



Radongasreduktion med alternativa bindemedel och tillsatsmedel i betong



Magnus Döse 2022-12-23

> SBUF stödjer forskning & utveckling

> > som leder till praktisk handling

Förord

Rapporten är baserad på doktorandstudier vid KTH, betongbyggnad utförda av Magnus Döse mellan åren 2017 och 2022. Styrning och diskussioner om olika delar av projektet har hanterats av en arbetsgrupp med jämna halvårsintervall. Medverkande i arbetsgruppen har varit Monica-Soldinger Almefelt/Swerock AB, Sven Wallman/NCC, Cecilia Jelinek/SGU, Kent Slade/Strängbetong, Anders Selander/Cementa AB, Jan Trägårdh/RISE, Johan Silfwerbrand/KTH samt Magnus Döse/RISE/Swerock AB.

Huvudhandledare för Magnus Döses avhandling och medförfattare av publicerade artiklar som del därav har varit professor Johan Silfwerbrand, KTH, Betongbyggnad. Johan Silfwerbrand har även bistått med förbättringar och intern granskning av gällande slutrapport för SBUF.

Huvudfinansiärer har varit Svenska Byggbranschens utvecklingsfond (SBUF) samt konsortiet för finansiering av grundforskning inom betongområdet. Magnus Döse önskar tacka ödmjukast för det intresse som har visats från berörda forskningsfinansiärer och hoppas innerligt att vederbörande rapport medför ett tillskott till förbättrade förutsättningar för betongbranschen att klara högt uppställda krav på begränsad radonavgång för husbyggnadsbetong.

Göteborg, december 2022, Magnus Döse

SAMMANFATTNING

Flera krav och rekommendationer avseende joniserande strålning i byggprodukter har introducerats under de senaste åren. Även branschanslutna ballast- och betongföretag har en strävan att uppnå miljömål som skall efterlevas avseende byggmaterial. I Sverige har det utvecklats ett certifieringssystem för en hög nivå av miljösäkerhet vilket har designats av Green Council Building (Miljöbyggnad 3.0). Certifieringssystemet används i upphandlingar för huskonstruktioner för att uppnå en hög standard och trygg inomhusmiljö i nya byggnader för boende. Ett av dessa miljömål är acceptabla krav på radon i inomhusmiljö.

Under de senaste årtiondena har det också blivit vanligare att betongbranschen använder olika kombinationer av alternativa bindemedel i betong för att reducera koldioxidutsläppen från cementtillverkningen. Tillsatser av alternativa bindemedel och olika tillsatsmedel kan även förbättra betongens egenskaper som ökad hållfasthet och beständighet. Men kunskapen utifrån joniserande strålning och radon är fortfarande begränsad. Vad medför alternativa bindemedel och hydrofoba tillsatsmedel avseende radonavgång från betong? Finns det fördelar? Nackdelar? Kan man nyttja vissa egenskaper i specifika inomhusmiljöer? Hur påverkar fukt?

Huvuddelen av avhandlingen har omfattat dessa frågeställningar där syftet varit att förbättra förutsättningarna för en trygg inomhusmiljö utifrån att byggmaterial, som betong har ett naturligt bidrag av radon (²²²Rn) till inomhusluften.

En del av avhandlingens huvudstudie utgjorde att tolv olika betongrecept göts där avgången av ²²²Rn från dessa betongblandningar i relation till deras relativa fuktighet (RF) undersöktes. Tio recept utgjordes av olika blandningar av bindemedel och tillsatsmedel, med en bergart med något förhöjd nivå av ²²⁶Ra-aktivitetskoncentration (Bq/kg). Två recept innehöll en lågstrålande bergart. Som referenscement och bindemedel användes ett CEM I, 52.5 R (Heidelberg CG, Skövde cementfabrik). Betongernas sammansättning hade ett vattencementtal (vct) av 0,55.

Resultaten indikerar att alternativa tillsatsmaterial och hydrofoberande tillsatsmedel har en moderat till stor påverkan på radonavgången vid en relativ fuktighet mellan 75 % och 60 %. Den största påverkan vid en relativ fuktighet på 75 % kan påvisas med mikro-silika (SF-30), som reducerar radonavgången med upp till 57 %. Vid en relativ fuktighet av 45 %, är radonavgången för referensbetongen i linje med en del andra betongsammansättningar och deras radonavgång.

Även betongens naturliga karbonatisering påverkar radonavgången. Den inom avhandlingen utförda studien av karbonatiseringens inverkan gav olika resultat beroende av betongrecept, men kan sammanfattas som: (1) betong med enkom CEM I eller CEM I som bindemedel tillsammans med hydrofoberande tillsatsmedel indikerade en sjunkande radonavgång medan för (2) ett betongrecept som innehöll CEM I bindemedel tillsammans med slagg eller flygaska, så ökade radonavgången i takt med ökat karbonatiseringsdjup i betongerna.

En annan studie i avhandlingen omfattade inducerade sprickor och deras betydelse med avseende på radonavgången. Studien visade att påverkan av sprickor kan vara mycket stor. I två fall beräknades en ökning av radonavgången med 200–250 % jämfört med radonavgången i motsvarande betong utan sprickor. I övriga fall var ökningen proportionell mot ökningen av ytan från sprickorna. Slutsatser från en del av huvudstudien är att radonavgången minskade generellt med minskad relativ fuktighet för de undersökta betongsammansättningarna. Radongasdiffusionen i betongproverna ökade däremot generellt med minskad relativ fuktighet. Sammantaget kan det nämnas att sambandet mellan betongens RF, radonavgången och diffusion i en betongvägg, tak eller golv således är ett komplicerat samspel. I praktiken dominerar ändå inverkan av den relativa fukthalten i betong mest för den slutliga radonavgången från ett byggmaterial. Således minskar radonhalten generellt över tid i takt med att betongen torkar ut och RF sjunker.

Den höga radonavgången beror i denna studie främst av (i) materialets höga radiuminnehåll och (ii) en högre emanationsfaktor vid högre relativ fuktighet. Det är dock viktigt att poängtera att materialets något förhöjda radium-innehåll är av stor betydelse för den höga radonavgången. Vid en jämförelse med betongrecept, C (bara OPC som bindemedel), där betongens ballast ersattes med en lågstrålande ballast (låg halt av radium), blir produktionshastigheten mycket låg, dvs låg radonavgång, trots en moderat emanationskofficient.

Några väsentliga slutsatser från avhandlingen som kan härledas är att alternativa bindemedel och hydrofoba tillsatsmedel effektivt kan minska radonavgången och härav produktionshastigheten av radon vid högre luftfuktigheter samt att sprickor kan ge betydande ökningar av radongashalten. Beroende av valet av bindemedel kan betongens karbonatisering antingen ge en både positiv och en negativ effekt med hänsyn till radonavgången.

SUMMARY

Several compulsory regulations and recommendations regarding ionising radiation for building products have been introduced in recent years. Furthermore, industry-affiliated aggregate and concrete companies strive to implement environmental goals that should be fulfilled regarding building materials. In Sweden, a certification system for high-level environmental quality assurance has been designed by the Green Building Council (Miljöbyggnad 3.0). The certification system is used in procurements of buildings to achieve a high standard and good quality environment for habitants inside the new buildings. One of these environmental goals, as part of this certification system, concerns acceptable levels of radon within the indoor environment.

In recent decades it has become increasingly common for the concrete industry to use combinations of different Supplementary Cementitious Materials (SCMs) in concrete to reduce the carbon dioxide emissions of cement production. Additions of SCMs and different admixtures can also improve the properties of concrete, such as increased strength and durability. However, knowledge of ionising radiation and radon is still limited. How do SCMs and hydrophobic admixtures contribute regarding radon gas exhalation from concrete? Are there any advantages? Disadvantages? Can one make use of specific properties in specific indoor climate environments? What is the effect of moisture?

The main part of the thesis embraces these concerns where the aim has been to improve the conditions for a safe indoor environment since building materials, such as concrete, have a natural contribution of radon (222 Rn) to indoor air.

Part of the main study of the thesis included that 12 different concrete recipes were cast to investigate the ²²²Rn radon exhalation rate of these concrete mixtures in relation to their relative humidity (RH). Ten recipes consisted of different mixes of binders and hydrophobic admixtures containing crushed rock with a slightly enhanced ²²⁶Ra-activity concentration (Bq/kg), while two other recipes included crushed rock with low levels of radioactivity. As a reference cement, a CEM I, 52.5 R produced by Cementa AB/HeidelbergCement Group (Skövde cement factory) was used. The concretes' composition had a water binder ratio (w/b) of 0.55.

The results imply that SCMs and hydrophobic admixtures (liquid) have a moderate to fairly large impact on the radon exhalation rate, with a humidity of 75 % and 60 %. The largest impact at a relative humidity of 75 % is shown by micro-silica (SF-30), which reduces the radon exhalation rate by up to 57 %. However, at a relative humidity of 45 %, the radon exhalation of the reference concrete is in line with most other concrete mixes regarding their radon exhalation rates.

Also, the natural process of carbonation affects the radon exhalation rate. The study performed as part of the thesis, relating to carbonation and its influence, generated different results depending on the concrete recipe, but can be summarised as follows: (i) concrete with only CEM I or CEM I combined with an hydrophobic admixture indicated a reduced radon exhalation rate; and (ii) for a concrete recipe containing CEM I as a binder combined with slag or fly ash, the radon exhalation rate increased.

Another study, as part of the thesis, embraced induced cracks and their influence on the radon exhalation rate. The study showed that the influence of cracks can be quite large. In two cases an increase of 200-250 % was calculated compared to the radon exhalation rate of

the same concrete without cracks. In the other cases, the increase was proportional to the increase of the concrete surface.

Conclusions from part of the main study are that the radon gas exhalation rates from the concrete mixes generally decreased with decreasing relative humidity. The radon gas diffusion, however, increased in general as the relative humidity decreased. Conclusively, this implies that the relation between the relative humidity (RH), radon concentration and diffusion within a concrete wall, ceiling or floor is a complicated interaction. In practice, the influence of relative humidity is the dominant factor for the final radon exhalation rate from a building material. Consequently, the radon exhalation rate, in general, decreases over time as the concrete dries out and the relative humidity decreases.

The high radon exhalation rate in this study is foremost due to (i) the material's high radium content and (ii) higher emanation coefficient at higher relative humidities. It is of importance to note that the materials' slightly elevated radium content has a large influence on the high radon exhalation. Comparing concrete recipe C (only OPC as binder) with a recipe replaced with a low radioactive content aggregate (i.e., a low amount of radium), the production rate is very limited, which means a low radon exhalation rate, even though a moderate emanation coefficient can be shown.

Some essential conclusions derived from the thesis are that SCMs and hydrophobic admixtures can effectively reduce the radon gas exhalation rate, specifically at higher relative humidity levels; cracks in concrete may generate substantial radon concentration increases; and, depending on the choice of binders, the carbonation of concrete may have a positive or negative effect on the radon exhalation rate.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

ALLMÄNT	7
INLEDNING	8
Historik och bakgrund till radon som hälsorisk	
STUDIENS SYFTE OCH MÅL	11
Syfte och mål Storheter, enheter och symboler inom strålning och radon	
METODIK	14
HUVUDSTUDIEN	14 16 17 18 19 19 19 20 20 21
Radongasavgång/radongaskoncentrationsökning per tidsenhet Emanationskoefficient	
Diffusionskoefficient	
RESULTAT	25
INTERNA VARIABLER. Allmänt Radonavgång som funktion av relativ fukthalt Diffusionkoefficienter vid olika RF för olika betongrecept	25 25 25
Emanation / Emanationskofficient EXTERNA FAKTOR SOM PÅVERKAR BETONG	<i>28</i> 29
Sprickor Karbonatisering	29 30
SLUTSATSER	32
LITTERATURFÖRTECKNING	33

ALLMÄNT

Denna rapport är en kortfattad summering på svenska av Magnus Döses resultat och slutsatser utifrån hans doktorsavhandling, "Reducing Radon Gas Emissions in Concrete". Avhandling försvarades den 2 december 2022 vid KTH, Stockholm. Avhandlingen finns tillgänglig på DIVA-portalen, där även slutsatser, rekommendationer och framtida forskningsområden sammanställts.

I denna slutrapport redovisas som nämnts en kortfattad bakgrund, skäl till ämnet, resultat och de väsentligaste slutsatserna från doktorsarbetet:

Döse M (2022). "Reducing Radon Gas Emissions in Concrete". PhD dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 159 pp. <u>http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-319889</u>

I avhandlingen ingår följande artiklar:

- I. M. Döse, J. Silfwerbrand, C. Jelinek, J. Trägårdh & M. Isaksson: "Naturally occurring radioactivity in some Swedish concretes and its constituents – Assessment by use of I-index and dose-model". Journal of Environmental Radioactivity, 2016, Vol. 155-156, pp. 105-111.
- II. M. Döse, J. Silfwerbrand: "Reduction of Radon Gas in Concrete Using Admixtures and Additives". Nordic Concrete Research, No 58, 2018, pp. 17-34.
- III. M. Döse, J. Silfwerbrand: "Supplementary Cementitious Materials and Additives Effective Measures to Hinder Radon in Concrete". Journal of Advanced Engineering, Vol. 2, No. 1, 2018, pp. 1-8.
- IV. M. Döse, J. Silfwerbrand: "Effect on Radon Exhalation Rate Due to Cracks in Concrete". Nordic Concrete Research, No. 61, 2019, pp. 79-90.
- V. M. Döse, J. Silfwerbrand: "Effect of Carbonation on Radon Exhalation Rate in Concrete". American Concrete Institute, Materials Journal, Vol. 119, No 3, 2022, pp. 67-78.

INLEDNING

Historik och bakgrund till radon som hälsorisk

Den näst största orsaken till lungcancer i världen, efter rökning, är relaterad till radon (²²²Rn) och dess dotternuklider i vår miljö (WHO, 2009). Bland de första studierna riktade mot radon var studier som utfördes av Hultqvist (1956), men dessa gavs till en början endast ringa uppmärksamhet. Från 1970-talet och framåt gjordes ett ökande antal mätningar av förhöjd radonhalt i bostäder i olika länder (ICRP, 2014) och radon identifierades formellt som en orsak till lungcancer 1986 (WHO, 2009).

Byggmaterial, såsom betong, bidrar till utsläpp av radongas genom det naturliga sönderfallet av ²³⁸U (uran-238). ²³⁸U är ett naturligt radioaktivt grundämne som förekommer med en mycket liten del (del per miljon, ppm) i de flesta silikat- och kalkhaltiga bergarter, jordar och vatten i vår naturliga miljö.

Koncentrationerna av ²³⁸U i jordskorpan uttryckt som aktivitetskoncentration är 12-37 Bq/kg eller uttryckt som ppm, 1-3 (Isaksson & Rääf, 2017). När det gäller de naturligt förekommande gammastrålande radionukliderna utgörs dessa av ⁴⁰K, ²²⁶Ra (uran-238) och ²³²Th och deras sönderfallsprodukter (dotterisotoper). ⁴⁰K utgör 0,012 % av allt naturligt kalium i berggrunden och förekommer i bergbildande mineral som kaliumfältspat (10-14 % K) och glimmer (9-10 % K) (Jelinek & Eliasson, 2015). Uran och torium förekommer däremot endast som spårämnen i bergarter, främst i accessoriska mineral, t.ex. uranit, allanit, apatit, titanit och xenotid (Jelinek & Eliasson, 2015).

Många nationella strålskyddsmyndigheter eller kommuner har idag utfört och dokumenterat effekterna av förhöjda radongashalter i olika inomhusmiljöer (Mustonen, 1984, Valmari et al., 2012, Catelinois et al., 2006, Tse et al., 2011, Kropat et al., 2014).

En stor studie av Darby et al. (2005, 2006) pekade på den ökade risken med förhöjda radongasnivåer i inomhusmiljön (figur 1).



Figur 1. Relativ risk för lungcancer enligt uppmätt radonhalt i bostäder (riskerna är relativa till den vid 0 Bq/m³, Darby et al., 2005).

Studien omfattade undersökningar från 13 nationer i Europa, där minst 20 000 personer utgjorde del av studien.

I de flesta studier av vår inomhusmiljö kopplad till radongas dras också ett nära samband till det höga innehållet av aerosoler (partiklar) som härrör från matlagning eller inandning av cigarettrök (Scofield, 1988, Porstendörfer, 1994, Darby et al., 2005, Isaksson, 2011). De flesta fallstudier visar att en ökad risk för lungcancer orsakad av radongas varierar inom spannet av 5-15 % (Porstendörfer, 1994, Catelinois et al., 2006, Isaksson, 2011).

Under de senaste åren har ett gediget arbete av de nationella myndigheterna i de flesta medlemsstater i Europa, i samarbete med Europeiska kommissionen (EG), lagt grunden för en gemensam plattform avseende den europeiska situationen när det gäller radongaskoncentrationer i vår boendemiljö. l. En sammanställning av den aktuella "radonsituationen" i olika länder illustreras i figur 2.

European Indoor Radon Map, November 2021



Figur 2. Europeisk karta som visar radonhalterna i Bq/m³ inomhus utifrån färg till vänster i figuren (EC, 2021, Hoffmann et al., 2017). Radonhalterna (Bq/m³) i kartan presenteras som ett aritmetiskt medelvärde (AM) i rum på bottenplanen i byggnader. Vit färg indikerar avsaknad av mätdata. Grå kulör är länder som ej deltagit i studien.

Som framgår av figur 2 har de nordiska länderna i de flesta fall aritmetiska medelvärden (AM) under 200 Bq/m³. Märkbart uppvisar vissa områden i Finland förhöjda radonhalter på upp till 500 Bq/m³ (orange färg, figur 2) eller till och med 1000 Bq/m³ (röd färg). Acceptabla inomhusnivåer i europeiska länder idag ligger på en tröskelnivå på 300 Bq/m³ (EC, 2014). I Sverige har dock en strängare tröskelnivå på 200 Bq/m³ satts (Boverket, 2011 med uppdateringar).

STUDIENS SYFTE OCH MÅL

Syfte och mål

Syftet med studierna som del av avhandlingen är främst att få ökad kunskap om radongasens beteende under olika förhållanden i betong. En central roll är betongens relativa fuktighet (fukthalt, RF) och hur denna påverkar betongens radonavgång. I avhandlingen har tre nivåer valts: RF 75 %, RF 60 % och RF 45 %. Detta mot bakgrund av studier av Bagge (2011) och Nevander & Elmarsson (2006) samt resultat från mätningar i bostäder av Fridh & Lagerblad (2013) där en inomhusmiljö med ett RF om ca 45-60 % är en fingervisning om fukthalten i betong i vår inomhusmiljö.

En central del berör också vilken inverkan på radonavgången tillförsel av olika tillsatsmaterial (SCM) och tillsatsmedel har i olika betongblandningar.

En ytterligare del av arbetet i avhandlingen berör också externa effekter och hur dessa påverkar betongen och i slutändan radonavgången från betong. Externa effekter i detta sammanhang är sprickor och karbonatisering.

För att förtydliga studiens syfte önskades klarlagt följande forskningsfrågor (FF);

FF 1. När det gäller relativ luftfuktighet och radonavgång. Bidrar den relativa fuktigheten i betong till en förändring av radonavgången ((Bq/m²)/h)?

Forskningsfrågan syftar till att klargöra vilka variationer som kan förväntas mellan en relativ luftfuktighet i intervallet 75 till 45 %. Dessa förhållanden i relativ luftfuktighet återspeglar säsongsvariationerna inom hyreshus och andra bostäder.

FF 2. Kommer användningen av tillsatsmaterial (SCM) att bidra till både minska koldioxidavtrycket och radongasavgången?

Forskningsfrågan belyser frågan om att minska koldioxidproduktionen från cementklinkerproduktionen. Ett substitut med ett alternativt bindemedel kan i själva verket tjäna båda syftena: minska radonavgången från betong och samtidigt använda mindre vanligt portlandcement i receptet.

FF 3. Hur påverkar hydrofoba tillsatser radonavgången från betong?

Forskningsfrågan belyser ett ytterligare sätt att minska utsläppet av radongas, utan några andra insatser än att tillföra ett flytande tillsatsmedel.

FF 4. Hur påverkar porositeten radonavgången?

Frågan är grundläggande för att förstå mekanismerna bakom radonavgången och dess hastighet (Bqm²/h). Detta mot bakgrund av betongens kapillärporsystem och gelporerna i kombination med luftporer. Fördelningen (fraktion) av kapillärporer och gelporer och deras proportioner i cementpastan kan spela en viktig roll.

FF 5. Hur påverkar sprickor i betongen radonavgången?

Forskningen fokuserar på effekten av inducerade sprickor i olika betongsorter. Studien syftar till att svara på om teoretiska beräkningar är i linje med uppmätta data.

FF 6. Påverkar karbonatisering av betong radonavgången?

Karbonatisering av betong ansågs inledningsvis inte medföra någon förändring av radonavgången, mätt som hastighet ($(Bq/m^2)/h$). Men vilken roll spelar det? En studie genomfördes för att undersöka dess påverkan på radonavgången i betong med olika tillsatsmaterial och tillsatsmedel.

Storheter, enheter och symboler inom strålning och radon

I tabell 1 är en kortfattad summering av använda storheter, enheter, symboler samt definition för dessa. En mer detaljerad förklaring av olika storheter/enheter och definitioner finns att tillgå i avhandlingen.

Storhet	Enhet	Enhet (förkortning)	Symbol	Definition		
Radioaktivitet	Becquerel	Bq	A	En Bq definieras som aktiviteten (A) hos en mängd radioaktivt material i vilken en kärna sönderfaller per sekund.		
Radioaktivitet	Bequerel per kubikmeter	Bq/m ³	С	Aktivitet i mediet per volymenhet. Sönderfall av kärna per sekund per kubikmeter (volym)		
Radioaktivitet	Bequerel per vikt	Bq/kg	Cm	Aktivitet per massenhet. Sönderfall av kärna per sekund per massa (ofta kg)		
Radonavgång	Bequerel per yta och tidsenhet	(Bq/m²)/h	E	Antal sönderfall per sekund per kvadratmeter per timme.		
Radonflöde	Bequerel per yta och tidsenhet	(Bq/m²)/s	J	Antal sönderfall per sekund per kvadratmeter per sekund. Ofta också definierat som radonflödet (flödestätheten) över en tvärsnittsarea		
Emanationskoefficient	Dimensionslös	(%)	€	Den del (procentandel) radonatomer som produceras genom radiumsönderfall som avgår till porerna i förhållande till den totala mängden radonatomer i materialet. Dimensionslös (%).		
Diffusionskoefficient	Kvadratmeter per tidsenhet	m²/s	D	Radonets eller andra grundämnens förmåga att diffundera genom ett material.		

Tabell 1. Storheter, enheter och definitioner.

METODIK

Allmänt

Många olika försöksuppställningar utfördes som del av avhandlingen. Dessa är mer i detalj presenterade i artiklar som del av avhandlingen. I slutrapporten presenteras de avsnitt som utgjort de väsentligaste delarna av avhandlingen.

Huvudstudien

Det huvudsakliga målet var att (i) undersöka tillsatsmaterialens inverkan som del av bindemedlet och hur dessa påverkade radonavgången vid olika RF. Studerade tillsatsmaterial utgjordes av slagg (GGBS), mikrosilika och flygaska i olika proportioner.

Vid användning av tillsatsmedel var fokus (ii) att undersöka om tillsatsmedlen bidrog till att minska transporten av radongas i betongerna. Ett av delmålen i nämnda fall var härav också att undersöka de olika betongernas diffusionskoefficienter vid olika RF.

Huvudstudien inkluderande tolv olika betongrecept, där varje recept innefattade minst 8 betongkuber (150 x 150 x 150 mm) och fem betongprismor (300 x 75 x 75 mm). Figur 3 presenterar försöksuppställningen för respektive betongrecept med olika delsteg för utvärdering av olika egenskaper.



Figur 3. Försöksuppställningar för undersökningar som del av huvudstudien.

Ballast och vattencementalet (eg. vattenbindemedelstalet) var detsamma för de tio första betongrecepten (w/b = 0,55). Bindemedlens effektivitetsfaktor k sattes till k = 1 i alla recept. Det som ändrades var olika halter av bindemedel och tillsatsmaterial i recepten, där dock den totala bindemedelshalten var konstant och för fem recept tillfördes ett flytande hydrofoberande medel i det vattnet som utgjorde del av respektive betongjutning. En summering av olika kombinationer och andelar, uppmätt andel luft samt sättmått finns i bilaga 1.

I tabell 2 illustreras det olika förutsättningarna med undersökta recept. I två av fallen användes ett lågstrålande ballast, som utgjorde referensmaterial.

Tabell 2. De olika betongrecepten samt deras olika andelar av bindemedel och tillsatsmaterial i recepten. Tillförd flytande hydrofoberande medel är i tabellen markerat med "Ja/Nej".

Nr	Beteckning	Ballast	Bindemedel, CEM I (%)	Typ av tillsatsmaterial	Tillsatsmaterial (%)	Hydrofoberare.
1	С	Granit	100			Nej
2	C-H1	Granit	100			Ja
3	C-H2	Granit	100			Ja
4	C-H3	Granit	100			Ja
5	C-F15- MF20	Granit	65	Flygaska, kombination	35	Nej
6	C-MF35	Granit	65	Flygaska	35	Nej
7	C-S65	Granit	35	Slagg	65	Nej
8	C-SF10	Granit	90	Mikrosilika	10	Nej
9	C-SF30	Granit	65	Mikrosilika	35	Nej
10	C-FM15- SF10-H1	Granit	75	FA+Mikrosilika	25	Ja
11	CGB	Gabbro	100			Nej
12	CGB-H1	Gabbro	100			Ja

Gjutningsförfarande

Som huvudbindemedel användes en standard CEM I – Skövde CEM I SH 52,5 R (snabbhärdande) från Skövde cementfabrik/Cementa AB/Heidelberg Cement Group. En cementhalt på 350 kg/m³ nyttjades. För husbyggnadsbetong fastställdes en lägsta hållfasthetsklass på minst C40/50 som det primära målet (tabell F.1, SS-EN 206). Utifrån aktuellt w/b-förhållandet kunde en hållfasthetsutveckling på cirka 55-65 MPa (28 dygn) förväntas för betongrecepten (blandningarna). Luftkomponenten uppmättes till ungefär lika med 1,0 volymprocent i samtliga fall.

För alla experiment mättes sättmått med en stålkon enligt EN 12350-2, *Testning av färsk betong - Del 2: Slump-test*. Ett sättmått på 100 mm var referensvärde för att uppnå en måttlig bearbetbarhet hos betongen. I samtliga fall nåddes ett sättmått mellan 70 och 130 mm efter slutblandning (bilaga 1).

Lufthalten mättes med "tryckmätarmetoden", enligt EN 12350-7, *Provning av färskbetong – Del 7: Lufthalt – Tryckmetoder*. I de flesta fall registrerades en lufthalt på 0,9 till 1,3%.

Avseende gjutningsförfarandet i blandarcentralen blandades de olika betongrecepten i minst 5 minuter för att få en bra bearbetbarhet. En plasticerare, "Sikament 56", tillsattes i några fall i mindre mängder när blandningen och/eller arbetbarheten uppfattades som heterogen.

En mindre skillnad i hållfasthetsutveckling förväntades på grund av de olika proportionerna av tillsatsmaterial, såsom flygaska, mikrosilika och slagg (Hewlett & Liska, 2019, Neville & Brooks, 2010, Mueller et al. 2017). I tabell 3 presenteras det allmänna receptet för betongproverna med ett w/b-förhållande på 0,55.

Delmaterial	kg/m ³	Vikt (%)
Cement, CEM I - Skövde	350	14.8
Krossad ballast, 0/5 (55 vt%)	821	34.7
Krossad ballast 8/16 (45 vt%)	1004	42.4
Vatten	192	8.1
Superplasticerare (Sikament 56)	~1	-
Total	~2369	100
w/b kvot	0.55	

Tabell 3. Kvantiteter (i kg/m³ och vikt %) av olika delmaterial I betongproverna. Nedan är beskrivet referensprovet (C) innehållande enkom CEM I-bindemedel.

Utvärdering av RF i betongrecepten

Inför mätningar av diffusion och radonavgång vid korrekt RF (75, 60 och 45 %) användes en betongplatta (radongasdiffusion) och ett betongprisma (radonavgång) från respektive betongrecept. Mätning av RF i betongrecepten utfördes på djup av 10 och 25 mm för respektive betonggjutning (figur 3a).

Respektive betongrecept med plattor och prismor förvarades i plastlådor, där salter reglerade atmosfärens RF. Dessa lådor förslöts (figur 3b, c) för att betongen skulle torka ut mot angivet RF av saltet. Atmosfärens/luftens RF i dessa förslutna lådor mättes kontinuerligt med Vaisala fuktmätare (figur 3c, d).

Mätningar utfördes med jämna intervall (2-3 veckor) för att övervaka hur betongens RF förändrades. Figur 3d visar en givare som användes invändigt i rören. Dessa mätningar kompletterades också med mätning av vikt för respektive betongs betongplatta och prisma för att säkerställa att uppställt RF i betongen var i linje med omgivningens RF inför mätning av diffusion och radonavgång. Omgivningen, dvs luftens RF, styrdes med salter (NaCl, NaBr respektive K₂CO₃), vilka motsvarade ett RF av ca 75, 60 och 45 % respektive vid ca 23°C.



Undersökning av cementpasta

Studien omfattade också undersökningar av cementpasta och dess struktur, där sammansättning var identisk med den pasta som använts i en del av betongrecepten. I den här delstudien undersöktes porositet, specifik yta, porradie och porvolymen för respektive bindemedel (cementpasta). Vidare resultat finns här att tillgå i avhandlingen.

Externa faktorer

Allmänt

Två olika försök utfördes som är relaterade till externa faktorer som kan påverka radonavgången från betong. Dels undersöktes inverkan av

- (i) sprickor
- (ii) karbonatisering för olika betongrecept

Influens av sprickor

Två olika betongrecept göts där radonavgången mättes före och efter sprickbildning för respektive betongprov (figur 4).



Figur 4. Två olika betongrecept med betongprismor som vilar på ett bord. Två betongprismor från respektive betongrecept är illustrerade med inducerade sprickor. Till vänster, recept C med två betongprismor i vänster del av figuren och till höger, recept C-H1 med två betongprismor.

Metodiken är summerad i figur 5. Av vikt före mätningarna av radonavgången var att RF (%) skulle vara ca 60 för respektive betongprisma. Proverna lagrades således ca 1 år i klimatkammare (55 % RF, 23°C) innan de första radonutvärderingarna utfördes.





Figur 5. Översiktlig metodik och tillvägagångsätt för utvärdering av sprickors påverkan på radonavgången beskrivet från vänster till höger, där två betongrecept med kuber och prismor göts.

Inverkan av karbonatisering

För att undersöka effekten av karbonatisering på radonavgången göts fyra olika betongrecept vilka var utsatta för accelererad karbonatisering i en atmosfär med förhöjd CO₂-halt i intervallet 1 och 2 %. Proverna förvarades i klimatkammare (RF 75 %, 23°C) ca 10 månader innan provningarna kunde påbörjas. Radongasavgången från de olika betongmixarna uppmättes initialt från en icke karbonatiserad yta. Mätningar fortgick tills det karbonatiserade djupet mellan betongproverna uppmättes till mellan 10 och 12 mm.

Radonavgången för respektive betongrecept mättes vid fem olika tillfällen för respektive prov. I figur 6 visas en förenklad beskrivning av arbetsmetodiken.



Figur 6. Metodbeskrivning för utvärdering av radongasavgången som funktion av karbonatisering. Provningsförfarandet är beskrivet från vänster till höger.

METODIK – BERÄKNINGAR

Radongasavgång/radongaskoncentrationsökning per tidsenhet

En ökning av radongaskoncentrationen i en sluten kammare kan beräknas enligt riktlinjer från ISO 11665-7:2012:

$$C(t) = \frac{E \cdot A}{V \cdot \lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$
(1)

där C(t) = koncentration som funktion av tiden i Bq/m³, E = radongasavgång i (Bq/m²)/h, A = betongens ytarea i m², λ = sönderfallskonstanten för ²²²Rn i h⁻¹ (0,00755) och t = tid i timmar.

Förutsatt att halten av radongas i en sluten kammare initialt är "noll" kan radonhaltens koncentrationsökning i en volym grafiskt illustreras enligt figur 7. Två olika scenarier visas, där endast den inneslutna volymen är olika. Alla andra parametrar är lika. Volymen 2 (V2) är hälften så stor som volym 1 (V1). En reducerad volym i en kammare genererar en högre aktivitetskoncentration av ²²²Rn i volymen (V2) på grund av radonets kontinuerliga sönderfall.



Figur 7. Radongasavgång/koncentrationsökning av radongas i en sluten kammare. Två fall med olika stora kammare illustreras. Röd rektangel markerar aktuellt område vid mätning under 24h.

Genom McLaurin-härledningen av ekvation 1 kan radonavgången av ²²²Rn bedömas med hjälp av en linjär uppbyggnad (ekvation 2) under de första 24 timmarna (figur 7) förutsatt att bakgrundskoncentrationen (aktivitetskoncentrationen) är mycket låg (noll) eller kan subtraheras från den slutliga koncentrationen. Således kan följande linjära uttryck (ISO 11665-7:2012) användas för att beräkna materialets radonavgång per tidsenhet ${\cal E}$

$$E = \frac{V \cdot C(t)}{A \cdot t} \tag{2}$$

där V = volym i en sluten kammare (m³), C = koncentrationen av radon under gällande tid (Bq/m³), A = uppmätt area för radonavgång från material (m²) och t = tiden för mätning (h).

Den linjära uppbyggnaden förutsätter att det varken finns läckage eller bakdiffusion av radon under denna inledande period av ansamling i kammaren.

Emanationskoefficient

Emanationsskoefficienten (ekvation 3) kan bland annat utvärderas med kännedom om jämviktskoncentrationen ²²²Rn i en specificerad luftvolym (Bq/m³), liksom kännedom om provets massa och materialets specifika aktivitet (Bq/kg) i ²²⁶Ra under torra förhållanden enligt:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{V} \boldsymbol{x} \; \boldsymbol{C} / \left(\boldsymbol{M} \boldsymbol{x} \; \boldsymbol{R} \right) \tag{3}$$

där €=emanationskofficienten (%), C = jämviktskoncentrationen ²²²Rn (Bq/m³), M = provets massa (kg), V= den totala specificerade luftvolymen i det slutna systemet (m³) och R = provets radiumkoncentration (²²⁶Rn i Bq/kg).

Diffusionskoefficient

Mätning av diffusion och beräkning av diffusionskoefficient D för radongas utfördes genom att en 50 mm tjock betongplatta från respektive betongrecept monterades mellan två kammare. Den ena kammaren, benämnd primärkammaren, tillfördes ett radioaktivt ämne med 238-U och därefter förslöts primär och sekundärkammare med betongplattan emellan (figur 8).



Figur 8. Mätning av radongasdiffusionen för prov C-H1. Betongprovet är monterat i mitten. Sekundär kammare till vänster i bild. Primär kammare i höger del av figuren.

Mätning av ett materials diffusionskoefficient kan således utföras om radongasen i primär kammare uppnår sekulär jämvikt (så kallad "steady-state", Kovler, 2012) innan diffusionmätningen påbörjas. Dvs, halten radon i primärkammaren är konstant (lika mycket radon som bildas sönderfaller samtidigt).

Mätning av diffusion genomförs genom att "lufta" den sekundära kammaren. Ett luftflöde tillförs i korta sekvenser eller rent kväve (99,99 %) för att säkerställa en mycket låg initial radonhalt. Förutsatt att de ursprungliga villkoren är uppfyllda (radontäta kamrar) kan radontillväxten i den sekundära kammaren antas vara linjär under de första timmarna och kan skrivas som (Chauhan & Kumar, 2013):

$$J = \frac{C \cdot V}{t \cdot A} \tag{4}$$

där J = radonflödet, i (Bq/m²)/s; C = radonhalten vid jämvikt i primär kammare, Bq/m³, V = kammarens volym (sekundär kammare); A = betongprovets yta i m² vinkelrätt mot flödesriktningen, och t = tiden i sekunder eller timmar. Observera att ekvation 4 motsvarar ekvation 1, men skriven med delvis andra symboler.

Radonflödet J ((Bq per m²)/s) över materialets yta och mätt i sekundärkammaren kan definieras av Ficks första lag som säger att flödet J (flödestätheten) är proportionellt mot diffusionen D och den negativa gradienten av koncentrationen dC/dx (Audenaert, 2007)

$$J = -D \left| \frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}x} \right|_{x=d} \tag{5}$$

där x = mätpunkten i materialet (i detta fall betongplattan med tjockleken d (m) mellan primär- och sekundärkammaren) och D = diffusionskoefficienten i m²/s.

Med dessa antagande kan diffusionskoefficienten för radongas beräknas för respektive betongrecept vid olika RF. Utifrån diffusionskoefficienten D kan även radongaslängden L(mm) beräknas vilket är ett mått på materialets täthet, men beskrivet per längdenhet. Radongaslängden är den längd radongasen diffunderar under den tid som motsvarar en halvering av dess initiala aktivitetskoncentration (Kovler, 2012). Ett lägre tal innebär en tätare betong.

RESULTAT

Interna variabler

Allmänt

Under resultatavsnittet redovisas de resultat som visar hur olika bindemedel och tillsatsmedel påverkar radonavgången i betong. Det bör nämnas att fler resultat finns att tillgå, men enkom de som anses av stort värde för industriell tillämpning är här presenterade.

Radonavgång som funktion av relativ fukthalt

Resultaten av radonavgången från de olika betongrecepten illustreras i figur 9. Grafen beskriver radonavgången (radonavgång i Bq/m²/h) som en funktion av de olika betongrecepten vid olika RF.



Figur 9. Radongasavgång som funktion av relativ fukthalt (%) för de undersökta betongrecepten. Minst tre olika RF undersöktes för respektive betongrecept (75, 60 och 45 %).

Resultaten indikerar tydligt:

- att en hög radonavgång är dominerade vid högt RF (RF 75%) jämfört med lägre RF.
- att vid RF 45% är oavsett undersökt betong, radonavgången markant lägre för de flesta betongblandningarna.
- att vid användning av tillsatsmaterial kan observeras en markant lägre radonavgång jämfört med referensbetongen (C). Främst noterbart vid RF 75 och 60 %.
- att vid användning av olika hydrofoberande medel så sjunker radonavgången avsevärt. Främst noterbart vid RF 75 och 60 %.
- att vid inblandning av hög andel tillsatsmaterial är inverkan av den relativa fukthalten begränsad (C-MF35 och C-SF30).

Diffusionkoefficienter vid olika RF för olika betongrecept

De uppmätta diffusionskoefficienterna är redovisade i tabell 4. I tabell 4 är också infört en beräknad inverkan på diffusionen av betongmaterialet självt vid RF 75 %, där enkom betongmaterialet uppmättes (ingen extern källa som genererade radongas inför mätning, båda kamrarna luftades inför mätning). Radongasdiffusionen mättes genom att en stark strålningskälla placerades på ena sidan av en betongplatta (primärkammaren), men eftersom betongplattan också avger radongas finns en störning till mätresultaten.

Betong- recept	Radon, dif D (m²/s)	ffusionkof	ficienter	Bakgrunds- påverkan av betong- material (%)	Radon diffusi (mm)	gas- onsläng	gd <i>L</i>
RF (%)	75	75	45	75	75	60	45
С	1.78E-10	5.80E-10	1.06E-09	32	9.2	16.6	22.5
C-H1	1.70E-10	2.12E-10	1.33E-09	17	9.0	10.1	25.2
C-H2	1.98E-10	4.29E-10	1.55E-09	3	9.7	14.3	27.2
C-H3	1.15E-10	8.48E-10	1.42E-09	32	7.4	20.1	26.0
C-F15-MF20	2.87E-11	2.56E-11	1.20E-10	49	3.7	3.5	7.6
C-MF35	9.43E-11	1.70E-10	5.15E-10	28	6.7	9.0	15.7
C-S65	5.04E-11	2.12E-10	3.48E-10	37	4.9	10.1	12.9
C-SF10	8.60E-11	2.49E-10	5.36E-10	27	6.4	10.9	16.0
C-SF30	1.48E-10	6.95E-10	8.43E-10	12	8.4	18.2	20.0
C-FM15- SF10-H1	1.66E-10	2.32E-10	4.74E-10	18	8.9	10.5	15.0
CGB	1.15E-10	5.40E-10	9.43E-10	36	7.4	16.0	21.2
CGB-H1	2.72E-11	3.88E-10	7.65E-10	44	3.6	13.6	19.1

Tabell 4. Beräknade diffusionskoefficienter utifrån uppmätta resultat samt beräknad påverkan från betongmaterialets radonavgång vid RF 75 %. Även radongasens diffusionlängd *L* är beräknad.

Det är noterbart att påverkan av betongmaterialets radongashalt - *"kolumn - Bakgrunds-påverkan av betong-material (%)"* – ställvi**s** är tydlig vid låga radongasdiffusionskoefficienter (RF 75 %).

I tabell 4 är också beräknat diffusionslängden för radon L. Förenklat indikerar ett lågt L värde således en mycket tät betong i ett rum där radongasen främst kommer från det yttersta skiktet (0-50 mm) av betongen. I flera fall kan observeras att vid ett högt RF är diffusionskoefficienten D för många betongrecept mycket låga precis som L är mycket lågt.

Det är också noterbart att diffusionskoefficienten D generellt ökar med minskande RF i de olika betongerna för undersökt intervall (RF 75%-45%).

Emanation/ Emanationskofficient

Emanation eller emanationskofficienten, vilket kan uttryckas som den andel av radongas som avges till porutrymmet i förhållande till andelen producerad radon i materialet, är liksom radonavgången (figur 9) noterbart högre vid ett högre RF (figur 10).

Detta är dock inte alltid fallet, som exempelvis vid en hög andel slagg eller flygaska som del av bindemedlet.



Figur 10. Emanationskofficienten som funktion av relativ fuktighet för de undersökta betongrecepten. Andelen radongas som avgår till porutrymmet är betydligt högre vid högre RF.

I praktiken kan man notera att även om hänsyn vid beräkning av emanation tas till betongprovernas differens i massa vid olika RF samt deras aktivitetskoncentration av ²²⁶Ra, blir utfallet likartat med vad som kan observeras vid mätning av radonavgång för de undersökta betongrecepten vid olika RF. De högsta halterna av radongas i porutrymmet förekommer vid höga RF.

Externa faktor som påverkar betong

Sprickor

Vid beräkning av radonavgången före och efter sprickbildning kunde det konstateras att:

- I ett av fallen stämde teoretisk beräkning väl med uppmätta radongashalter (tabell 5). En ökning med ca 100 % hade förväntats. Viss variation kunde dock observeras mellan proverna.
- För betongrecept C-H1-1/CH-1-2 (tabell 5) var dock radonavgången vid beräkning betydligt högre än förväntat teoretiskt värde. Den procentuella ökningen var ca 200-260 % jämfört med ett teoretisk värde om ca 100 % ökning.

Tabell 5. Utvärderade betongprismor, där radongashalten är angiven före och efter sprickor inducerats i betongproverna. Två betongrecept med två betongprismor för respektive recept.

Prismor	OPC 1-1		OPC 1-2		CH - 1-1		CH - 1-2		
	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	
Radonavgång ((Bq/m²)/h)	38,2	67,3	36,1	78,6	31,9	114,6	26,3	79,5	
Differens (%)		76		118		259		202	

Karbonatisering

Vid utvärdering av radongasavgången som funktion av karbonatiseringsdjup observerades olika tendenser i betongrecepten vid ökat karbonatiseringsdjup (figur 11). Främst observerades:

- För betongrecept med enkom portlandcement (C) och portlandcement där hydrofoberande medel tillförts (C-H2) noterades en minskad radonavgång med ökat karbonatiseringsdjup.
- För betongrecept där en hög andel tillsatsmaterial tillförts, som flygaska (C-F15-M20-1) eller slagg (C-S65-1) ökade radonavgången med ökat karbonatiseringsdjup.



Figur 11. Radonavgång (Bq/m²/h) som funktion av karbonatiseringsdjup för respektive betongrecept.

Noterbart var även att uppmätta diffusionskoefficienter D för radon för betongrecept C-1 och C-S65 före och efter karbonatisering, med ett fixerat RF (75 %) uppvisade likartade tendenser.

För betong C-1 minskade diffusionskoefficienten efter karbonatisering (tabell 6). Men för betongrecept C-S65 ökade diffusionskoefficienten efter karbonatisering (tabell 6). Sammantaget var detta i linje med vad som kunde observeras vid mätning av radonavgången.

Betong- recept	Start-tid (dygn)	Koldioxid- halt	Karbonatiserings- djup (mm)	Radonflux J (Bq/m²/s)	Diffusionskoefficient D (m/s²)
С	0	*	0	0,00161	1,22E-10
	60	2%	7	0,00069	5,29E-11
C-S65	0	*	0	0,00158	1,20E-10
	60	2%	9	0,00319	2,54E-10

Tabell 6. Upmätta diffusionskoefficienter före och efter karbonatisering av betongrecept C och C-S65, undersökta vid fixerat RF (RF 75 %).

*Naturlig atmosfär (~0,04 %)

SLUTSATSER

Slutsatser rapporteras i punktform nedan

- Generellt sjunker radongas avgången när den relativa fuktigheten minskar för en betongblandning i intervallet RF75-RF45. Detta är i överenstämmelse med andra modeller och experiment där en minskad radonavgång kunnat dokumenteras i takt med att fukthalten i betong minskar.
- De uppmätta diffusionskoefficienterna för de 12 betongrecepten ökar generellt när fukthalten eller den relativa fukthalten minskar. Detta är även i linje med flera undersökningar internationellt.
- Det är i utförd studie påvisat att radonavgången i betong till viss del kan minskas med inblandning av tillsatsmaterial (Supplementary Cementitious Materials, SCM). Detta är mest noterbart vid högre relative fukthalt vid jämförelse mot ett betongrecept där enkom portlandcement (CEM I) använts.
- Resultaten av studierna från kvicksilverporositetsmätningar (MIP) indikerar att ett bindemedel med låg medelradie i porstrukturen och ökad yt-area (m²/g) medför att diffusionskoefficienten är lägre och sannolikt bidrar till en lägre slutlig radonavgång.
- Generellt har hydrofoba medel en positiv inverkan på radongasavgången. Detta visar att hydrofoba medel bidrar till att minska radonavgången. Detta är även relativt tydligt vid jämförelse av diffusionskoefficienten *D* mellan referensbetongen CGB och CGB-H1 (tabell 4), där CGB-H1 (med hydrofoberare) har en betydligt lägre diffusionskoefficient. Den här effekten är mest noterbar vid högre relativ fukthalt. Tillförd hydrofoberare förefaller till viss del bidra till en minskad diffusion (transport) i betongen och således en minskad radonavgång.
- Studien med inducerade sprickor i två olika betongrecept antyder i ett av fallen en starkt ökad radonavgång, vilken är oproportionerlig mot ökad yta-area från inducerade sprickor. Flera faktorer förefaller bidra till en ibland kraftigt förhöjd ökad radonavgång vid sprickbildning i betong.
- Karbonatisering har initial en låg påverkan på radonavgång. Vid ökat karbonatiseringsdjup (8-12 mm) kan observeras en mer tydlig inverkan. Beroende av bindemedelssammansättning i betongen kommer olika effekter ske. SCMs som del av bindemedlet medverkar till en ökad radonavgång vid ökad karbonatisering, där karbonatiseringen i bindemedlet medverkar till en ändrad porstruktur. Karbonatiseringsprocessen medför här en mer grovkornig porstruktur, vilket bidrar till ökat samspel mellan porerna där resultanten är en ökad radonavgång. Portlandcement uppvisar en motsatt effekt vid ökat karbonatiseringsdjup i betongen, där koldioxiden reagerar med portlandit och fäller ut kalciumkarbonat i porstrukturen. Kalciumkarbonatet medverkar till att täta porstrukturen, där en minskad diffusionskoefficient vid ökad karbonatisering kan påvisas vilket föranleder en minskad radonavgång vid ökat karbonatiseringsdjup i en vanlig portlandcementbetong.

LITTERATURFÖRTECKNING

Audenaert K (2007). "Durability of Self-Compacting Concrete, RILEM TC 205-DSC, Section 4.1 Carbonation". State of the Art Report, pp. 63-76.

Bagge H (2011). "Building Performance – Methods for Improved Prediction and Verification of Energy Use and Indoor Climate". Doctoral Thesis, Report TVBH-1019, Building Physics, Lund University, 202 pp. Lund, Sweden.

Catelinois O, Rogel A, Laurier D, Billon S, Hemon D, Verger P and Tirmarche M (2006). "Lung Cancer Attributable to Indoor Radon Exposure in France: Impact of the Risk Models and Uncertainty Analysis". Environmental Health Perspectives, Vol. 114, No. 9, pp. 1361-1366.

Chauhan R P & Kumar A (2013). "Radon resistant potential of concrete manufactured using ordinary portland cement blended with rice husk ash". Atmospheric Environment. Vol. 81. pp. 413–420.

Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Deo H, Falk R, Forastiere F, Hakama M, Heid I, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagrade F, Mäkeläinen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruano-Ravina A, Ruosteenoja E, Schaffrath Rosario A, Tirmarche M, Tomasek L, Whitley E, Wichmann H-E & Doll R. (2005). "Radon In Homes And Risk Of Lung Cancer: Collaborative Analysis Of Individual Data From 13 European Case-Control Studies". British Medical Journal, Vol. 330, No. 7485, pp. 223-226.

Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Deo H, Falk R, Forastiere F, Hakama M, Heid I, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagrade F, Mäkeläinen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruano-Ravina A, Ruosteenoja E, Schaffrath Rosario A, Tirmarche M, Tomasek L, Whitley E, Wichmann H-E & Doll R (2006) "Residential Radon and Lung Cancer: Detailed Results of a Collaborative Analysis of Individual Data on 7148 Persons with Lung Cancer, 14208 Persons without Lung Cancer from 13 Epidemiologic studies in Europe," Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, Vol. 32, pp 1-84.

Döse M (2022). "Reducing Radon Gas Emissions in Concrete". PhD dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 159 pp. <u>http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-319889</u>

M. Döse, J. Silfwerbrand, C. Jelinek, J. Trägårdh & M. Isaksson: "Naturally occurring radioactivity in some Swedish concretes and its constituents – Assessment by use of I-index and dose-model". Journal of Environmental Radioactivity, 2016, Vol. 155-156, pp. 105-111.

M. Döse, J. Silfwerbrand: "Reduction of Radon Gas in Concrete Using Admixtures and Additives". Nordic Concrete Research, No 58, 2018, pp. 17-34.

M. Döse, J. Silfwerbrand: "Supplementary Cementitious Materials and Additives – Effective Measures to Hinder Radon in Concrete". Journal of Advanced Engineering, Vol. 2, No. 1, 2018, pp. 1-8.

M. Döse, J. Silfwerbrand: "Effect on Radon Exhalation Rate Due to Cracks in Concrete". Nordic Concrete Research, No. 61, 2019, pp. 79-90.

M. Döse, J. Silfwerbrand: "Effect of Carbonation on Radon Exhalation Rate in Concrete". American Concrete Institute, Materials Journal, Vol. 119, No 3, 2022, pp. 67-78.

EC (2014). "Council Directive 2013/59/Euroatom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. and repealing Directives 89/618/Euroatom. 90/641/Euroatom. 96/29/Euroatom. 97/43/Euroatom and 2003/122/Euroatom". Offical Journal of the European Union. Vol. 13. 73 pp.

EC (2021). "Radon map – Atlas". Joint Research Group (JRC), Directorate General – Nuclear Safety & Security, REM project, <u>Digital Atlas (europa.eu)</u>

Fridh K & Lagerblad B (2013). "Carbonation of indoor concrete : measurements of depths and degrees of carbonation". Report TVBM; Vol. 3169. Division of Building Materials, LTH, Lund University, Lund, Sweden, 36 pp.

M. Hoffmann, Ch. S. Aliyev, A. A. Feyzullayev, R. J. Baghirli, F. F. Veliyeva, L. Pampuri, C. Valsangiacomo, T. Tollefsen, G. Cinelli (2017). "First map of residential indoor radon measurements in Azerbaijan". Radiation Protection Dosimetry, Vol. 175 (2), pp. 186–193.

Hewlett P C & Liska M (2019). "LEA's chemistry of Cement and Concrete, fifth edition", Cambridge Massachusetts, USA, 858 pp.

Hultqvist, B. (1956). "Studies on naturally occurring ionizing radiations. Kungl. svenska vetenskapsakademins handlingar, fjärde serien", band 6, No 3.

ICRP (2014). "Radiological Protection against Radon exposure" (Edited by C. H. Clement). Annals of the ICRP. Publication 126, Vol. 43, No. 3, 73 pp.

Isaksson M (2011). "Basic radiation physics (Grundläggande strålningsfysik). 2nd edition". Elanders. Studentlitteratur. Lund. Sweden. 330 pp.

Isaksson M & Rääf C L (2017). "Environmental radioactivity and emergency preparedness". CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 614 pp.

ISO 11665-7 (2012). "Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon-222 — Part 7": Accumulation method for estimating surface exhalation rate. International Standard (ISO). first edition. Geneva. Switzerland. 23 pp.

Jelinek C & Eliasson T (2015). "Radiation from bedrock (Strålning från Bergmaterial)". Geological survey of Sweden. SGU-report 2015:34. Uppsala. Sweden (in Swedish). 26 pp.

Kovler K (2012). "Radioactive materials, chapter 8". "Toxicity of Building Materials, Woodhead Publishing, Ed. by F Pacheco-Torgal, S Jalali and A Fucic, pp. 196-240.

Kropat G, Bochud F, Jaboyedoff M, Laedermann J-P, Murith C, Palacios M, Baechler S (2014). "Major influencing factors of indoor radon concentrations in Switzerland". Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 129, pp. 7-22.

Mueller U, Lundgren M, Babaahmadi A. (2017). "Hydration of concrete binders blended with ground granulated blast furnace slag, fly ash and metakaolin". RISE CBI Betonginstitutet, Samhällsbyggnad. CBI report 2017:6, Borås, Sweden, 78 pp.

Mustonen, R (1984). "Natural radioactivity in and radon exhalation from finnish building materials", Health Physics, Vol. 46, No. 6, pp. 1195-2303.

Nevander L E and Elmarsson B (2006). "In Swed. - Fukthandbok" – In Eng. "Book of Moisture", 3rd rev. edition, Svensk Byggtjänst AB, Sweden, pp. 538.

Neville A M & Brooks J J (2010). "Concrete Technology, 2nd edition", Pearson Education Ltd, Essex, England, 442 pp.

Porstendörfer J (1994). "Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air". Journal of Aerosol Science, Vol. 25, No. 2, pp. 219-263.

Scofield P. (1988). "Radon decay product. in-door behaviour – Parameter. measurement method. and model review". National Institute of Radiation Protection. SSI-report 88-07. Stockholm. Sweden.

SS-EN 206 (2013). "Concrete – Specification. performance. production and conformity". Swedish Standard Institute. Stockholm. Sweden. 93 pp.

SS-EN 12350:2 (2009). "Testing fresh concrete – Part 2: Slump test". Swedish Standard Institute. Stockholm. Sweden. 20 pp.

SS-EN 12350:7 (2009). "Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods". Swedish Standard Institute. Stockholm, Sweden, 38 pp.

Swedish National Board of Housing. Building and Planning (2011). "Regelsamling för byggande (*regulations for building*). BBR". October 2011. Elanders. Karlskrona. Sweden. 356 pp. (In Swedish).

Tse L A, Yu I T-S, Qiu H, Siu Kai Au J, Wang X-R (2011). "A Case-Referent Study of Lung Cancer and Incense Smoke, Smoking, and Residential Radon in Chinese Men". Environmental Health Perspectives, Vol. 119, No. 11, pp. 1641-1646.

Valmari T, Arvela H, Reisbacka (2012). "Radon in Finnish apartment buildings". Radiation Protection Dosimetry, Vol. 152, No. 1-3, pp. 146-149.

World Health Organization (2009). "WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective," World Health Organization, Geneva, Switzerland, 110 pp.

Bilaga 1 – Designade betongrecept

		В	inders			Aggr	egates							
Recipe	Cement, CEM I - SH Skövde	SCM 1	SCM 2	SCM 3	SCM 4	Crushed, aggregate, 0/5 (55 wt%)	Crushed, aggregate 8/16 (45 wt%)	Water	Superplasticizer (Sikament 56)	Hydrophobic admixture (1 % of binder weight)	Total	w/b ratio	Air	Slump
Explanation		Fly Ash, Class F	Fly Ash, Microsite	Slag	Slica Fume, Elkem 940									
						k	g/m ³					-	%	mm
С	350					821	1004	192.5	1		2369	0.55	1	100
C-H1	350					817	998	192.5	0.7	3.5 (Silres 1801)	2362	0.55	1	102
С-Н2	350					819	1001	192.5	0.6	3.5 (Hydrofob 1)	2365	0.55	1.1	95
С-Н3	350					820	1002	192.5	0.7	3.5 (Silres 1802)	2366	0.55	1	120
C-F15-MF20	227.5	52.5	70			808	988	192.5	0.35		2338	0.55	1.1	120
C-FM35	227.5		122.5			811	991	192.5	-		2344	0.55	1.2	105
C-S65	129.5			220.5		816	997	192.5	-		2355	0.55	0.9	86
C-SF 10	315				35	817	998	192.5	0.35		2358	0.55	1.2	110
C-SF30	245				105	806	985	192.5	0.7		2334	0.55	1	105
C-FM15-SF10-H1	262.5		52.5		35	807	986	192.5	0.7	3.5 (Silres 1801)	2339	0.55	1.2	125
CGB	350					918	1122	192.5	0.5		2583	0.55	1.3	105
CGB-H1	350		0.7			915	1118	192.5	0.5	3.5 (Silres 1801)	2579	0.55	1	90

Designade betongrecept med uppmätt luft och slump vilka användes för utvärdering av radonavgång och diffusion.

SBUF stödjer forskning & utveckling