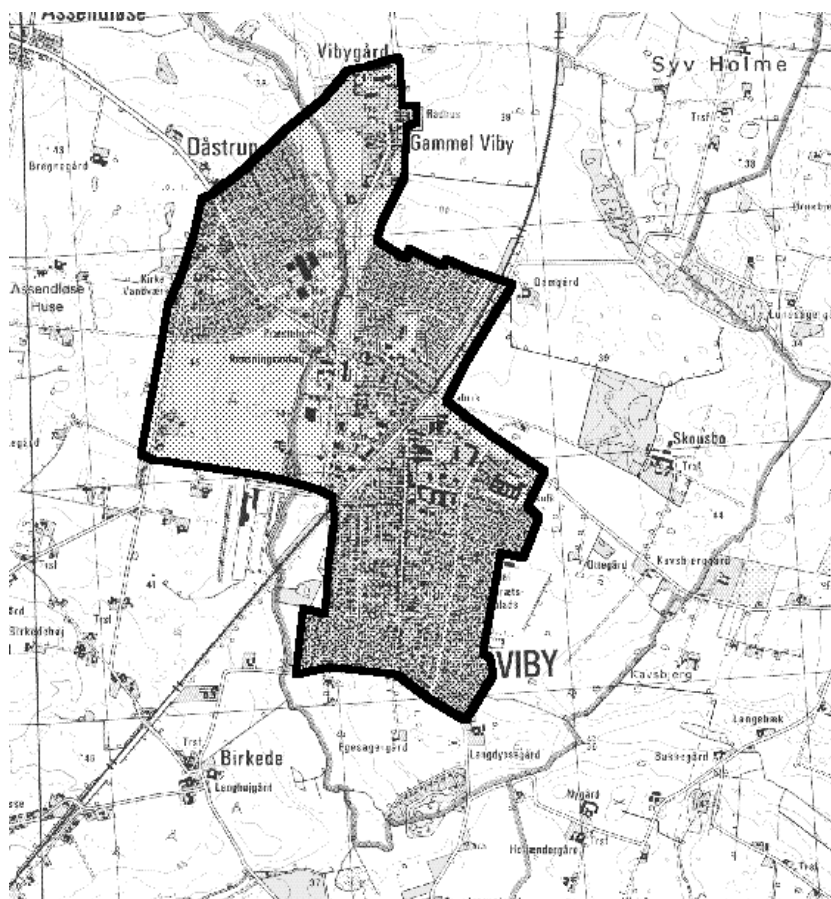
B.1 Indledning

På baggrund af viden om radonforhold og geologi i Danmark er der blevet udpeget tre undersøgelsesområder med henholdsvis moræneler, opsprækket granit og opsprækket kalk, hvor der er en passende tyk umættet zone i de øvre jordlag over grundvandet (Damkjær et al., 1996):

- Viby-Dåstrup, Ramsø, Sjælland, hvor der findes moræneler ovenpå Palæocæne grønsandsaflejringer.
- Allinge-Sandvig, Sandkås-Tejn og Gudhjem, Nordbornholm, hvor der kun er få meter eller ingen sedimenter over graniten.
- Thisted, Thy, Jylland, hvor der findes højtliggende, opsprækket kalk med et tyndt dække af Kvartære sedimenter.

B.2 Viby-Dåstrup

Området indbefatter tre mindre byer: Viby, Gl. Viby og Dåstrup liggende indenfor Ramsø Kommune i Roskilde amt (Figur 17).



Figur 17. Undersøgelsesområdet ved Viby-Dåstrup på Sjælland. Udsnit af 1513 III Havdrup i 1:25 000 (med tilladelse fra Kort- og Matrikelstyrelsen).

Geologiske forhold

I Ramsø Kommune tilhører lagene lige under de kvartære lag Palæocæn tidsafsnittet. Palæocæn aflejringerne består af grønsand, grønsandskalk og ler fra Lellinge Grønsand Formationen (Salinas, 1992). Aflejringerne er gennemsat af forkastninger, og bjergarterne må forventes at være opknust i disse zoner. De overliggende kvartære aflejringer består af moræneler, tynde lag af morænesand og smeltevandssand- og grus.

Indenfor Viby-Dåstrup området ligger terrænoverfladen fra kote + 35 m til + 40 m (Salinas, 1992). De palæocæne aflejringer består af ret fedt, siltet eller sandet grønsandsler og undertiden af svagt hærdnet-hærdnet, leret eller sandet grønsandskalk. Grænsen mellem Palæocæn og Kvartær ligger omkring kote 0 til + 5 m. Morænelerslagene kan være op til 35 m tykke. De øverste par meter består af gulbrunt, oxideret, svagt kalkholdigt, sandet moræneler, mens der derunder følger reduceret, olivengråt, siltet og sandet moræneler. Moræneleret indeholder altid grus, sten og blokke, og inde i morænelers-lagene findes også tynde lag af smeltevandssand med grus og sten på 3–5 meters tykkelse. Grundvandsmagasinet er artesisk, og grundvandspotentialet ligger i kote + 25 m til + 30 m. d.v.s. ca. 5–10 m under terræn, hvilket giver en umættet zone på tilsvarende tykkelse.

Bjergarternes egenskaber

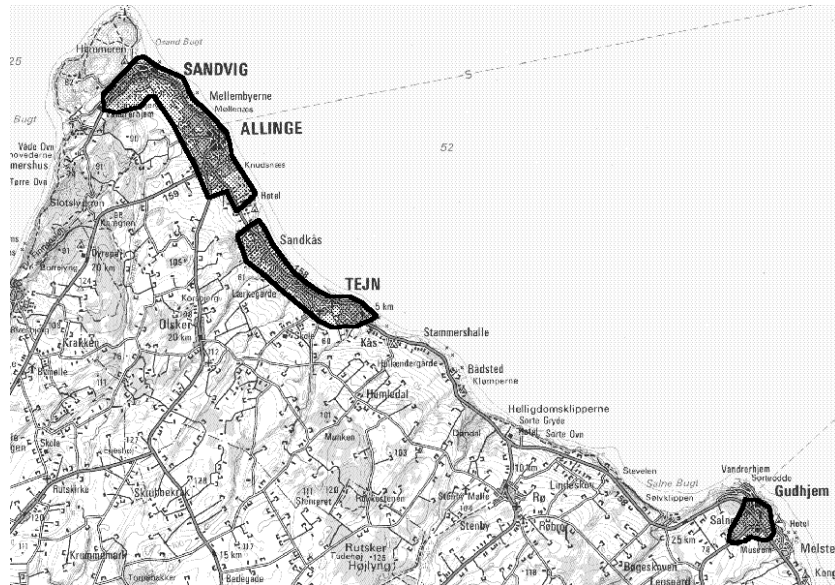
De øverste morænelersjordlag har betydning for radontransporten. Moræneler er en dobbelt porøs jordart, der indeholder porer i en finkornet lermatrix og makroporer i sprækker og ormehuller (Fredericia, 1990). De vigtigste transportveje er således makroporerne. Af betydning er også redoxforholdene i moræneleret, som har indflydelse på mobilisering eller fiksering af radium. Desuden er jordbundsudviklingen indenfor de øverste 1–2 m ofte en faktor, der har indflydelse på disse forhold. Tilstedeværelse af tynde lag af smeltevandssand- og grus, der har en relativ høj porøsitet og høj permeabilitet, giver yderligere muligheder for transport, hvis de ligger i den umættede zone. De palæocæne lerarter har en relativ høj matrixporøsitet, men en lav permeabilitet. Derimod er grønsandskalken ofte stærkt opsprækket, og denne sekundære porøsitet og permeabilitet kan fungere som transportvej for radon. Kilder til radon (radium) findes både i moræneler og Palæocæn ler og kalk bl.a. i form af binding til lerminerale og som indhold i tungminerale.

B.3 Nordbornholm

De tre delområder ligger på Nordbornholm indenfor Allinge-Gudhjem Kommune, Bornholms amt (Figur 18).

Geologiske forhold

På det nordlige Bornholm består prækvartæret af hårde grundfjeldsbjergarter: Gnejs, granit, pegmatit, aplit og diabas fra Prækambrium (Callisen, 1934). Den Bornholmske Gnejs er mod nord afgrænset af Vang Graniten, mens Hammer Graniten findes længst mod nord. Gnejs og graniter indeholder grovkornede pegmatiter og finkornede apliter med næsten samme sammensætning, og er skåret af sorte diabasgange. Grundfjeldet er gennemsat af forkastninger. Et markant udtryk for disse forkastninger er de store sprækkedale. Grundfjeldet gennemsettes også af mange store og små sprækker, der har samme orienteringer som sprækkedalene: Nordvest-sydøst og nordnordvest-sydsydvest. Over grundfjeldet findes kvartære aflejringer (Grönwall & Milthers, 1916). Deres tykkelser varierer fra 0 m



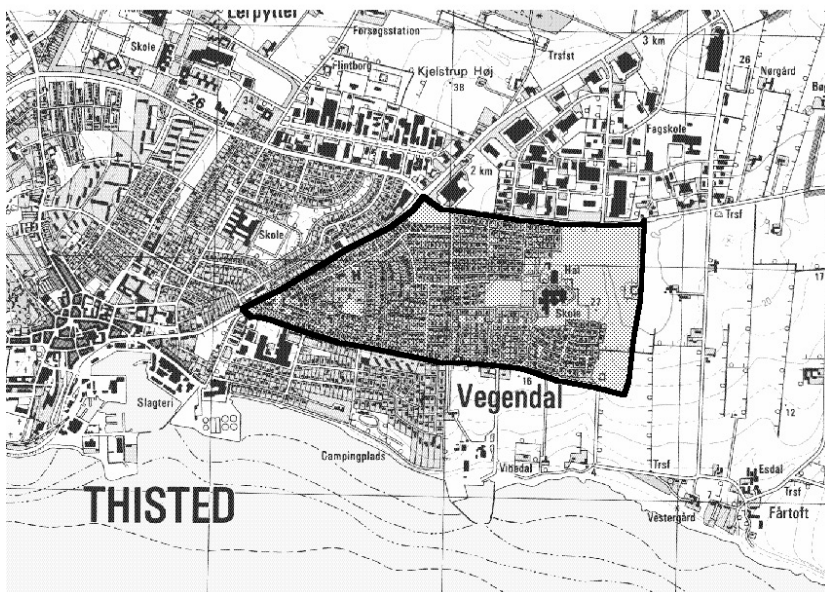
Figur 18. Undersøgelsesområderne på Nordbornholm: Allinge-Sandvig, Sandkås-Tejn og Gudhjem i 1:100 000 (med tilladelse fra Kort- og Matrikelstyrelsen).

på den højtliggende overflade til ca. 40 m nede i sprækkedalene, og grundfjeldet stikker mange steder igennem det kvartære dække som geologiske vinduer. De dominerende jordarter er moræneler og morænegrus på op til 10 m's tykkelse.

Allinge-Sandvig Området ved Allinge-Sandvig omfatter byarealet fra byens grænse ind mod midten af øen (mod vest) og ud til Strandvejen samt hvor Strandvejen drejer mod vest og forsætter i Langebjergvej. Det vil sige, at den yderste del af byen ud mod havet ikke er medtaget. Terrænet ligger mellem kote + 10 m og + 30 m, og det hælder ud mod havet mod øst. Hammer Graniten er hovedbjergart i området. Graniten er fin-mellemkornet, rødgrålig med en karakteristisk rødprinking, som skyldes jernoxider udfældet på og i korngrænserne mellem kvarts og feldspat korn. Pegmatitter forekommer hyppig, og de er altid mere grovkornede end graniten samt indeholder undertiden andre mineraler (Callisen, 1934). Graniten er gennemsat af store og små sprækker, og enkelte større sprækkezoner findes omkring Møllerende (Mellemyerne) og ved Knudebæk.

Sandkås-Tejn Området ved Sandkås og Tejn omfatter det meste af byarealet fra Tejnvej og ind mod øens midte (mod vest). Igen er det yderste areal ud mod havet ikke medtaget. Terrænet ligger mellem kote + 10 m og + 30 m, og det hælder ud mod havet mod nordøst. Vang Graniten er hovedbjergart i det meste af området. Graniten er mellem til grovkornet, rødgrå til brungrå og med de mørke mineraler samlet i hobe, hvilket giver bjergarten et plettet udseende. Pegmatitter forekommer i dette område. Syd for Tejn havn findes den Bornholmske Gnejs. Store sprækkedale munder ud mellem de to byer samt nord og syd for dem. Desuden gennemsætter talrige sprækkesystemer graniten. De kvartære aflejringer består af siltet og sandet moræneler i 0 til 10 meters tykkelse udenfor dalene, mens der i dalene findes væsentlig større tykkelser.

Gudhjem Området ved Gudhjem omfatter den centrale del af byen ned mod Melsted. De kystnære dele af byen er ikke medtaget. Den højeste del af terrænet ligger ca. i kote + 70 m i den vestlige del af byen. Mod nord, øst og sydøst er der en kraftig terræn hældning ud mod havet. Den Bornholmske



Figur 19. Undersøgesområdet ved Thisted. Del af 1116 I Thisted. 1:25 000 (med tilladelse fra Kort- og Matrikelstyrelsen).

Gnejs er hovedbjergart i området. Det er en fin-mellemkornet, grålig, stribet bjergart. En del sprækkesystemer gennemsetter gnejsen. Det kvartære moræneler er fra 0 meter til 10 meter tykt, og desuden findes sand og gruslag (Gravesen & Rasmussen, 1988).

Bjergarternes egenskaber

Grundfjeldsbjergarterne er ret ensartede med hensyn til mineralogisk sammensætning, og er domineret af kvarts, feldspat og mørke mineraler (biotit og amfiboler), mens tungminerale findes i helt underordnet mængde. I enkelte pegmatiter er registreret andre mineraler såsom muskovit, apatit og gadolinit; det sidstnævnte er et radioaktivt mineral. Flere af tungminerale kan være direkte radonkilder som f.eks. zirkon, monazit og allanit. Bjergarterne har en beskedne primær porøsitet, og en væsentlig større sprækkebetaget sekundær porøsitet. Bjergarterne har ringe magasinsegenskaber, og grundvandspejlet ligger langt under terræn, hvilket giver en tyk umættet zone de fleste steder. I forkastningszoner og sprækker kan bjergarterne ofte være forvitrede og dermed omdannede. På forkastnings- og sprækkeflader kan der derfor findes leret granitmateriale eller egentlige lerlag, som er opstået ved en kaoliniseringsproces på grund af gennemsvivende vand. I de kvartære jordarter er oparbejdet lokalt materiale fra Bornholm og materiale fra f.eks. Sverige. Dette betyder, at kilder til radon kan forventes at stamme fra et større område og at mange forskellige mineraler er tilstede.

B.4 Thisted

Thisted by ligger indenfor Thisted Kommune, som er en del af Viborg Amt (Figur 19).

Geologiske forhold

Thisted by ligger i den østlige del af Thisted strukturen, som er en cirkelformet struktur i prækvartære aflejringer. Strukturen strækker sig i en bue fra Hanstholm over Hjørdemål til Thisted og videre mod vest ud mod Klitmøller (Hansen & Håkonsson, 1980). På prækvartæroverfladen indgår Senon skrivekridt, Danien kalksten og Palæocæne aflejringer i cirkelstrukturen, hvor Danien lagene danner den ydre højtliggende rand med det ældre skrivekridt i midten. Aflejringerne hældes væk fra strukturens midte, og de er gennemsat af forkastninger og brudlinier. De mere hærdnede kalkbjergarter må forventes at være opknuste i forkastningszonerne og i et vist omfang også på overfladen, som istidernes gletschere har bevæget sig henover. Over Danien lagene findes især kvartært moræneler, som kan have tykkelser på op til 15 meter (Gravesen, 1990).

Undersøgelsesområdet i den østlige del af Thisted, har en terrænoverflade, hvis kote ligger mellem + 22 m og + 30 m. Terrænet skrånede mod syd ned mod havet. Kalkbjergarten er Danien slamkalk, som findes ned til ca. kote - 20 m. Den er en hvid kalkbjergart med kornstørrelser i ler- og siltfraktionerne. Den indeholder både mikroskopiske dyrerester og små kalkpartikler. Lag med forskellig hærdningsgrad veksler med hinanden, og desuden indeholder kalken hårde flintlag. De kvartære aflejringer er meget tynde eller fraværende, og ofte er der kun tale om et muldlag. Grundvandspejlet er beliggende i kote + 3 m til + 5 m, hvilket giver en umættet zone på ca. 15–20 meter. Grundvandsstrømmen er mod syd ud mod havet.

Bjergarternes egenskaber

Kalkbjergarter har en porøsitet på mellem 10 % og 50 %. De er dobbelt porøse bjergarter, som består af to typer porer: porer mellem kornene (matrixporøsitet) og porer betinget af sprækker. Der er således tale om en primær permeabilitet med langsom transport af vand og luft, og en sekundær permeabilitet i sprækker og andre makroporer, hvor transporten kan ske hurtigt. Dette gælder også for radontransport. Der er relativt få kilder i kalken til generering af radon, og uranindholdet i danske kalkbjergarter er generelt lavt. Det er især fosforitforbindelser i komplekser og mineralovertræk i form af jernoxider, der kan tænkes at have et højt indhold af uran/radium, som kan generere radon. Forhøjede koncentrationer kan desuden forekomme i sprækker og forkastningszoner.

B.5 Afsluttende bemærkninger

De tre udvalgte områder repræsenterer forskellige geologiske situationer i Danmark, som selvfølgelig slet ikke er dækkende for de mange sammensatte og komplicerede forhold, der findes. De øverste jordlag over grundvandspejlet kan fremvise mange forskellige bjergartstyper og strukturer, og dermed meget varierende radonniveauer.

Litteratur

Callisen, K., 1934: Das Grundgebirge von Bornholm.- Danm. Geol. Unders., II rk., 50, 266 pp.

Damkjær, A., Andersen, C.E., Majborn, B., Ulbak, K. & Gravesen, P., 1996: A search profile for dwellings with elevated radon levels.- Environment International, vol 22, pp. 783–788.

Fredericia, J., 1990: Saturated Hydraulic Conductivity of Clayey Tills and the Role of Fractures.- Nordic Hydrology, 21, pp. 119–132.

Gravesen, P., 1990: Geologisk kort over Danmark. 1:50.000. Kortbladet 1116 I Thisted. Geologisk basisdatakort.- Danm. Geol. Unders. Kortserie nr. 13.

Gravesen, P. & Rasmussen, L. Aa., 1988: Geologisk kort over Danmark. 1:50.000. Kortbladet 1812 III og IV Bornholm. Geologisk basisdatakort.- Danm. Geol. Unders. Kortserie, nr. 4.

Grönwall, K.A. & Milthers, V., 1916: Kortbladet Bornholm.- Danm. Geol. Unders., I Rk., 13, 281 pp.

Hansen, J.M. & Håkansson, E., 1980: Thistedstrukturens geologi, et "neotektonisk" skoleeksempel.- Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1979, pp. 1-9.

Salinas, I, 1992: Geologisk kort over Danmark. 1:50.000. Kortbladet 1513 III Ringsted & 1513 II Køge. Geologisk basisdatakort.- Danm. Geol. Unders. Kortserie, nr. 23.

Sundhedstyrelsen, 1987: Naturlig stråling i danske boliger.- Sundhedstyrelsen, okt 1987, 122 pp.

C Beregningsprincipper (radon)

Dosimeterplacering I hvert hus placeres et dosimeter i soveværelset og et i stuen. Resultaterne fra målingerne i hus i betegnes som hhv. $c_{\text{sov}}(i)$ og $c_{\text{stu}}(i)$. På baggrund heraf kan man beregne en husmiddelværdi som:

$$c_{\text{hus}}(i) = \frac{c_{\text{sov}}(i) + c_{\text{stu}}(i)}{2} \quad (\text{C.1})$$

I 2 tilfælde blev der på foranledning af konkrete beboerønsker også foretaget tidsintegrerede radonmålinger i kælderrum. Disse resultater er meddelt beboerne, men indgår ellers ikke i undersøgelsen.

Perioder Der foretages målinger i perioderne vinteren 1994–95, foråret-sommeren 1995, og vinteren 1995–96. For husene i restgruppen foretages der kun målinger i vinteren 1994–1995. For husene i reduktions- og kontrolgrupperne foretages der målinger i alle tre perioder.

For et givet hus i , betegnes de husmidlede radonkoncentrationer for de tre perioder som følger:

$$c_{0,v}(i) = c_{\text{hus}}(i) \text{ for målingen vinteren 1994–95} \quad (\text{C.2})$$

$$c_{0,s}(i) = c_{\text{hus}}(i) \text{ for målingen foråret-sommeren 1995} \quad (\text{C.3})$$

$$c_{1,v}(i) = c_{\text{hus}}(i) \text{ for målingen vinteren 1995–96} \quad (\text{C.4})$$

Index 0 og 1 svarer til om målingen er før eller efter efteråret 1995 (dvs. før eller efter det tidspunkt, hvor der blev gennemført reduktionsforanstaltninger i husene i reduktionsgruppen). Index v og s angiver, om perioden er vinter eller forår-sommer.

C.1 Beregning af radonreduktionseffektiviteter

Vurderingen af reduktionsforanstaltningernes effektivitet foretages ud fra målingerne i de to vinterperioder. Dette giver derfor et direkte mål for reduktionsforanstaltningernes effektivitet under vinterforhold.

Vinter-til-vinter variationer Forholdet mellem radonkoncentrationerne i vinterperioderne efter og før reduktionsforanstaltningerne beregnes for hus i som:

$$\beta(i) = \frac{c_{1,v}(i)}{c_{0,v}(i)} \quad (\text{C.5})$$

Det forventes *a priori*, at reduktionsforanstaltningerne er effektive, således at husene i reduktionsgruppen har vinterkoncentrationer, som efter reduktionsforanstaltningerne er lavere end vinteren før ($\beta < 1$). For tiltag med en ringe effektivitet ($\beta \approx 1$) er det imidlertid vigtigt at være opmærksom på, at koncentrationen fra den ene vinter til den anden kan være forskellig af helt andre årsager end dem som hidrører fra reduktionsforanstaltningerne. Et mål for sådanne naturlige variationer kan opnås ved isoleret at betragte vinter-til-vinter forholdene for de huse, hvor der ikke gennemføres reduktionsforanstaltninger (dvs. for husene i den såkaldte kontrolgruppe). Derfor dannes middelværdien:

$$\langle \beta \rangle_{\text{kon}} = \frac{1}{N} \sum_i \beta(i) \quad (\text{C.6})$$

hvor summationen foretages for de N huse i kontrolgruppen.

For et givet hus i i reduktionsgruppen anvendes forholdet mellem $\beta(i)$ og $\langle \beta \rangle_{\text{kon}}$ som et skøn over forholdet mellem vinterkoncentrationen før og efter reduktionsforanstaltningerne når der korrigeres for naturlige variationer:

$$\gamma(i) = \frac{\beta(i)}{\langle \beta \rangle_{\text{kon}}} \quad (\text{C.7})$$

$\gamma(i)$ benævnes her *den normaliserede vinter rest radonkoncentration*. Hvis $\gamma(i)$ antager værdien 0.05 betyder det, at det vurderes, at tiltagene har forårsaget, at radonkoncentrationen er faldet til 5 % af det oprindelige niveau. $\gamma(i) = 100$ % betyder, at radonkoncentrationen er uforandret efter tiltagene. Endelig defineres reduktionsforanstaltningernes effektivitet under vinterforhold R_v som:

$$R_v(i) = 1 - \gamma(i) \quad (\text{C.8})$$

R_v giver således et mål for hvor meget radonkoncentrationen er nedbragt i forhold til startværdien, når det er korrigeret for naturlige vinter-til-vinter variationer.

Ovenstående korrektion for naturlige variationer er approximativ da det i sagens natur ikke er muligt at få direkte kendskab til hvad radonkoncentrationen ville have været i husene i reduktionsgruppen i vinteren 1995–96, dersom reduktionstiltagene ikke var indført. Den indførte korrektion svarer til antagelsen om at det individuelle hus i reduktionsgruppen ville have haft et vinter-til-vinter forhold lig $\langle \beta \rangle_{\text{kon}}$, dersom reduktionerne ikke var indført. Gyldigheden af denne antagelse diskuteres i afsnit 5.8. Som angivet i Appendiks D anvendes den observerede standardafvigelse for vinter-til-vinter forholdene i kontrolgruppen som et mål for den usikkerhed ovenstående korrektion tilfører beregningen af reduktionseffektiviteten.

Det bemærkes, at der ikke anvendes områdespecifikke korrektionsfaktorer for naturlige variationer, da de faktiske målinger viser, at vinter-til-vinter forholdene for husene i kontrolgruppen ikke var signifikant forskellige fra det ene område til det andet.

R_v ; reduktionseffektivitet

Usikkerheder ved R_v

Områdespecifikke korrektionsfaktorer

C.2 Beregning af årsmiddelværdier

I forbindelse med rapportering af måleresultaterne til beboerne og ved den videre behandling af resultaterne er det ønskeligt, at kunne angive vurderede årsmiddelværdier for alle husene i undersøgelsen. I den forbindelse indføres følgende betegnelser:

$$c_0(i) = \text{Årsmiddelværdi for hus } i \text{ før reduktionstiltag} \quad (\text{C.9})$$

$$c_1(i) = \text{Årsmiddelværdi for hus } i \text{ efter reduktionstiltag} \quad (\text{C.10})$$

$c_0(i)$ beregnes for alle huse i undersøgelsen, hvorimod $c_1(i)$ kun beregnes for husene i reduktions- og kontrolgrupperne.

Forholdet α mellem radonkoncentrationen i en vinterperiode og radonkoncentrationen midlet over et helt år indføres. For tiden før og efter reduktionsforanstaltningerne bruges betegnelserne:

$$\alpha_0(i) = \frac{c_{0,v}(i)}{c_0(i)} \quad (\text{C.11})$$

$$\alpha_1(i) = \frac{c_{1,v}(i)}{c_1(i)} \quad (\text{C.12})$$

For husene i reduktions- og kontrolgrupperne antages det, at middelværdien af vintermålingerne 1994–95 og forår-sommermålingerne 1995 er et godt mål for årsmiddelværdierne før reduktionsforanstaltningerne:

$$c_0(i) \approx \frac{c_{0,v}(i) + c_{0,s}(i)}{2} \quad (\text{C.13})$$

Dette forekommer at være en rimelig antagelse, da måleperioderne stort set er lige lange og sammenlagt dækker 148 dage ud af 215 dage for perioden fra 25.11.94 til 28.06.95 (se Tabel 4 side 20). For husene i reduktions- og kontrolgrupperne kan der således foretages en direkte beregning af vinter-til-årsmiddelforholdet $\alpha_0(i)$ for tiden før reduktionsforanstaltningerne:

$$\alpha_0(i) \approx \frac{c_{0,v}(i)}{\frac{1}{2}(c_{0,v}(i) + c_{0,s}(i))} \quad (\text{C.14})$$

Årsmiddelværdier

Vinter-til-årsmiddelforhold

For hvert område beregnes en gennemsnitlig sæsonkorrektionsfaktor. For Ramsø beregnes værdien som:

$$\langle \alpha_0 \rangle_{\text{Ramsø}} = \frac{1}{N_{\text{Ramsø}}} \sum_i \alpha_0(i) \quad (\text{C.15})$$

hvor summationen foretaget over alle $N_{\text{Ramsø}}$ huse i reduktions- og kontrolgruppen i Ramsø. Tilsvarende beregninger gennemføres for Allinge-Gudhjem og Thisted. Denne opdeling i områdemidlede sæsonkorrektionsfaktorer foretages fordi de faktiske undersøgelsesresultater viser, at der er signifikante forskelle mellem områderne.

For husene i restgruppen beregnes de årsmidlede radonkoncentrationer ud fra ovenstående områdemidlede sæsonkorrektionsfaktorer og vintermålingerne 1994–95. For restgruppehusene i Ramsø fås således:

$$c_0(i) \approx \frac{c_{0,v}(i)}{\langle \alpha_0 \rangle_{\text{Ramsø}}} \quad (\text{C.16})$$

og tilsvarende for de to andre områder.

For husene i reduktion- og kontrolgrupperne er det nødvendigt at beregne den årsmidlede radonkoncentration $c_1(i)$ efter indførslen af reduktionstiltagene. Det antages, at husenes individuelle sæsonvariation ikke ændres af reduktionsforanstaltningerne :

$$\alpha_1(i) \approx \alpha_0(i) \quad (\text{C.17})$$

således at årsmiddelværdien kan estimeres som:

$$c_1(i) \approx \frac{c_{1,v}(i)}{\alpha_0(i)} \quad (\text{C.18})$$

C.3 Ændring af beregningsprincipper

Under udarbejdelsen af rapporten er beregningsprincipperne forsøgt forbedret på baggrund af undersøgelsens analyseresultater. På den baggrund optræder der en række (mindre) forskelle mellem de resultater, som fremgår af nærværende rapport og de resultater, som er rapporteret direkte til de enkelte beboere. Den vigtigste ændring er, at der ved rapporteringen til beboerne blev anvendt én fælles årssæsonkorrektionsfaktor (uanset gruppe eller område) til beregning af årsmiddelværdien for året efter reduktionsforanstaltningerne. I denne rapport anvendes husspecifikke sæsonkorrektionsfaktorer (se ligning C.17). Samtidig er usikkerhedsberegningen af årsmiddelværdien efter reduktionstiltagene ændret. Dette er omtalt i det følgende appendiks.

D Usikkerhedsberegninger (radon)

I denne rapport er (næsten) alle vigtige målinger og kvantitative vurderinger eksplicit tilskrevet en vurderet usikkerhed. Eksempelvis fremgår det af Tabel 10 side 29 at reduktionseffektiviteten R_v for hus 4182 er bestemt til at være 0.48 ± 0.17 . $E\{R_v\}=0.48$ betegnes som forventningsværdien og $u\{R_v\}=0.17$ som standardusikkerheden (eller blot usikkerheden) på bestemmelsen. Idet det antages at den stokastiske variabel R_v er normalfordelt, betyder dette konkret, at det forventes at den sande værdi med 68 % sandsynlighed ligger i intervallet fra:

$$E\{R_v\} - u\{R_v\} = 0.48 - 0.17 = 0.31 \quad (\text{D.19})$$

Forventningsværdi og standardusikkerhed

til:

$$E\{R_v\} + u\{R_v\} = 0.48 + 0.17 = 0.65 \quad (D.20)$$

For så vidt at $E\{R_v\} \neq 0$ betegnes den relative usikkerhed som:

Relativ usikkerhed

$$u_r\{R_v\} = \frac{u\{R_v\}}{E\{R_v\}} \quad (D.21)$$

I det følgende gennemgås usikkerhedsberegningerne for de tidsmidlede radonmålinger og de heraf afledte størrelser.

I sporfoliemetoden bestemmes den tidsmidlede radonkoncentration c [$Bq\ m^{-3}$] i et bestemt rum ved udtrykket:

Radonmålinger

$$\begin{aligned} c &= c(\rho, \rho_b, K, c_t, T_{tot}, T_{eks}) \\ &= \frac{\rho - \rho_b - Kc_t(T_{tot} - T_{eks})}{KT_{eks}} \end{aligned} \quad (D.22)$$

hvor ρ er den totale sportæthed [$spor\ m^{-2}$], ρ_b er sportætheden for et ueksponeret folie (blankværdien) [$spor\ m^{-2}$], K er en kalibreringskonstant for omsætning mellem sportæthed og eksponering [$spor\ m^{-2}\ Bq^{-1}\ m^3\ s^{-1}$], c_t er radonkoncentrationen [$Bq\ m^{-3}$], som dosimetret er i på vej mellem boligen og Risø (dvs. i transittiden), T_{tot} er den totale tid dosimetret er væk fra Risø [s], T_{eks} er eksponeringstiden for dosimetret i rummet [s]. Usikkerheden ved c beregnes ved hjælp af fejlophobningsloven for størrelser, hvis usikkerhed er uafhængige:

$$\begin{aligned} u\{c\}^2 &= \left(\frac{\partial c}{\partial \rho}u\{\rho\}\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial \rho_b}u\{\rho_b\}\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial K}u\{K\}\right)^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial c}{\partial c_t}u\{c_t\}\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial T_{tot}}u\{T_{tot}\}\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial T_{eks}}u\{T_{eks}\}\right)^2 \end{aligned} \quad (D.23)$$

hvor de partielle afledede beregnes analytisk ud fra udtrykket for c . Usikkerheden ved de indgående størrelser ansættes efter en række forskellige principper, som kort er resumeret nedenfor.

$u\{\rho\}$ estimeres ved hjælp af Poisson statistik: den relative usikkerhed sættes til $1/\sqrt{N}$, hvor N er antallet af spor—dvs. sportætheden gange tællearealet. Desuden inkluderes en relativ usikkerhed på 4% for tilfældige variationer vedr. placering af foliet på tællesystemet, ætsning og lign. $u\{\rho_b\}$ er en observeret standardafvigelse på middelværdien ρ_b af et antal ueksponerede folier. $u\{K\}$ beregnes ud fra en relative usikkerhed på 6.5 %, som gælder for kalibreringens nøjagtighed. c_t og $u\{c_t\}$ ansættes skønsmæssigt til hhv. 10 og 5 $Bq\ m^{-3}$. Disse værdier svarer til sædvanlige udeluftkoncentrationer. $u\{T_{tot}\}$ sættes til 12 timer. $u\{T_{eks}\}$ beregnes som:

$$u\{T_{eks}\} = \frac{T_{eks,max} - T_{eks,min}}{2} \quad (D.24)$$

hvor $T_{eks,max}$ og $T_{eks,min}$ svarer til den hhv. maksimale og minimale tid dosimetret kan tænkes at have været (korrekt) opsat i huset. Disse tider anslås ud fra afsendelses- og modtagelsestiderne på Risø og en estimeret posttid hver vej på 1.5 dage. Kilderne til usikkerheden for eksponeringstiden hidrører primært fra mangelfulde eller usikre beboeroplysninger. Ovenstående vurderinger anvendes ved alle enkeltmålinger af radonkoncentrationen i stue c_{stu} og soveværelse c_{sov} i en af de tre perioder.

Usikkerheden for den husmidlede radonkoncentration for en given periode beregnes på tilsvarende vis idet c_{hus} opfattes som en funktion af sportæthederne for de to folier: ρ_{stu} for stuen og ρ_{sov} for soveværelset og en række fælles forhold:

*Husmidlet
radonkoncentration*

$$\begin{aligned} c_{hus} &= c(\rho_{stu}, \rho_{sov}, \rho_b, K, c_t, T_{tot}, T_{eks}) \\ &= \frac{\rho_{stu} + \rho_{sov} - 2\rho_b - 2Kc_t(T_{tot} - T_{eks})}{2KT_{eks}} \end{aligned} \quad (D.25)$$

Det bemærkes, at man ikke kan beregne $u\{c_{\text{hus}}\}$ ved simpel kvadratursummaton af usikkerheden for stuen og usikkerheden for soveværelset. Dette skyldes at flere af fejlkilderne ved de to målinger ikke er uafhængige. Eksempelvis er fejlen ved dosimetrenes eksponeringstid ens for begge målinger da disse sendes frem og tilbage mellem huset og Risø i samme pakke. Endelig bør det bemærkes, at den usikkerhed som tilskrives c_{hus} alene udtrykker *måleusikkerheden* ved bestemmelsen af middelværdien af c_{stu} og c_{sov} . Der er således ikke taget hensyn til om huset har flere væsentlige opholdsrum end stue og soveværelse, eller om der er en stor forskel på radonkoncentrationen for husets rum (f.eks. fordi stue og soveværelse er placeret på forskellige etager).

Vinter-til-årsmiddelværdier
forhold

Usikkerheden for vinter-til-årsmiddelværdien $\alpha_0(i)$ og $\alpha_1(i)$ for hus i i reduktions- eller kontrolgruppen ansættes vha.:

$$u\{\alpha_0(i)\}^2 = \left(\frac{\partial \alpha_0}{\partial c_{0,v}} u\{c_{0,v}(i)\} \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_0}{\partial c_{0,s}} u\{c_{0,s}(i)\} \right)^2 \quad (\text{D.26})$$

og

$$u\{\alpha_1(i)\} = u\{\alpha_0(i)\} \quad (\text{D.27})$$

hvor de partielle afledede kan beregnes analytisk af udtrykket for $\alpha_0(i)$ —se ligning C.14 og hvor $u\{c_{0,v}(i)\}$ og $u\{c_{0,s}(i)\}$ beregnes, som angivet i ligning D.23.

For hus i i restgruppen i Ramsø sættes usikkerheden ved $\alpha_0(i)$ lig den observerede standardafvigelse for $\alpha_0(i)$ for husene i reduktions- og kontrolgrupperne i Ramsø. Tilsvarende beregninger anvendes for de to andre områder.

For husene i reduktions- og kontrolgrupperne beregnes usikkerheden ved årsmiddelværdien $c_0(i)$ før reduktionsforanstaltningerne vha.:

$$u\{c_0(i)\}^2 = \left(\frac{1}{2} \right)^2 (u\{c_{0,v}(i)\}^2 + u\{c_{0,s}(i)\}^2) \quad (\text{D.28})$$

For tiden efter reduktionsforanstaltningerne anvendes:

$$u_r\{c_1(i)\}^2 = u_r\{c_{1,v}(i)\}^2 + u_r\{\alpha_1(i)\}^2 \quad (\text{D.29})$$

Vinter-til-vinter forhold

hvor u_r angiver den relative usikkerhed. Usikkerheden ved vinter-til-vinter forholdet $\beta(i)$ beregnes vha.:

$$u_r\{\beta(i)\}^2 = u_r\{c_{0,v}(i)\}^2 + u_r\{c_{1,v}(i)\}^2 \quad (\text{D.30})$$

Normeret
restkoncentration

Usikkerheden ved den normerede vinter restkoncentration $\gamma(i)$ beregnes som:

$$u_r\{\gamma(i)\}^2 = u_r\{\beta(i)\}^2 + \left(\frac{s\{\beta\}_{\text{kon}}}{\langle \beta \rangle_{\text{kon}}} \right)^2 \quad (\text{D.31})$$

hvor $\langle \beta \rangle_{\text{kon}}$ og $s\{\beta\}_{\text{kon}}$ er hhv. den observerede middelværdi og standardafvigelse for vinter-til-vinter forholdet for husene i kontrolgruppen. Grunden til at det ikke er standardafvigelsen for *middelværdien* af vinter-til-vinter forholdet som anvendes er, at det vurderes, at husene rent faktisk har forskellige vinter-til-vinter forhold. Usikkerhedsvurderingen for $\gamma(i)$ udtrykker derfor primært de naturlige hus-til-hus variationer. Hvis usikkerheden ved korrektionsfaktoren alene skyldtes målefejl kunne disse elimineres ved at gøre kontrolgruppen meget stor.

Reduktionseffektivitet

Usikkerheden ved reduktionseffektiviteten sættes lig usikkerheden for den normerede vinter restkoncentration:

$$u\{\gamma(i)\} = u\{R_v(i)\} \quad (\text{D.32})$$

D.1 Ændring af beregningsprincipper

Under udarbejdelsen af rapporten er beregningsprincipperne forsøgt forbedret på baggrund af undersøgelsens analyseresultater. På den baggrund optræder der en række (mindre) forskelle mellem de resultater, som fremgår af nærværende rapport

og de resultater, som er rapporteret direkte til de enkelte beboere. Mht. usikkerhedsberegningerne optræder der to ændringer: Der tages nu hensyn til kovarians mellem målingerne i stue og soveværelse, og den observerede variabilitet fra hus til hus anvendes som et mål for usikkerheden på sæsonkorrektionsfaktorerne (det antages at de individuelle sæsonkorrektionsfaktorer er ens fra år til år). Den usikkerhed, som blev tilskrevet de årsmiddelværdier, der blev rapporteret til beboerne, er væsentligt større end den usikkerhed der nu anvendes.

E Husspecifikke data

Dette appendiks indeholder et datablad for hvert hus i reduktionsgruppen. På disse datablade er de vigtigste måleresultaterne for husene sammenfattet. Der gives desuden en beskrivelse af husene og de udførte reduktionstiltag.

Husidentifikationsnummer 4004		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 190 / 180 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	400 ± 40 360 ± 40 140 ± 20 150 ± 20 330 ± 30 340 ± 30 65 ± 3.3 6 56 ± 5.8 8 73 ± 0.3 3 260 ± 20 230 ± 20 23 ± 26 0.883 ± 0.106 1.458 ± 0.064 12 / 24 / 19 72 / 59 / 58 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, køkken, bryggers [h ⁻¹] — Soveværelse, 3 værelse [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.27 ± 0.02 0.28 ± 0.03 0.22 0.33 0.34 0.23 344 0 31.03.95-20.04.95 01.04.96-17.04.96
<p>Beskrivelse: Huset er et et-plans parcelhus med 15 graders bølgeeternittag, og udvendige vægge er opmuret af gasbetonblokke, der er pudset både udvendigt og indvendigt. Terrændæk beskrives som bræddegulv på opklodsninger med mellemliggende isolering, 10 cm Leca-beton, 8 cm grovbeton, damp tæt lag og slagger. I 1972 blev huset ca. dobbelt så stort ved en forlængelse, der ifølge det oplyste er udført på samme måde, idet dog trægulvenes afstand over terrændækket øges fra ca. 50 mm til ca. 300 mm, heraf ca. 200 mm mineraluld. Terrændækkets betonoverside har ikke kunnet inspiceres for revner, idet gulve stort set overalt er trægulve. Den nuværende ejer husker tilbygningen og er sikker på, at der er ilagt et plastlag under selve terrændækket, samt at det kapillarbrydende lag i stedet for slagger var grov grus.</p>		
<p>Reduktionstiltag: 2 stk. passiv udsugning fra kapillarbrydende lag under dæk i husets nye del samt 6 udeluftventiler. Passiv udsugning ført over tag med mulighed for evt. senere montering af udsugningsventilator.</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Der er foretaget kontinuerte radonmålinger; se Figur 10.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Ingen.</p>		

Husidentifikationsnummer 4013		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 150 / 130 / 0
Spørge- skema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	420 ± 40 220 ± 20 190 ± 20 140 ± 10 420 ± 40 280 ± 30 77 ± 0.0 2 80 ± 0.0 2 81 ± 1.0 4 240 ± 10 270 ± 20 4 ± 32 1.103 ± 0.122 1.318 ± 0.051 51 / 29 / 48 110 / 98 / 98 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Hele huset ex. udestue [h ⁻¹] — Udestue [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.23 ± 0.03 Ej målt 0.20 Ej målt 0.36 Ej målt 293 0 31.03.95-21.04.95 Ej målt
Beskrivelse: Huset er et muret 1-plans parcelhus med ca. 25 graders bølgeeternittag og terrændæk. Der er tilbygget ca. 32 m ² i form af 2 kamre og forstue i samme materialer og desuden opstillet en ca. 25 m ² stor vinterhave foran stuefacaden. Gulve har generelt tæppe på parket.		
Reduktionstiltag: 4 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4015		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 175 / 175 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	280 ± 30 230 ± 30 200 ± 20 160 ± 20 260 ± 20 170 ± 20 63 ± 4.3 7 80 ± 0.3 3 88 ± 1.0 4 220 ± 20 180 ± 20 27 ± 25 0.836 ± 0.110 1.181 ± 0.064 102 81 15
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Oprindeligt hus [h ⁻¹] — Tilbygning [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.44 ± 0.09 0.47 ± 0.11 0.51 0.51 0.13 0.34 349 0 12.04.95-23.04.95 15.03.96-31.03.96
Beskrivelse: Huset er et muret 1-plans parcelhus med ca. 25 graders bølgeeternittag og terrændæk. Der er udført tilbygning i helt samme materialer indeholdende 2 værelser og forstue på ialt ca. 40 m ² . Der er konstateret få revner i tilgængelige dele af terrændæk.		
Reduktionstiltag: 7 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4038		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 120 / 120 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevæ. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevæ. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevæ. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	410 ± 40 260 ± 20 170 ± 20 280 ± 30 410 ± 40 240 ± 20 77 ± 1.0 4 80 ± 0.3 3 87 ± 1.0 4 280 ± 20 270 ± 20 16 ± 28 0.968 ± 0.108 1.196 ± 0.054 42 / 20 / 108 100 / 99 / 108 16
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, køkken, bryggers [h ⁻¹] — Soveværelse, 4 værelser [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.36 ± 0.04 0.49 ± 0.06 0.49 0.53 0.20 0.45 255 0 11.04.95-23.04.95 15.03.96-01.04.96
<p>Beskrivelse: Huset er et et-plans parcelhus med 25 graders bølgeaternittag og ydermure opmuret i halvanden sten teglmur med mineraluldsisolering. Terrændæk er ifølge tegninger opbygget af 8 cm beton, isolering og 20 cm groft grus. Huset er opført på hældende terræn og den ene facadesokkel er ganske lav, mens den anden sokkel er meget høj. Den høje sokkel ser ud til at være muret af fundamentsblokke og pudset. Gulve (excl. stue med parketgulv) var generelt tilgængelige for revneinspektion, idet de tre kamre og soveværelset alle var belagt med både vinyl og tæppe ovenpå pudslaget. Der blev kun konstateret ganske få revner.</p>		
<p>Reduktionstiltag: 6 stk. udeluftventiler.</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Ingen.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Ingen.</p>		

Husidentifikationsnummer 4048		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1980 155 / 155 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	250 ± 30 330 ± 30 150 ± 10 180 ± 20 230 ± 20 270 ± 20 66 ± 2.8 5 80 ± 0.5 4 79 ± 1.0 4 230 ± 10 190 ± 20 26 ± 25 0.852 ± 0.103 1.285 ± 0.057 8.2 / 2.3 / 5.0 95 / 94 / 92 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, spistst., køkken [h ⁻¹] — Soveværelse, 2 værelser [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.29 ± 0.06 0.35 ± 0.05 0.26 0.36 0.35 0.33 295 0 06.04.95-22.04.95 11.03.96-24.03.96
Beskrivelse: Huset er et muret parcelhus med ca. 25 graders bølgeeternittag og terrændæk. Ifølge ejer er der generelt revner i terrændæk under stuens faste tæpper. Revner blev konstateret i værelser.		
Reduktionstiltag: 5 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4049		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	før 1900 100 / 100 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen 1. sal Delvis kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	1800 ± 150 380 ± 30 1400 ± 110 210 ± 20 550 ± 50 50 ± 10 68 ± 0.5 4 78 ± 0.8 3 79 ± 0.3 3 960 ± 50 260 ± 20 76 ± 8 0.272 ± 0.030 1.162 ± 0.053 13 / 28 / 43 52 / 58 / 60 Ej målt
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Huset, ubenyttet rum [h ⁻¹] — Kælder [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.21 ± 0.06 Kasseret 0.15 Kasseret 0.90 Kasseret 340 28 11.04.95-24.04.95 Kasseret pga. målefejl.
<p>Beskrivelse: Ejendommen er en ældre byejeendom med sokkel formentlig muret i natursten og i øvrigt opmuret i tegl og teglhængt tag. I stueetage findes køkken, spisestue, opholdsstue og entre med toilet og trappe til loftet. Fra køkken er trappeadgang via lem til lille kælder, der strækker sig ind under spisestuen. Under opholdsstuen vurderes at være et hulrum under træbjælkelag. Både dette hulrum og den lille kælder har delvis direkte adgang til den underliggende geologi. Soveværelse befinder sig på tagetagen og er indrettet i den ene gav. I tilknytning til boligen ligger et nu ubenyttet rum.</p>		
<p>Reduktionstiltag: Mekanisk udsugning fra kælderrum samt 2 stk. udeluftventiler i stuen.</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Ingen.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Ingen.</p>		

Husidentifikationsnummer 4092		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1960 140 / 140 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	420 ± 40 230 ± 20 260 ± 20 190 ± 20 320 ± 30 190 ± 20 79 ± 0.0 2 80 ± 0.0 2 81 ± 0.3 3 280 ± 20 220 ± 20 32 ± 22 0.783 ± 0.087 1.186 ± 0.054 21 / 26 / 14 95 / 92 / 63 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, spisepl., køkken [h ⁻¹] — Soveværelse [h ⁻¹] — Arbejdsværelse, værelse [h ⁻¹] Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.47 ± 0.07 0.50 ± 0.14 0.34 0.40 0.81 0.71 1.09 1.02 269 0 30.03.95-20.04.95 01.04.96-18.04.96
Beskrivelse: Huset er et 1-plans parcelhus opført i dels etagehøje gasbetonelementer, dels lette facadepartier og med terrændæk. Taget er fladt (built-up) og belagt med tagpap. Gulve er generelt parketgulve, heraf en del med tæppe.		
Reduktionstiltag: 4 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4117		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 125 / 105 / 0
Spørge- skema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	270 ± 30 280 ± 30 170 ± 20 160 ± 20 220 ± 20 240 ± 20 67 ± 3.5 7 82 ± 0.5 4 79 ± 0.5 4 220 ± 10 180 ± 20 27 ± 24 0.838 ± 0.105 1.251 ± 0.059 Ej målt Ej målt < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, køkken, værelse [h ⁻¹] — Soveværelse, børnevær. [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.38 ± 0.04 0.56 ± 0.07 0.40 0.85 0.31 0.46 231 0 31.03.95-27.04.95 01.04.96-17.04.96
Beskrivelse: Huset er et muret et-plans parcelhus med ca. 25 graders bølgeeternittag og terrændæk. Stuen er udbygget med ca. 20 m ² , udført som lette konstruktioner. Gulve er generelt tæppebelagte idet stue har parketgulv.		
Reduktionstiltag: 5 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4139		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 165 / 165 / 80
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Fuld kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	190 ± 20 420 ± 40 170 ± 20 180 ± 20 220 ± 20 560 ± 50 68 ± 0.3 3 79 ± 1.5 5 90 ± 2.0 5 240 ± 10 310 ± 30 -10 ± 36 1.262 ± 0.143 1.272 ± 0.054 127 / 23 / 88 101 / 74 / 83 16
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, køkken [h ⁻¹] — Soveværelse, 2 værelser [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.31 ± 0.05 0.34 ± 0.07 0.44 0.49 0.11 0.11 389 60 11.04.95-24.04.95 15.03.96-30.03.96
Beskrivelse: Huset er et muret parcelhus med kælder under stue og køkken og terrændæk for resten (ca. halvdelen). Taget er ca. 15 grader belagt med vingetegl på undertag af brædder og pap. Gulve er generelt parketgulve.		
Reduktionstiltag: 4 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4176		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 150 / 150 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	610 ± 50 600 ± 50 560 ± 50 640 ± 50 610 ± 50 590 ± 50 69 ± 0.0 2 72 ± 0.8 3 81 ± 0.3 3 600 ± 30 600 ± 60 13 ± 29 1.003 ± 0.106 1.000 ± 0.053 Ej målt Ej målt Ej målt
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, køkken [h ⁻¹] — Soveværelse, 3 værelser [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.17 ± 0.02 0.18 ± 0.03 0.16 0.11 0.18 0.22 295 0 11.04.95-21.04.95 23.03.96-20.04.96
<p>Beskrivelse: Huset er et et-plans parcelhus med 25 graders bølgeaternittag og ydermure af halvanden sten hulmur med mineraluldsisolering. Gulve er i alle beboelsesrum af bølgeparket, ifølge tegninger oplagt på gulvstrøer og med isoleringen liggende imod terrændækket. Terrændæk angives til 10 cm grovbeton. Langs de fleste af væggene i beboelsesrummene er der en ventilationsspalte bag fodpanel, således at hulrum over isolering er ventileret op i boligen. Hulrum under trægulv er ifølge ejer ca. 60 cm. Der foreligger ingen oplysninger om kapillarbrydende lag, men sokkel i den ene facade er så høj, at indboring under betonklaplag muligvis kan gennemføres over terræn. Sokkelhøjden til den anden side er få cm. I bryggers er der en ophugning i betongulvet under fyret.</p>		
<p>Reduktionstiltag: 7 stk. udeluftventiler, generelt placeret i gamle ventilationsåbninger.</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Ingen.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Ingen.</p>		

Husidentifikationsnummer 4180		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1940 105 / 130 / 35
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Delvis kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	630 ± 50 340 ± 30 560 ± 50 250 ± 20 330 ± 30 250 ± 20 68 ± 0.3 3 74 ± 0.3 3 84 ± 1.0 4 440 ± 20 260 ± 20 49 ± 17 0.589 ± 0.065 1.095 ± 0.054 53 110 14
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stueetage [h ⁻¹] — 1. sal (et rum) [h ⁻¹] — Kælder [h ⁻¹] Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.37 ± 0.07 0.59 ± 0.11 0.39 0.73 0.30 0.35 0.37 0.44 241 60 12.04.95-26.04.95 15.03.96-01.04.96
<p>Beskrivelse: Huset er et ældre muret og pudset hus med bølgeeternittag og har en nyere tilbygning mod haven. Terrænet er så stejlt, at stueetagen i det oprindelige hus går direkte over i 1. sal i tilbygningen med spisekøkken (spisestue) og soveværelse. I det oprindelige hus er skillevægge nedtaget, således at en stor stue fylder nu det meste af det gamle hus. Under spisestue og soveværelse befinder sig i tilbygningen tre rum, der mod haven er i stueplan, men i forhold til det oprindelige hus ligger i kælderen. Under det oprindelige hus er en høj krybekælder, hvor undersiden af et ret åbent træbjælkelag kan ses. Ifølge ejer måtte der udføres en del geoteknisk arbejde i forbindelse med tilbygningen, og en kilde i grunden blev ført fra terrændækket og ud til et lille bassin i haven.</p>		
<p>Reduktionstiltag: Mekanisk udsugning fra krybekælder under den ældre del af huset samt 1 stk. udeluftventil i stue (gl. hus).</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Ingen.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Ved målingerne af radon i jordluften blev der etableret tre prober. To af disse måtte kasseres pga. vandmætning. I alle tre tilfælde blev kaviteten udboret i grus.</p>		

Husidentifikationsnummer 4182		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 175 / 150 / 0
Spørge- skema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	350 ± 30 240 ± 20 140 ± 10 80 ± 10 240 ± 20 100 ± 10 69 ± 0.0 2 83 ± 0.0 2 79 ± 0.3 3 200 ± 10 120 ± 10 48 ± 17 0.594 ± 0.069 1.442 ± 0.048 5.8 / 8.4 / 2.2 64 / 60 / 38 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, køkken, bryggers [h ⁻¹] — Soveværelse, 3 værelser [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.25 ± 0.06 0.42 ± 0.06 0.25 0.50 0.24 0.34 310 0 06.04.95-24.04.95 11.03.96-26.03.96
Beskrivelse: Huset er et muret 1-plans parcelhus med ca. 25 graders bølgeeternittag og terrændæk. Terrændækoverside har mange revner og kunne se ud til at være tyndt spartellag på ekspanderet polystyren. Tegning angiver underliggende 8 cm jernbeton, men dette er ikke kontrolleret. Huset har en ca. 30 m ² muret udestue foran stuen.		
Reduktionstiltag: 6 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4185		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 180 / 180 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	1500 ± 460 1300 ± 400 590 ± 50 490 ± 40 90 ± 10 70 ± 10 55 ± 15.8 18 80 ± 0.3 3 79 ± 0.8 3 990 ± 210 50 ± 10 95 ± 2 0.054 ± 0.017 1.453 ± 0.121 63 / 53 / 103 100 / 100 / 99 15
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Pejsestue, stue, køkken [h ⁻¹] — Soveværelse, 2 værelser [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.34 ± 0.07 0.46 ± 0.17 0.25 0.52 0.45 0.40 371 0 12.04.95-23.04.95 15.03.96-08.04.96
<p>Beskrivelse: Huset er et et-plans parcelhus med 25 graders bølgeaternittag opført i formentlig halvanden sten teglhulmur med mineraluldsisolering. Der er en nyere tilbygning af en pejsestue (muligvis fra sidst i firserne). Gulvet i pejsestuen er klinker, ifølge det oplyste med gulvvarme, og der forefindes konvektorgrav langs facadeparti mod haven. Det oprindelige hus har overvejende tæppe på betonklaplæg, men i køkken og del af stue (tidligere værelse) er i julen 1994 udlagt 8 mm Junckers parket på folie. Den øvrige del af den oprindelige stue samt to værelser og soveværelse har alle tæpper på pudslag. I oprindelig stue findes flere kraftige revner i pudslaget, og ejer oplyser, at der også var mange revner under det nylagte 8 mm parket. I værelserne kan tæpperne løftes på enkelte partier, men på disse steder konstateres ingen revner. Ifølge tegningsoplysninger er terrændækket opbygget af pudslag, 8 cm beton, isoleringsmætter, plastfolie og grusfyld for det oprindelige hus, mens tilbygningen ifølge oplyste har 20 cm 11/18 skærver som kapillarbrydende lag.</p>		
<p>Reduktionstiltag: Aktivt sug under terrændæk med sugepunkter under tilbygget pejsestue, stue/værelse og værelse/værelse, ialt 3 stk, der gennem hvert sit lodretstillede sugerør er ført til loft og her via samlerør ført til udsugningsventilator. Kontrolboks til regulering af drift og med vakuummeter er placeret i bryggers; se fotografierne side 41. Kanalventilatoren har en effekt på 70 W (220 V) og suger ifølge specifikationerne 230 m³ h⁻¹ luft (fritblæsende).</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Kontinuerte radonmålinger; se Figur 10, Figur 11 og Figur 14. Der foretages supplerende målinger af radon i jordluften; se Figur 16. Der foretages en række supplerende undersøgelser vedr. tryk og strømningsforhold. Disse er beskrevet nøjere side 38. Der foretages målinger af luftskiftet i forbindelse med en tænd/sluk undersøgelse; se Tabel 15 side 32.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Ingen.</p>		

Husidentifikationsnummer 4189		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1980 160 / 160 / 40
Spørge- skema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Delvis kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	700 ± 100 200 ± 30 450 ± 50 130 ± 20 520 ± 50 250 ± 30 68 ± 8.0 11 78 ± 4.8 7 83 ± 4.0 7 370 ± 30 320 ± 40 25 ± 26 0.859 ± 0.143 1.213 ± 0.082 4.9 / 4.1 / 4.2 78 / 104 / 91 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, køkken, kontor [h ⁻¹] — Soveværelse, 2 værelser [h ⁻¹] — Kælder [h ⁻¹] Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.23 ± 0.02 0.28 ± 0.04 0.28 0.26 0.19 0.26 0.16 0.37 382 69 06.04.95-23.04.95 11.03.96-30.03.96
<p>Beskrivelse: Ejendommen er et nyere parcelhus med kælder under opholdsstue og terrændæk for resten af huset. Ydervægge er opmuret i teglsten med Siporex bagmur og 140 mm polyurethanisolering i hulmur. Tag er belagt med vingesten. Ifølge ejer består terrændæk af 20 mm afretningslag, 80 mm betonplade, 50 mm mineraluld og 150 mm letklinker - både for det egentlige terrændæk og kældergulvet. Adskillelsen mellem kælder og stue er et træbjælkelag, og heri findes en åben spindeltrappe, diameter ca. 2 m. Terrændæk under værelser kunne kontrolleres to steder, uden at det lykkedes at konstatere revner. Ved dør mellem spisestue/alrum ses under gulvtæppe markant revne i terrændæk, men generelt har kun dette sted kunnet kontrolleres i spisestue og alrum. Fodpanelet har dog så meget luft over terrændæk, at en vis sætning muligvis kan have fundet sted. Kælderydervægge er af 20 cm beton, der ifølge terninger er asfalteret udvendigt og forsynet med pladebats.</p>		
<p>Reduktionstiltag: Mekanisk udsugning i kælderrum.</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Der foretages en tænd/sluk undersøgelse, se side 39.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Huset skiftede ejere under undersøgelsen. Den observerede øgning af udelufttilførselen til kælderen i foråret 1995-96 skyldes sandsynligvis den opsatte mekaniske ventilation, men den kan også bero på en ændret anvendelse af rummet.</p>		

Husidentifikationsnummer 4212		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1960 150 / 135 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	390 ± 40 290 ± 30 220 ± 20 90 ± 10 110 ± 10 90 ± 10 66 ± 2.0 5 80 ± 0.0 2 73 ± 0.3 3 250 ± 20 70 ± 10 74 ± 9 0.300 ± 0.038 1.368 ± 0.052 47 / 65 91 / 100 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, spisestue [h ⁻¹] — Soveværelse, værelse [h ⁻¹] — Køk., bryggers, værelse [h ⁻¹] Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.32 ± 0.08 0.45 ± 0.08 0.19 0.41 0.17 0.13 0.53 0.60 268 0 30.03.95-20.04.95 01.04.96-16.04.96
<p>Beskrivelse: Huset er et et-plans parcelhus med fladt tag (buildup). Ved opførelsen i 1963 var ydermur dels etagehøje Siporex-elementer, dels lette facadepartier med stort set gennemgående vinduesbånd. Terrændækket beskrives som bestående af asketræ/gulvplader, isolering, 10 cm beton 1:4:7, plastfolie, slagger. I 1980 efterisoleres udvendigt med 100 mm mineraluld og en ny skalmur, og der tilbygges en opholdsstue. Det var ved besigtigelsen ikke muligt at undersøge terrændækket for eventuelle revner m.m. på grund af tæppebelægning. Stuerne - specielt den tilbyggede opholdsstue - ligger ca. 1/2 m over terræn og giver mulighed for at ventilere det kapillarbrydende lag ved vandret indboring.</p>		
<p>Reduktionstiltag: Der er udført aktivt sug under terrændæk med sugepunkter under den tilbyggede opholdsstue, idet sugeledning er boret vandret ind gennem sokkel udefra. Ventilator og styring samt vakuummeter er opsat i udhus. Kanalventilatoren har en effekt på 29 W (220 V) og suger 156 m³ h⁻¹ luft (fritblæsende). Der er desuden opsat 4 stk. udeluftventiler.</p>		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4216		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1980 120 / 120 / 0
Spørge- skema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	340 ± 30 330 ± 30 250 ± 20 270 ± 30 360 ± 30 360 ± 30 65 ± 0.3 3 71 ± 1.8 4 86 ± 0.5 4 300 ± 20 320 ± 30 7 ± 31 1.070 ± 0.118 1.124 ± 0.057 17 / 31 / 55 92 / 52 / 113 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue [h ⁻¹] — Soveværelse, 3 værelse [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.37 ± 0.06 0.38 ± 0.04 (se bem.) 0.41 (se bem.) 0.35 218 0 31.03.95-20.04.95 01.04.96-18.04.96
Beskrivelse: Huset er et muret 1-plans parcelhus med ca. 25 graders bølgeeternittag og terrændæk. Der er udført en ca. 4 m ² stor udvidelse af køkkenet, udført i lette materialer. Gulve er generelt tæppebelagte.		
Reduktionstiltag: 5 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ang. zoneluftskifter: De målte sporgaskoncentrationer tillader ikke beregning af zoneluftskifter.		

Hus 4216

Husidentifikationsnummer 4217		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1970 130 / 130 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / soveværelse. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / soveværelse. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / soveværelse. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	430 ± 40 300 ± 30 250 ± 20 220 ± 20 340 ± 30 270 ± 20 71 ± 0.0 2 79 ± 0.3 3 79 ± 0.3 3 300 ± 20 250 ± 20 27 ± 24 0.838 ± 0.092 1.217 ± 0.053 5.0 / 5.7 / 3.5 85 / 69 / 66 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, spistst., køkken [h ⁻¹] — 4 værelser, mellemgang [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.24 ± 0.04 0.37 ± 0.08 0.28 0.44 0.21 0.31 273 0 07.04.95-22.04.95 11.03.96-26.03.96
<p>Beskrivelse: Huset er et et-plans parcelhus med 25 graders bølgeeternittag. Ydervægge er opført i tegl som 30 cm hulmur, formentlig med mineraluldsisolering. Ved inspektion af sokkel konstateres flere revner og åbentstående studsfiger, primært i gavl mod gade. Der er ingen arkivoplysninger om terrændækket, og ved partiel inspektion af pudslag under tæpper blev generelt konstateret mange revner.</p>		
<p>Reduktionstiltag: Membrandækning af alle gulve med ca. 0.3 mm krydsarmeret polyethylen-folie samt 6 stk. udeluftventiler. Tætning langs vægge blev ikke udført som projekteret, men er iflg. håndværkere efterfuget. Tætheden heraf vurderes som usikker.</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Der foretages kontinuerte radonmålinger; se Figur 10.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Ingen.</p>		

Husidentifikationsnummer 4233		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1980 160 / 160 / 0
Spørge- skema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	310 ± 30 220 ± 20 300 ± 30 240 ± 20 360 ± 30 370 ± 30 71 ± 0.0 2 82 ± 0.3 3 79 ± 0.5 4 270 ± 20 370 ± 40 -21 ± 40 1.386 ± 0.155 0.986 ± 0.056 11 / 9.4 / 8.0 108 / 90 / 84 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, spiseafd., køkken [h ⁻¹] — Soveværelse, 3 værelser [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.12 ± 0.01 0.15 ± 0.02 0.17 0.22 0.06 0.08 296 0 06.04.95-22.04.95 11.03.96-21.03.96
Beskrivelse: Huset et et muret 1-planshus med ca. 25 graders bølgeaternittag og terrændæk. Der er tilbygget stue på ca. 20 m ² i samme materialer. Der konstateres generelt mange revner i terrændæks langs ydervægge, iflg. ejer ses disse revner generelt i føringszonen for varmerør.		
Reduktionstiltag: 6 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4243		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1980 140 / 140 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	420 ± 40 180 ± 20 350 ± 30 90 ± 10 630 ± 50 400 ± 30 67 ± 0.3 3 80 ± 0.0 2 79 ± 0.3 3 260 ± 10 450 ± 40 -51 ± 50 1.734 ± 0.192 1.158 ± 0.056 42 / 13 90 / 54 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, køkken, bryggers [h ⁻¹] — 2 soveværelser, kontor [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.22 ± 0.04 0.35 ± 0.12 0.19 0.27 0.26 0.43 284 0 31.03.95-25.04.95 01.04.96-17.04.96
Beskrivelse: Huset er et muret 1-plans parcelhus med ca. 25 graders bølgeeternittag og terrændæk. Gulve er generelt tæppebelagte.		
Reduktionstiltag: 5 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

Husidentifikationsnummer 4249

Hus 4249

BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	før 1900 55 / 80 / 40
Spørge- skema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen 1. sal Delvis kælder 2 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	460 ± 70 410 ± 70 400 ± 40 350 ± 30 240 ± 20 210 ± 20 36 ± 4.5 8 77 ± 3.0 6 87 ± 1.0 4 410 ± 40 210 ± 20 55 ± 16 0.516 ± 0.087 1.077 ± 0.085 28 / 38 / 22 85 / 80 / 75 8
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stueetage, 1. sal [h ⁻¹] — Kælder [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.42 ± 0.06 0.56 ± 0.13 0.29 0.35 0.72 1.07 278 82 11.04.95-23.04.95 15.05.96-06.06.96
<p>Beskrivelse: Huset er en ældre muret byejeendom med tag af tagsten og er opført på stærkt hældende terræn. En facade har stueplan, 1. sal og tagetage, mens en anden har direkte adgang til "1. salen". I underetage mod gadefacade er et enkelt beboelsesværelse samt vaskerum og fyrrum. Fra beboelsesværelset er via en lem adgang til gammel viktualiekælder, og herfra trappe til køkken. Det meste af gulvet i "underetagen" vurderes at ligge umiddelbart på den underliggende geologi. Dækket over denne etage udgøres af et træbjælkelag, der vurderes ret åbent over for luftudskiftning. Fra 1. sal (stueetage) er åben trappeforbindelse til soveværelser i tageetagen.</p>		
<p>Reduktionstiltag: Mekanisk udsugning i viktualiekælderen. Forbindelsen til tilstødende værelse lukkes. 1 stk. udeluftventil i tilstødende beboelsesværelse. Mekanisk udsugning i vaskerum.</p>		
<p>Supplerende undersøgelser: Der foretages en tænd/sluk undersøgelse; se side 38. Der foretages luftskiftmålinger under tænd/sluk undersøgelsen; se Tabel 15 side 32.</p>		
<p>Andre bemærkninger: Ingen.</p>		

Husidentifikationsnummer 4258		
BBR	Opførselsår Byggeareal / boligareal / kælderareal [m ²]	~1980 140 / 140 / 0
Spørgeskema	Placering af radondetektor i stue Placering af radondetektor i soveværelse Har huset en kælder ? Antal etager	Stueetagen Stueetagen Ingen kælder 1 etage
Radon	Vinter 1994-95: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Forår-som. 1995: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1995-96: Stue / sovevær. [Bq m ⁻³] Vinter 1994-95: Eksponerings- / transittid [d] Forår 1995: Eksponerings- / transittid [d] Vinter 1995-96: Eksponerings- / transittid [d] Årsmiddelværdi før reduktion (c ₀) [Bq m ⁻³] Årsmiddelværdi efter reduktion (c ₁) [Bq m ⁻³] Reduktionseffektivitet (R _v) [%] Vinter-til-vinterforhold (β) [-] Vinter-til-årsmiddelforhold (α ₀) [-] Radon i jordluft, sommeren 1995 [kBq m ⁻³] — Måledybde(r) [cm] Radon i vand, sommeren 1995 [Bq L ⁻¹]	330 ± 30 220 ± 20 220 ± 20 150 ± 20 300 ± 30 160 ± 20 68 ± 1.0 4 80 ± 0.0 2 84 ± 1.0 4 230 ± 10 190 ± 20 27 ± 24 0.836 ± 0.096 1.193 ± 0.056 6.1 / 2.1 107 / 95 < 2
Ventilation	Udelufttilførsel, foråret 1995 / foråret 1996: — Hele huset [h ⁻¹] — Stue, spisest., køkken [h ⁻¹] — Soveværelse, 2 værelser [h ⁻¹] — (ingen andre zoner) Nettovolumen / - heraf kældervol. [m ³] Måleperiode, foråret 1995: Måleperiode, foråret 1996:	0.20 ± 0.03 0.15 ± 0.02 0.26 0.19 0.13 0.09 286 0 06.04.95-23.04.95 11.03.96-21.03.96
Beskrivelse: Huset er et muret parcelhus med ca. 25 graders eternitskiffertag og terrændæk. Der er kun set få revner i selve terrændækket, men der er generelt en spalte (revne) mellem ydervæg (sokkel) og terrændæk.		
Reduktionstiltag: 5 stk. udeluftventiler.		
Supplerende undersøgelser: Ingen.		
Andre bemærkninger: Ingen.		

F Notation og ordliste

Notation

I denne rapport udtrykkes små og store talstørrelser fortrinsvis ved en multiplikationsfaktor gange hele potenser af 10. Eksempelvis, skrives $5.5 \cdot 10^6$ fremfor 5 500 000 og $5.5 \cdot 10^{-6}$ fremfor 0.000 005 5. Tilsvarende udtrykkes alle sammensatte enheder ved potensnotation. Eksempelvis skrives enheden for volumenstrøm som $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ fremfor m^3/h eller kubikmeter per time. Endelig skal det nævnes, at punktum i denne rapport anvendes som decimaltegn.

Ordliste

Advektion Radon findes i jordluft på sporstofniveau, og radon udgør således ikke en væsentlig bestanddel af jordluften. Bringes jordluften i bevægelse som følge af ændrede trykforhold, vil radonatomerne følge denne luftstrøm. Denne form for transport kaldes generelt for advektion. Den trykdrevne transport af jordluft kan i visse tilfælde være forårsaget af temperaturforskelle i jordmatricen. I sådanne tilfælde benyttes betegnelsen konvektion. Se også diffusion.

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

$$\text{AM} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{F.33})$$

og den aritmetiske standardafvigelse som:

$$\text{AS} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \text{AM})^2} \quad (\text{F.34})$$

Bq m^{-3} Aktivitetskoncentrationen af radon i et givet rum angives i denne rapport i enheden Bq m^{-3} : Becquerel per kubikmeter. 1 Becquerel svarer til en henfaldsrate på ét atom per sekund. En typisk (aktivitets)radonkoncentration i indeluften er 50 Bq m^{-3} . Dette svarer til, at der henfalder 50 radonatomer per sekund per kubikmeter. Da der er en nøje sammenhæng mellem henfaldsrate og aktivitet, kan det beregnes, at 50 Bq m^{-3} svarer til, at der i luften findes $2.4 \cdot 10^7$ radonatomer per kubikmeter. Ved almindelige temperatur- og trykforhold fylder et mol gas ($6 \cdot 10^{23}$ molekyler) omkring 22.4 liter. Det ses heraf, at radon kun er til stede i indeluften på sporstofniveau: 50 Bq m^{-3} svarer til, at kun ét ud af 10^{18} molekyler er et radonatom.

Diffusion Radonatomerne bevæger sig tilfældigt i alle retninger. Af statistiske årsager giver dette anledning til en nettotransport fra områder med høj koncentration til områder med lav koncentration. Denne form for transport kaldes for (molekylær) diffusion. Se også advektion.

Dosimeter I denne rapport anvendes en sporfolieteknik til at bestemme den gennemsnitlige radonkoncentration i et givet hus over et givet tidsrum. Teknikken giver ikke mulighed for at afgøre det tidsmæssige forløb af koncentrationen; kun den samlede eksponering (tidsintegralet af radonkoncentration gange tid) har betydning. Inden for faget strålingsbeskyttelse benyttes betegnelsen dosimeter om instrumenter, som bestemmer en nøjere defineret dosis (f.eks. den strålingsdosis målt i Sv eller Gy en person ville modtage dersom vedkommende opholdt sig i rummet).

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:

$$\text{GM} = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x_i)\right) \quad (\text{F.35})$$

og den geometriske standardafvigelse som:

$$\text{GS} = \exp\left(\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(x_i) - \ln(\text{GM}))^2}\right) \quad (\text{F.36})$$

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 %.

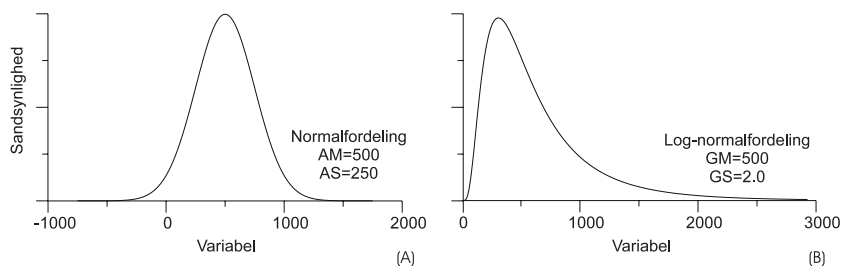
Logaritmisk normalfordeling Den logaritmiske normalfordeling er betegnelsen for en bestemt statistisk fordelingsfunktion. Hvis den stokastiske variabel X følger en logaritmisk normalfordelingsfunktion, betyder det, at den stokastiske variabel $Y = \log(X)$ kan beskrives ved en normalfordelingsfunktion. Figur 20(B) viser et eksempel. Bemærk, at fordelingen ikke er symmetrisk omkring middelværdien, og at X ikke kan antage negative værdier.

Luftskifte Ventilationen i en bolig angives traditionelt ved begrebet *luftskifte*, som udtrykker forholdet mellem udelufttilførslen pr. tidsenhed [$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$], og boligens nettovolumen [m^3]. Enheden for luftskifte er gange pr. time [h^{-1}]. Såfremt luftskiftet i en bolig eksempelvis er 1 h^{-1} , betyder det, at boligen i løbet af en time tilføres en udeluftmængde svarende til boligens nettovolumen. Det skal understreges, at luftskiftet alene er et udtryk for en volumenstrøm. Et luftskifte på f.eks. 1 h^{-1} er således *ikke* ensbetydende med, at al luften i boligen udskiftes i løbet af en time.

Neutralplan I et opvarmet hus vil temperaturforskelle mellem indeluften og udeluften medføre trykforskelle mellem inde og ude. Ved konstant indetemperatur vil trykforskellen variere lineært med højden. Årsagen er, at trykket i den kolde udeluft aftager hurtigere med højden end den varmere indeluft. I et vist niveau, neutralplanet, er det statiske tryk ude og inde ens, dvs. trykforskellen er nul. Eksempelvis vil der i et hus med to åbninger i forskellige højder i klimaskærmen være et undertryk i forhold til ude ved den nederste åbning og et overtryk ved den øverste. Der vil således strømme luft udefra og ind i den nederste åbning (f.eks. en udeluftventil) og indefra og ud i den øverste (f.eks. en aftrækskanal). Hvis de to åbninger har samme strømningskarakteristik, vil neutralplanet ligge midt mellem åbningerne. Neutralplanet kan rykkes opad eller nedad ved at ændre på åbningernes karakteristik.

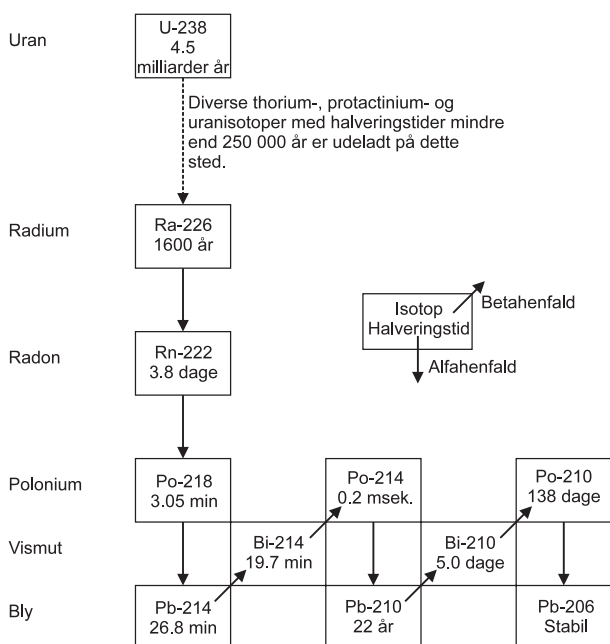
Normalfordeling Normalfordelingen er betegnelsen for en bestemt statistisk fordelingsfunktion. Figur 20(A) viser et eksempel. Fordelingsfunktionen er altid symmetrisk omkring middelværdien.

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. 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 og *thoron* for isotopen



Figur 20. (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. Dvs. 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. Dvs. at hovedparten af fordelingen ligger mellem 250 ($=GM/GS$) og 1000 ($=GM*GS$).

Rn-220. Halveringstiden for Rn-222 og Rn-220 er hhv. 3.8 dage og 56 sekunder. Rn-222 og Rn-220 forekommer naturligt. Rn-222 tilhører den såkaldte urankæde startende med U-238 (se Figur 21) og Rn-220 tilhører thoriumkæden startende med Th-232.



Figur 21. 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.

Thoron Historisk betegnelse for radonisotopen Rn-220 (se Radon).

Usikkerhed Alle angivne usikkerheder i denne rapport er standardusikkerheder med mindre andet eksplicit fremgår af teksten; se definition side 80.

Title and author(s)

Radon-95: An investigation of methods for reduction of the radon concentration in Danish single-family houses (in Danish)

Claus E. Andersen, Niels C. Bergsøe, Jens Brendstrup, Anders Damkjær, Peter Gravesen, and Kaare Ulbak

ISBN

87-550-2297-9

ISSN

0106-2840

Dept. or group

Nuclear Safety Research and Facilities Department

Date

April 1997

Groups own reg. number(s)

Project/contract No.

Pages

108

Tables

25

Illustrations

21

References

81

Abstract (Max. 2000 char.)

The project *Radon-95* is the first major Danish investigation of methods for reduction of the radon concentration in existing single-family houses. In the initial phase of the project, measurements were carried out in 270 houses located in three areas with the following types of geology: clayey till, granite and limestone. The investigation confirmed that such areas have a high indoor-radon potential. In 21 selected houses with annual average radon concentrations from 200 to 1000 Bq m⁻³ measures were taken to reduce the radon concentration. The reduction efficiencies were estimated based on a comparison of radon measurements with alpha-track detectors in the winters before and after installation of remedial measures. Moreover, a correction for natural winter-to-winter variations was applied based on similar measurements in 42 control houses with annual average radon concentrations from 100 to 200 Bq m⁻³. The following results were found (N gives the number of houses, where the method was tested, and R is the average reduction efficiency): (1) Active subslab depressurization ($N=2$; $R=85$ %), (2) Mechanical ventilation of inhabited basement rooms etc. ($N=4$; $R=51$ %), (3) Membrane covering of floor ($N=1$; $R=27$ %), (4) Passive sub-slab depressurization ($N=1$; $R=23$ %), (5) Installation of outdoor-air inlets aimed for improved natural ventilation ($N=13$; $R=11$ %). Measures (1) to (4) were combined with installation of outdoor-air inlets. The investigation demonstrates that active radon reduction measures have a high efficiency whereas passive measures are less efficient. The report includes supplementary measurements of air-exchange rates (PFT-method) before and after remediation, radon concentrations in tap water and soil gas, and continuous radon measurements in selected houses.

Descriptors INIS/EDB

AIR INFILTRATION; ANNUAL VARIATIONS; GEOLOGIC SURVEYS; HOUSES; INDOOR AIR CONTAMINATION; NATURAL RADIOACTIVITY; RADON 222; REMEDIAL ACTION; SOILS; VENTILATION

Available on request from:

Information Service Department, Risø National Laboratory

(Afdelingen for Informationsservice, Forskningscenter Risø)

P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark

Phone (+45) 46 77 46 77, ext. 4004/4005 · Fax (+45) 46 75 56 27 · Telex 43 116