RADOONIOHU VÄHENDAMISE LAHENDUSED OLEMASOLEVATELE JA UUTELE HOONETELE

Guidance for radon-protective measures for new and existing buildings

Eessõna

Käesolev juhendmaterjal:

- on koostatud esmakordselt,
- juhendmaterjali koostamisel on lähtutud standardist EVS 840:2009. Radooniohutu hoone projekteerimine.
- Autorid on Targo Kalamees, Üllar Alev, Martin Thalfeldt, Kadi Varda, Jarek Kurnitski

Juhendmaterjali koostamist korraldas Tallinna Tehnikaülikooli ehitiste projekteerimise instituut ning rahastasid Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium ning Keskkonnaministeerium. Autorid tänavad asjalike ja väärtuslike kommentaaride eest Erki Soekovi Tallinna Tehnikaülikoolist, Krista Jüriadot Keskkonnaministeeriumist, Margus Sarmetit ja Maria Ševeljovat Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumist, Mait Saart Radoonitõrjekeskusest.

Teksti keelelise toimetuse on teinud Silvi Seesmaa (Halo Kirjastus OÜ).

Autoriõigused: autorid, 2015

Sisukord

1 Sissejuhatus 4
1.1 Radoon ja selle allikad 4
1.2 Radoonitaseme mõõtmine pinnases ja hoonetes 10
1.2.1 Radoonitaseme mõõtmine pinnases 10
1.2.2 Ruumiõhu radoonisisalduse mõõtmine 11
2 Siseõhu radooni kontsentratsiooni arvutusmetoodika 13
3 Radooniohutu ehitamise põhimõtted 18
3.1 Radoonimembraan 21
3.1.1 Läbiviikude tihendamine 31
3.2 Alt tuulutatav põrand 34
3.2.1 Avatud alusega hoone 34
3.2.2 Maapinnast kõrgemal asuva põrandaga hoone 34
3.3 Pragude tihendamine 37
3.4 Radooni kogumissüsteem ja alarõhk pinnases 38
3.4.1 Perforeeritud torustik pinnases 38
Ringtorustik 41
Harutorustik 42
Väljatõmbetorustik 42
Läbiviigud 43
Soojustus 43
Torustiku dimensioneerimine 43
Ventilaatori valik ja paigaldamine 44
3.4.2 Radoonikogumiskaevud 45
3.5 Keldriga hoone 48
3.6 Ventilatsiooni aspektid radooniohu vähendamisel 48
3.6.1 Ruumiõhu radoonisisalduse vähendamine õhuvooluhulkade suurendamise abil 48
3.6.2 Siseruumides suure alarõhu vältimine 49
Automaatika hoiab ventilaatorite massivooluhulgad konstantsed 51
Konstantne staatiline rõhk magistraaltorustikus 52
Ventilaatorite pöörlemiskiirus on konstantne 53
3.6.3 Radooni kontsentratsiooni kontroll ruumis 54
3.6.4 Ventilatsiooniga radooniohutuse tagamine 55
Kompensatsiooniõhuga ruumid 55
Vajaduspõhise õhuvooluhulgaga ruumid 55
Radooniandurigа ventilatsioonisüsteemi juhtimine 56
Ventilatsiooniga õhurõhu erinevuse hoidmine kahe ruumi vahel 57
4 Olemasolevate hoonete spetsiifilised lahendused 58
4.1 Juurdeehitised 58
4.2 Põrandakatte aluse ventileerimine 59
4.3 Spetsiifilised lahendused vanadele keldriga hoonetele 61
5 Kirjandusviited 62
6 Kasulikku lisalugemist radooniturvalisuse tagamise kohta 63

1 Sissejuhatus

1.1 Radoon ja selle allikad

Radoon (^{222}Rn) on looduslik, keemiliselt väheaktiivne, lõhnatu ja värvitu väärisgaas, mis pärineb maakoorest ning tekib uraani ^{238}U lagunemise tulemusena ühes lagunemise vaheastmes (vt uraani lagunemisrida Tabel 1.1). Radoon on radioaktiivne ja lagunedes tütarproduktideks tekitab ioniseerivat alfakiirgust.

Radoon ei jää maapinda püsima, vaid liigub sealt nii kivimite pooride kui ka lõhede kaudu väiksema rõhu suunas välisõhku või hoonesse ja seguneb seal õhuga. Radoon on õhust ligi 7,7 korda raskem (9,96 kg/m^3) kogunedes seega reeglina hoone madalamatesse osadesse. Radooni poolestusaeg on 3,8 ööpäeva (Tabel 1.1). Poolestusaeg näitab aega, mille jooksul aine aktiivsus väheneb pooleni esialgsest. Poolestusaeg iseloomustab eeskätt radioaktiivse aine lagunemise kiirust. Märkimisväärse kiirguskoormuse annavad radooni väikese poolestusajaga tütarproduktid.

Tabel 1.1 Radoon mis tekib põhiliselt uraan 238U lagunemisreas raadiumi lagunemisel.

Element	Tähis	Isotoop	Kiirgus	Poolestusaeg
Uraan	U	238	α	$4{,}5 \cdot 10^9$ aastat
Toorium	Th	234	β + γ	24,1 päeva
Protaktiinium	Pa	234	β + γ	60 sekundit
Uraan	U	234	α + γ	245 000 aastat
Toorium	Th	230	α + γ	76 000 aastat
Raadium	Ra	226	α + γ	1600 aastat
Radoon	**Rn**	**222**	**α**	**3,8 päeva**
Poloonium	Po	218	α	3 minutit
Plii	Pb	214	β + γ	27 minutit
Vismut	Bi	214	β + γ	20 minutit
Poloonium	Po	214	α	160 mikrosekundit
Plii	Pb	210	β + γ	22 aastat
Vismut	Bi	210	β + γ	5 päeva
Poloonium	Po	210	α	138 päeva
Plii	Pb	206		Stabiilne

Radoon võib põhjustada inimestele tervisekahjustusi, sest radooni lagunemisproduktid kogunevad inimorganismi ja siirduvad organismi ainevahetusse. Peamine radoonist tulenev terviserisk inimesele on seotud hingamisteede- ja kopsuvähiga. Sissehingatava õhuga kopsu sattuvad radooni ja tema tütarproduktide aatomid (tahked tolmuosakestele kleepuvad aatomid) kiirgavad lagunemise käigus α-osakesi, mis omavad suurimat kahjustavat mõju elusrakkudele võrreldes β-osakeste või γ-kiirgusega. Siseruumi sattunud radoon koos oma radioaktiivsete tütarproduktidega võib anda enam kui poole inimese poolt saadavast looduslikust radioaktiivsest kogukiirgusest. Radooni peetakse suitsetamise kõrval olulisemaks kopsuvähi tekkimise riskiteguriks.

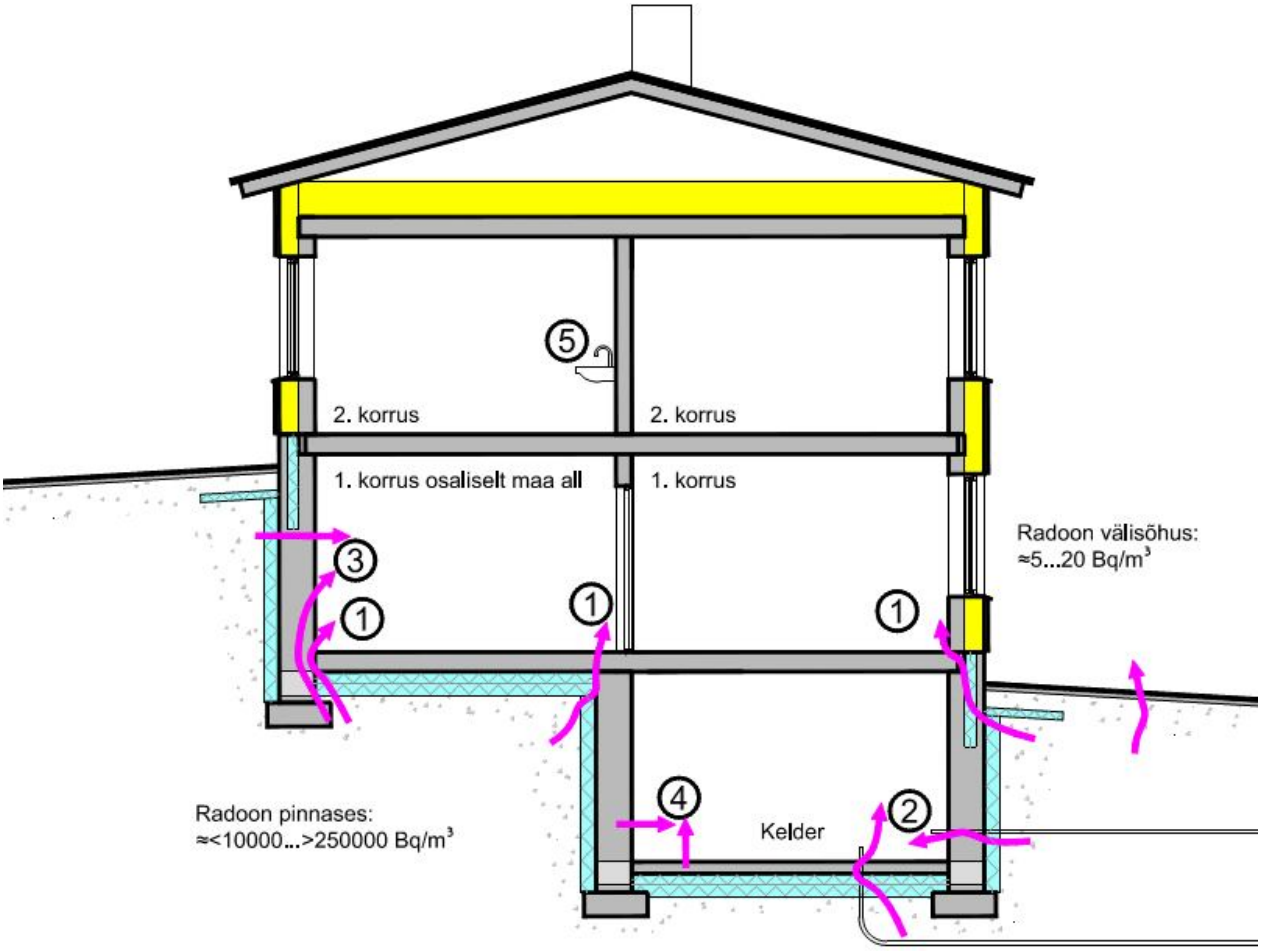
Õhu radoonisisaldust mõõdetakse radooni kiirgusintensiivsuse abil. Radioaktiivsuse mõõtühik on Bq (bekrell, prantsuse füüsiku Antoine Henri Becquereli järgi), mis tähendab ühe radioaktiivse aine aatomi lagunemist ühe sekundi jooksul. Mida rohkem lagunemisi toimub, seda enam aine kiirgab. Radioaktiivsus väljendatakse sageli aktiivsuskontsentratsioonina massi või mahu kohta. Aktiivsuskontsentratsioonil 200 Bq/m³ laguneb ühe sekundi jooksul õhu igas kuupmeetris kakssada radooniaatomit. Mõiste „aktiivsuskontsentratsioon“ kõrval kasutatakse paralleelselt ka terminit „õhu radoonisisaldus“, millede mõlema sisu on sama.

Välisõhus on radooni kontsentratsioon väike, tavaliselt vahemikus 5…20 Bq/m^3. Sõltuvalt pinnasest hoonesse siseneva radoonikogusest ja välisõhuvahetusest, võib hoones kujuneda radooni kontsentratsioon palju suuremaks. Gaasina võib radoon levida kaugele (kuni mitukümmend meetrit) enne lõplikku lagunemist.

Siseõhu radooni kontsentratsioon sõltub radooniallika intensiivsusest (difusioon ja konvektsioon maapinnast, ehitusmaterjalid, vesi) ja ruumide õhuvahetusest. Hoonesisese radooni kontsentratsiooni kriteeriumid kehtestati Eestis juba 1997. aastal (Eesti Projekteerimisnorm EPN 12.2 „Sisekliima“: *Hoonete elu-, puhke- ja tööruumides peab aasta keskmine radooni sisaldus ruumiõhus olema ≤ 200 Bq/m^3*) ja need on püsinud pikka aega sama suurena. USA-s on piirnorm 150 Bq/m^3 ja Maailma Terviseorganisatsiooni (WHO) soovitus on 100 Bq/m^3.

Ruumiõhu peamised radooniallikad on esitatud Joonis 1.1:

1) õhuleke pinnasest läbi tarindite ja tarindite liitekohtade ebatiheduste. Kriitilisimad kohad on pinnasele toetuva põranda ja välis-/vahe-/keldriseinte liited, mahukahanemispraod betoonpõrandas (Joonis 1.2 ja Joonis 1.3);
2) õhuleke pinnasest tarinditest läbiviikude (elekter, vesi, kanalisatsoon jne) kaudu (Joonis 1.4) ning tühjade õõntega (täis betoneerimata) betoonplokkmüüritis (Joonis 3.24), eri materjalikihtide (nt soojustuse ja vundamendimüüri) vahel olev vertikaaltühemik;
3) difusioon või õhuleke läbi pinnasega kokkupuutuvate tarindite ((näiteks õhku hästi juhtivast materjalist keldriseinad (näiteks keramsiitplokk, eriti kui see on laotud täitmata vertikaalvuukidega), väikese difusioonitakistusega materjalid vms));
4) ehitusmaterjalides leiduv radoon;
5) radoonirikkast pinnasest ammutatud põhjavee kasutamine.



Joonis 1.1 Tüüpilised siseruumi radooniallikad.

Joonis 1.2 Pragu müüritise ja põranda liitekohas (vasakul), vastu pinnast olev tühjade püstvuukidega laotud müüritis (paremal) või õhku läbilaskev (eriti keramsiitplokk-müüritis) müüritis võivad olla radooni siseruumi tungimise kohaks.

Joonis 1.3 Pragu betoonis (vasakul) või betoonpõrandate vahel (paremal) võib olla radooni siseruumi tungimise kohaks.

Joonis 1.4 Tihendamata küttetorustiku läbiviik esimese korruse põrandast (vasakul) või tihendamata tehnosüsteemide kontroll-luuk esimese korruse põrandas (paremal) võib olla radooni siseruumi tungimise kohaks.

Siseruumi erinevatest radooniallikatest on peamine allikas radoonirikas pinnas, kust radoon siseneb ruumi konvektsiooni või difusiooni teel. Pinnas on poorne, sisaldades ~1/3 osakeste vahelist ruumi. Pinnases olevad mineraalid suudavad pinnase pooride õhus hoida suurt radooni kontsentratsiooni. Lisaks radooni kontsentratsioonile määrab pinnase radooniohtlikkuse ka pinnase õhuläbivus. Radoon tungib aluspinnasest vahetult selle kohal olevasse hoonesse sellistes kohtades, kus hoone all (küllalt lähedal) lasub radooni sisaldav pinnase kiht (näiteks oobolusliivakivi, graptoliitargilliidi (diktüoneemaargilliit, diktüoneemakilt, graniit vms). Radooniohtlikkuse järgi liigitatakse pinnas:

- väikese radoonisisaldusega, kus on
  - radoonisisaldus < 10 000 Bq/m^3 ,
  - raadiumisisaldus < 35 Bq/kg;
- normaalse radoonisisaldusega, kus on
  - radoonisisaldus 10 000–50 000 Bq/m^3,
  - raadiumisisaldus 35–100 Bq/kg;
- suure radoonisisaldusega, kus on
  - radoonisisaldus 50 000–250 000 Bq/m^3,
  - raadiumisisaldus 100–500 Bq/kg;
- ülisuure radoonisisaldusega, kus on
  - radoonisisaldus > 250 000 Bq/m^3,
  - raadiumisisaldus > 500 Bq/kg.

Radoonisisaldus pinnaseõhus muutub sõltuvalt klimaatilistest tingimustest, sealhulgas pinnase niiskusest, õhu- ja maapinna temperatuurist ning õhurõhust. Uuringud on näidanud, et planeeritava hoone siseõhu radoonitaseme arvutamiseks/hindamiseks on vaja teada nii pinnaseõhu radoonisisaldust kui ka pinnase õhuläbivust. Nende andmete alusel on võimalik valida hoonele sobivad radoonikaitse meetmed. Saadud andmed ei ole aga piisavalt täpsed, kui ei arvestata aastaaegadest ja ilmast tulenevat kõikumist ning kui mõõtepunkte on liiga vähe. Mõõtepunktide arv peab tagama usaldusväärse tulemuse pinnase radoonisisalduse taseme ja jaotuse kohta. Ilma ja aastaaja mõju väheneb sügavamal pinnases. Optimaalne mõõtmiste teostamise sügavus on ühelt poolt tingitud vajadusest mõõtmised teostada mulla C horisondis, kus murenemisega kaasnenud elementide migratsioon on olnud minimaalne ja teisalt - mõõtmisi takistava pinnasevee tase maapinnast on optimaalsel sügavusel. Mõõtmismetoodikaga saab täpsemalt tutvuda loodava juhendist „Radooni aktiivsuskontsentratsiooni mõõtmine“.

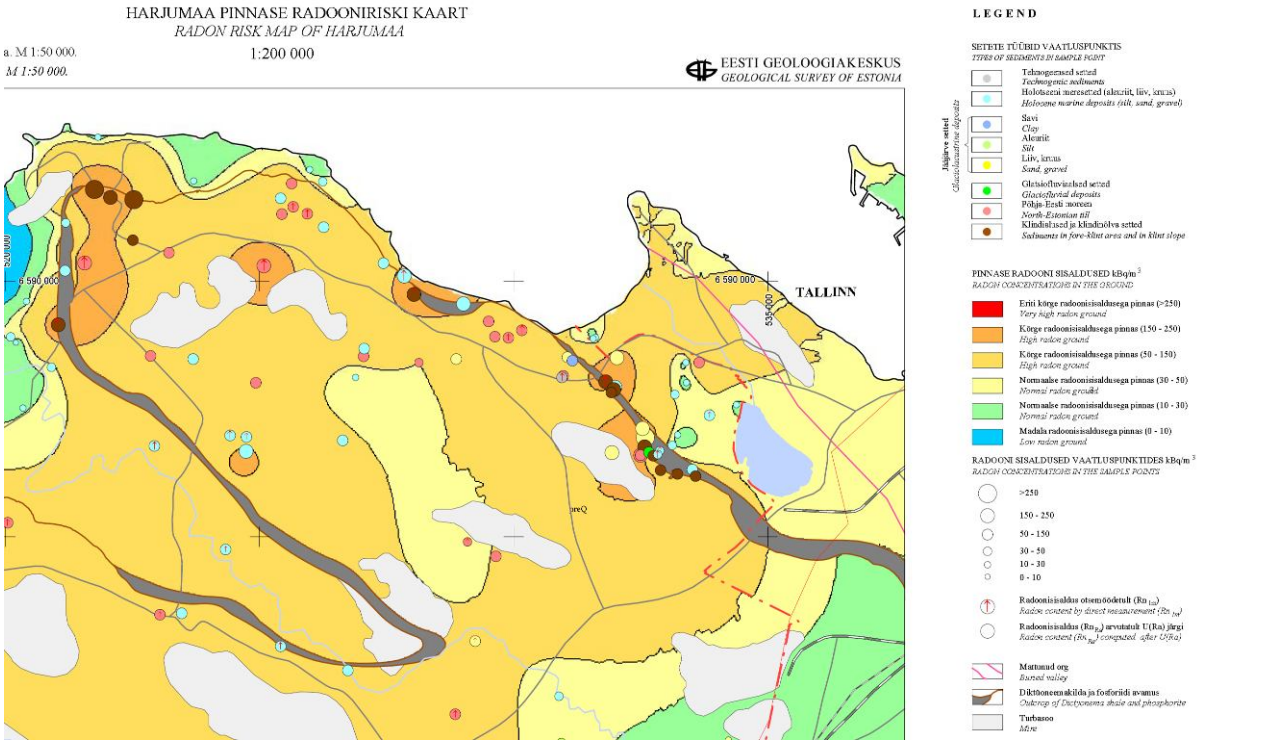
Radooniohtlikke alasid leidub peaaegu kõikjal Eestis. Radooniohtlikemad alad on Põhja-Eestis, kus uraanirikka graptoliitargilliidi peal asetseb poorne ja lõheline paekivi ning uraani lagunemise käigus tekkiv radoon saab vabalt maapinnale tõusta. Radooniohtlikud on ka piirkonnad Lääne-Virumaal ning Tartumaal, kus suure radoonisisalduse tekitajateks on jääajal Skandinaaviast siia kandunud setted.

Erinevate piirkondade kohta on koostatud pinnase radooniriski kaarte (Joonis 1.5), mis annavad üldise hinnangu võimalikust radooniriskist. Kuid radoonikaardi alusel ei saa olla kindel, et pinnases radoonisisaldus puudub, seepärast tasuks enne hoonete projekteerimist mõõta pinnase radoonitase ja/või teha muud detailsemad uuringud. Rõhutada tuleb, et radoonitaset näitava kaardi puhul on tegemist üldise, informatiivse kaardiga. Probleem võib tekkida, kui kaardi põhjal hinnatakse pinnase radoonitase normaalseks, kuid tegemist võib olla nn erandliku olukorraga, kus radoonitase on tegelikult kõrge (probleem võib tekkida ka normaalse-kõrge taseme äärealadel). Elamutele ja avalikele hoonetele, kus inimesed viibivad pikemat aega järjest (nt. lasteaiad ja koolid) tuleb pinnase mõõtmised teha alati.

Kui pinnases on kõrge radooni kontsentratsioon, võib piisata ka väikesest õhulekkest, et siseruumis tõuseb radooni aktiivsuskontsentratsioon probleemselt kõrgele. Juba mõnemillimeetrine pragu võib tekitada õhulekke. Pinnasest siseruumi imbuva radooni vältimine või selle sisalduse vähendamine on sageli radooniohutu ehitamise võtmeküsimus.

Tarbevee radioloogilised näitajad peab määrama veekäitleja või kinnistusisese kaevu (eelkõige puurkaevu) korral kinnistu omanik enne veeallika kasutuselevõttu. Radooniohtlikkusest lähtudes

tuleb piirata vee kasutusala või eemaldada veest suure radoonisisaldusega õhk. Parimate seadmetega on võimalik vähendada vee radoonisisaldust 75–95%.



Joonis 1.5 Väljavõte Türisalu-Tabasalu pinnase radooniriski kaardist (Eesti Geoloogiakeskus 2008).

Ehitusmaterjalide kiirgusohtlikkust iseloomustavad eriaktiivsuse (gamma ja raadiumi) indeksid sõltuvad materjalide kaaliumi-, raadiumi- ja tooriumisisaldusest (Bq/kg). Ehitamiseks on võimalik kasutada puhtaid ja väikese emissiooniga ehitusmaterjale. Kogemuspõhiselt ei ole Eestis toodetud ehitusmaterjalid radooniohtlikud. Erandi võib moodustada põrandaalune täitepinnas (täiteliiv), millel võib olla suhteliselt suur radoonirisk. Näiteks on vahel kasutatud täiteks nn flotoliiva, mis sisaldab oobolust ja graptoliitargilliiti jms, millel on eriti suur radoonirisk.

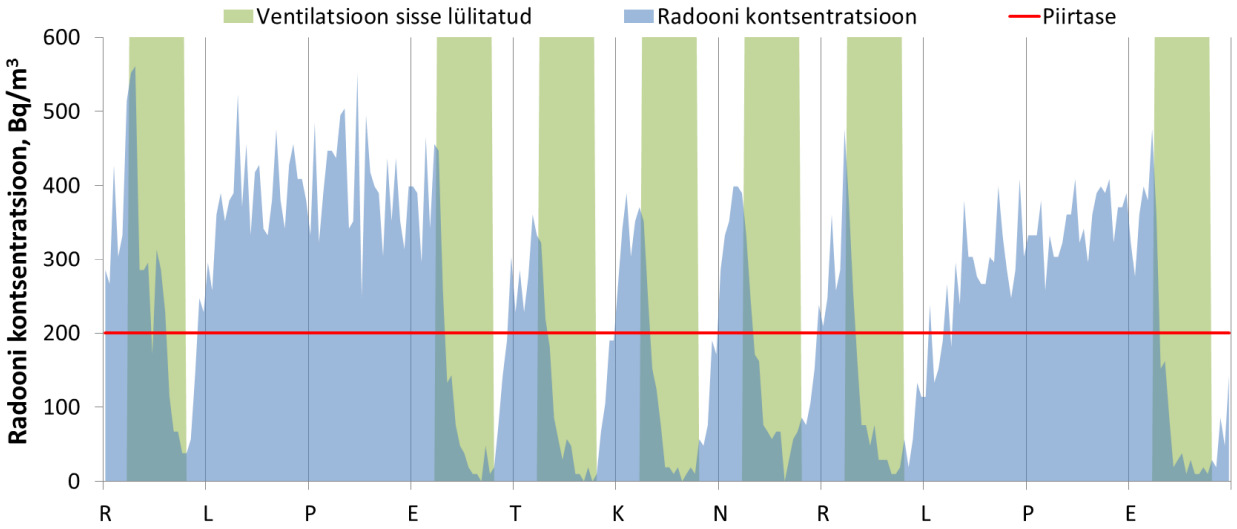
Kui on tegemist uute materjalidega, mille kohta ei ole tõendatud või kogemuspõhist teavet radooniohtlikkuse kohta, tuleb teha vastavad uuringud enne toote ehitusturule lubamist. Kui hoone siseõhuga kontaktis olevad piirdetarindid on betoonist, mis on tehtud radooni sisaldavatest komponentidest, võivad tarindid siseõhu radoonitaset tõsta keskmiselt ≈70 Bq/m^3, kui betoonist on vaid põrand, võib eeldatav radoonitaseme tõus olla ≈30 Bq/m^3 (RT 81-10791. 2003, 2). Suurema baastaseme tõttu võib betoonhoone vajada puithoonest efektiivsemaid radooniohutuse meetmeid.

Eelloetletutest radooniallikatest on õhulekete kaudu pinnasest siseruumi tungival radoonil suurim mõju. Õhu liikumise eelduseks läbi piirdetarindite, ebatiheduste, liitekohtade või läbiviikude on õhurõhkude erinevus siseruumi ja pinnase vahel. Õhurõhkude erinevust siseruumi ja pinnase vahel võib põhjustada ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevus, õhutiheduste erinevus ja tuul. Kui tuule ja temperatuuride erinevusest sõltuv õhutiheduste erinevus on nn inimfaktorist sõltumatu potentsiaal, siis ventilatsiooni toimimises on projekteerijal, ehitajal ja hoone kasutajal selge mõju. Seetõttu on ventilatsioonist tingitud õhurõhkude erinevus olulisim inimtegevuse mõjur, mis võib avaldada mõju radooni tungimisele pinnasest siseruumi.

Ventilatsioonist põhjustatud õhurõhu erinevuse suuruse väljaselgitamiseks tuleb uurida, kuidas toimib ventilatsioon: mis suunas liigub õhk, kus paiknevad väljatõmbeventiilid ja kus sissepuhke-ventiilid või välisõhu sissevõtuklapp, milline on ventilatsiooni töörežiim. Kaardistada tuleb ka, milline on õhurõhu erinevus üle hoonepiirete (eriti pinnase suhtes) erinevate ventilatsioonisüsteemi(de) töökiiruse korral. Kuna ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevus

põhjustab õhurõhu erinevuse üle piirdetarindi (välistarind või ruumidevaheline), võib see oluliselt mõjutada radooni kontsentratsiooni dünaamikat.

Joonis 1.6 on esitatud uue koolihoone esimese korruse klassiruumi radooni kontsentratsioon (sinine joon) 1,5-nädalase perioodi jooksul ning ventilatsiooni töörežiim. Ventilatsioonisüsteem suudab radoonitaset hoida piirtasemest allpool, aga kui ventilatsioon on välja lülitatud, tõuseb radoonitase lubamatult kõrgele. Seetõttu jääb radoonitase üle piirtaseme ka ruumide kasutusaja jooksul.

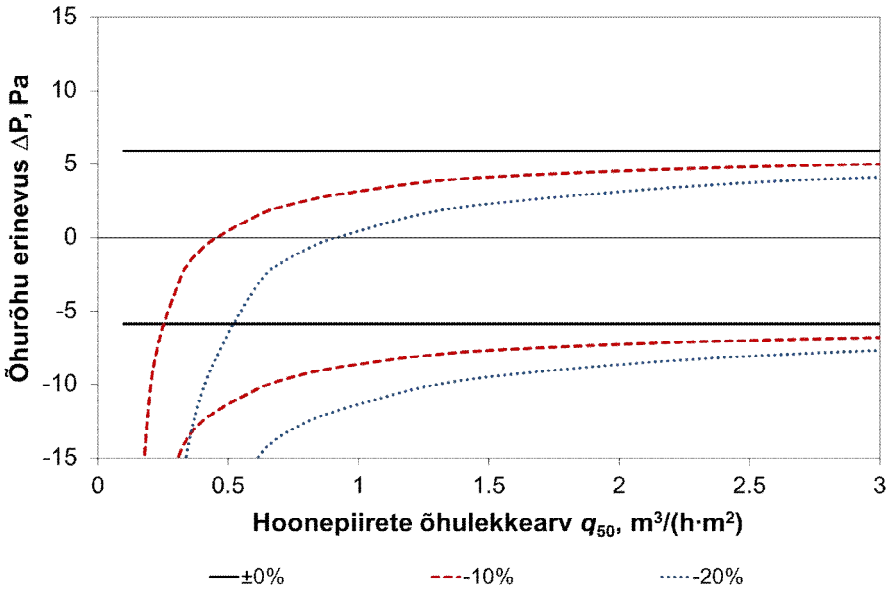


Joonis 1.6 Kooli klassiruumi õhu radoonisisalduse sõltuvus ventilatsiooni töörežiimist päevade kaupa.

Ventilatsiooni projekteerimisel tuleb tähelepanu pöörata ka ventilatsiooni õhuvooluhulkadest põhjustatud õhurõhu erinevustele. Kui ventilatsiooni õhuvooluhulgad muutuvad (vajaduspõhine ventilatsioon, ventilatsiooni töörežiim, ventilatsiooni seadeklappide erinev liikumiskiirus või mõnel muul põhjusel), mõjutab see oluliselt piirdetarindite toimimist.

Suuremates hoonetes võib olla mitu ventilatsioonisüsteemi, mis töötavad erinevatel aegadel erinevate töögraafikute järgi. On probleemne, kui ventilatsioonisüsteemide õhuvooluhulgad ei ole tasakaalus. Näiteks võidakse suurema saasteklassi õhk (näiteks avalikud WC-d ja suitsetamisruumid) juhtida välja eraldi süsteemidega ning kompensatsiooniks kasutada teisi (sissepuhke)süsteeme. Selline olukord nõuab riskianalüüsi: milline on erinevate ventilatsioonisüsteemide koos- ja lahustöötamise mõju sisekliimale ja millised võivad olla õhurõhkude erinevused erinevate ruumide ja ruumide/väliskeskkonna vahel. Eriti tähtis on see õhutihedate hoonepiirete ja suurte õhuvooluhulkade korral. Erinevalt vanemast ehitus- ja projekteerimistraditsioonist, mille tulemuseks olid suure õhulekkega hooned, on nüüdisaegsetel kvaliteetselt ehitatud väikese õhulekkega hoonetel ventilatsiooni õhuvooluhulkade mõju suurem.

Joonis 1.7 on esitatud ventilatsiooni väljatõmbe ja sissepuhke õhuvooluhulkade erinevuse mõju kahekorruselise hoone põranda ja lae tasapinnal esinevatele sise- ja välisõhurõhkude erinevusele talvel sõltuvalt hoonepiirete õhulekkest. Kui ventilatsiooni õhuvooluhulgad ei projekteeritud või seadistatud tasakaalu, võib see põhjustada korralikult ehitatud hoones suuri õhurõhu erinevusi, mis omakorda põhjustab radoonileket pinnasest siseruumidesse.



Joonis 1.7 Ventilatsiooni väljatõmbe ja sissepuhke õhuvooluhulkade erinevuse mõju kahekorruselise hoone põranda (alumised graafikud) ja lae (ülemised graafikud) tasapinnal esinevatele sise- ja välisõhurõhkude erinevusele talvel sõltuvalt hoonepiirete õhulekkest.

1.2 Radoonitaseme mõõtmine pinnases ja hoonetes

1.2.1 Radoonitaseme mõõtmine pinnases

Radooniohtlikuks hinnatakse sellised looduslikud pinnased, kus radoonisisaldus maapinnast 1 m sügavusel pinnaseõhus võib ületada 50 000–60 000 Bq/m^3 (Clavensjö & Åkerblom 1994). Pinnase radooniohtlikkuse piir sõltub ka siseõhu lubatud radoonitasemest. Kui ruumide siseõhu radoonisisalduse lubatud ülempiir on 150 Bq/m^3, muutuksid radooniohtlikuks pinnased, mille pooriõhus ületab radoonisisaldus 40 000–45 000 Bq/m^3. Info pinnaseõhu radoonisisalduse kohta aitab paremini välja töötada radooniohutuid ehitusvõimalusi ning vältida liigselt keerukaid ning kalleid ehituslahendusi.

Pinnase radoonitaset mõõdetakse erinevate seadmetega.

- Gamma-spektromeetriga mõõdetakse kompleksuuringupunktides soovitavalt 80 cm sügavuses kaevandis *e*U- (g/t), *e*Th- (Th-232) (g/t) ja *e*K- (K-40) sisaldus (%) ning radiomeetriga pinnase gammakiirguse intensiivsus (μR/h).
- Emanomeetriga mõõdetakse radoonisisaldust otse pinnaseõhust (Bq/m^3) kompleksuuringupunktides kaevandite läheduses ja kiiruuringupunktides territooriumil erinevates kohtades. Radoonitaset mõõdetakse kuni 60–80 cm sügavusel pinnaseõhus ja arvutatakse standardsele sügavusele 1 m (Joonis 1.8).
- Radiomeetriga kontrollitakse pinnase gammakiirguse taset kaevandite ümbruses ja nende põhjas.

Mõõtmise ajal ei tohi olla pinnas veega küllastunud, samuti võib mõõtmisi takistada või mõõtetulemusi märgatavalt mõjutada külmunud pinnas. Mõõtmistulemuste põhjal määratakse kindlaks radoonikaitse vajadus ja ulatus.

Tuleb arvestada, et otsemõõtmisel võib liivastes-kruusastes pinnastes radoonisisalduse vähenemine olla kuni 50–90% (Clavensjö & Åkerblom 1994). Kuna ehitised moodustavad maapinnale ekraani, mis muudab aeratsioonitingimused kuni nullilähedaseks, kasutatakse maaüksuse radooniriski hindamisel *e*U-sisalduse järgi arvutatud radoonisisaldusi, kui need osutuvad suuremaks otsemõõdetud tulemustest.

Mõõtmismetoodikaga ja sellest, mida mõõtmisaruanne peab sisaldama saab täpsemalt tutvuda loodava juhendist „Radooni aktiivsus-kontsentratsiooni mõõtmine“.

Joonis 1.8 Pinnase radoonitaseme mõõtmine: emanomeetriga radoonisisalduse mõõtmine pinnaseõhus (vasakul), mõõteseadmed ja kaevand (paremal) (fotod: Krista Täht-Kok, Eesti Geoloogiakeskus OÜ).

1.2.2 Ruumiõhu radoonisisalduse mõõtmine

Radooniohutus tuleb tagada eelkõige hoonetes, kus inimesed elavad, töötavad või viibivad muul põhjusel pikemat aega. See määrab ka mõõtmise asukohavaliku hoones.

Soovitatav on teha mõõtmised mitmes kohas. Mõõta tuleks eelkõige keldrikorrusel ja esimesel korrusel (need on otseses kontaktis pinnase kui suurima võimaliku radooniallikaga), kuid kõrget radoonitaset on avastatud ka teisel korrusel (põhjustatuna eelkõige õhu ringlusest korruste vahel). Mitme mõõtmispunkti kasutamine võimaldab saada paremat ülevaadet radooniriskidest ja hinnata tulemust ruumide kasutusaktiivsusest lähtuvalt.

Joonis 1.9 on toodud mõned ruumiõhus radooni keskmise kontsentratsiooni mõõtmisvahendid. Alfaosakestele tundlikud plastindikaatoritega detektorid ja lihtsamad radoonimonitorid sobivad eelkõige pikema ajaperioodi jooksul radoonitaseme mõõtmiseks või jälgimiseks kodustes tingimustes.

Joonis 1.9 Plastindikaatoriga detektor (vasakul), radoonimonitorid (keskel Canary, Ramon 2.2) ja radooniloger Radonelektronik R3 (paremal).

Passiivmõõtmistel kasutatakse plastindikaatoriga detektoreid, mida hoitakse lühema või pikema aja jooksul mõõdetaval objektil. Radooni lagunemisel tekkinud alfaosakesed neelduvad detektoris, jättes materjalisse jälje, mille saab elektrokeemilise või keemilise töötlemisega mikroskoobis nähtavaks teha. Radooni kontsentratsiooni ja tekkinud jälgede tiheduse vahel on lineaarne seos.

Digitaalse radoonimonitori mõõdistus põhineb sellel, et gaas difundeerub detektorisse, kus radooni aatomite lagunedes tekkiv alfakiirgus tuvastatakse ränist fotodioodiga (iga alfaosake genereerib väikese voolu; maksimaalne pinge tuvastatakse ja loetakse; pinge amplituud on proportsionaalne alfakiirgusega ränist fotodioodile).

Ruumiõhu radoonitase võib kõikuda tundide, päevade ja hooaegade lõikes. Kindlamate mõõtetulemuste saavutamiseks peaks mõõteperiood olema mitu nädalat (radoonimonitorid), võimalusel 2–3 kuud (plastindikaatoriga detektorid). Radoonitaset tuleks mõõta hoonetes kütteperioodil (ajavahemikul oktoobrist maini). Selleks on mitu põhjust: esiteks põhjustab külmunud pinnas ja lumikate radooni kogunemist pinnase ülemistes kihtides ning hoonete alt eraldub rohkem radooni kui suveperioodil. Teiseks väheneb otsene välisõhutus, mis on tingitud madalatest välistemperatuuridest. Suveperioodil on aknatuulutuse kasutamine nii intensiivne, et see ei pruugi anda õiget hinnangut radooniriski kohta. Kolmandaks on talvel põranda tasapinnas suurem alarõhk.

Mõõteseadmed paigaldatakse elamus eelkõige elu- ja magamistubadesse, madalaimale kasutatavale korrusele ja mitte kõrgemale kui teine korrus. Enne mõõtmist tuleb selgitada välja, kuidas toimib ventilatsioon: mis suunas liigub õhk, kus paiknevad väljatõmbeventiilid ja kus sissepuhkeventiilid või välisõhu sissevõtuklapp, milline on ventilatsiooni töörežiim. Kaardistada tuleb ka, milline on õhurõhu erinevus üle hoonepiirete (eriti pinnase suhtes) erinevate ventilatsioonisüsteemi(de) töökiiruse korral. Kuna ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevus põhjustab õhurõhu erinevuse üle piirdetarindi (välistarind või ruumidevaheline), võib see oluliselt mõjutada radooni kontsentratsiooni dünaamikat.

Radoonisisalduse mõõtmine on detailsemalt käsitletud vastavates mõõtestandardites:

- ISO 11665-1:2012. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 1: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 1: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods;
- ISO 11665-2:2012. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 2: Integrated measurement method for determining average potential alpha energy concentration of its short-lived decay products. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 2: Integrated measurement method for determining average potential alpha energy concentration of its short-lived decay products;
- ISO 11665-3:2012. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 3: Spot measurement method of the potential alpha energy concentration of its short-lived decay products. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 3: Spot measurement method of the potential alpha energy concentration of its short-lived decay products;
- EVS-ISO 11665-4:2014. Radioaktiivsuse mõõtmine keskkonnas. Õhk: radoon-222. Osa 4: Integreeritud mõõtemeetod keskmise aktiivsuskontsentratsiooni määramiseks passiivse proovivõtu ja hilisema analüüsi kasutamisega. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis;
- EVS-ISO 11665-5:2014. Radioaktiivsuse mõõtmine keskkonnas. Õhk: radoon-222. Osa 5: Aktiivsuskontsentratsiooni pidevmõõtmise meetod. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 5: Continuous measurement method of the activity concentration (ISO 11665-5:2012);
- EVS-ISO 11665-6:2014. Radioaktiivsuse mõõtmine keskkonnas. Õhk: radoon-222. Osa 6: Aktiivsuskontsentratsiooni kohtmõõtmise meetod. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 6: Spot measurement method of the activity concentration (ISO 11665-6:2012).
- EVS-ISO 11665-8:2014. Radioaktiivsuse mõõtmine keskkonnas. Õhk: radoon-222. Osa 8: Esialgsete ja täiendavate uuringute metoodikad hoonetes. Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings.

2 Siseõhu radooni kontsentratsiooni arvutusmetoodika

Radooniohutuse tagamiseks on vaja juba meetmete väljatöötamise ajal kontrollida nende töökindlust. Meetmete valimisel tuleb välja selgitada, kui palju radooni läbi piirdetarindite ruumi imbub (difusioon + konvektsioon), st. kui intensiivne on radooni sisenemine ruumi. Koos ventilatsiooni intensiivsusega sõltub sellest radooni kontsentratsioon ruumis. Ruumi radooni kontsentratsiooni arvutamiseks tuleb välja kirjutada kõikide radooniallikate tasakaaluvõrrand:

$$(C_i - C_e)\cdot\sum\left(\dot{V}_{vent(supp l+exh)} + \dot{V}_{exf}\right) = \overbrace{\sum W_{be}\cdot A_{be}(C_e - C_i)}^{\text{Difusioon õhust läbi piirdetarindite}} + \overbrace{\sum W_g\cdot A_g\cdot(C_g - C_i)}^{\text{Difusioon pinnasest läbi piirdetarindite}} + \overbrace{\sum \nu\cdot A_m\cdot(C_m - C_i)}^{\text{Difusioon ehitusmaterjalidest}} +$$

$$+\overbrace{\sum C_f\cdot\Delta P_{a,f}{}^n\cdot\frac{\dot{m}_{inf.vent}}{\rho_{a.g}}\cdot C_g}^{\text{Konvektsioon pinnasest põhjustatuna ventilatsioonist tingitud õhurõhuerinevuses}} + \overbrace{\sum C_f\cdot\Delta P_{a,f}{}^n\cdot\frac{\dot{m}_{inf.grav}}{\rho_{a.g}}\cdot C_g}^{\text{Konvektsioon pinnasest põhjustatuna õhu tiheduste erinevusest tingitud õhurõhuerinevusest}} + \overbrace{\sum C_{be}\cdot\Delta P_{a,be}{}^n\cdot\frac{\dot{m}_{inf.vent}}{\rho_{a.e}}\cdot C_e}^{\text{Konvektsioon välisõhust põhjustatuna ventilatsioonist tingitud õhurõhuerinevuses}} + \overbrace{\sum C_{be}\cdot\Delta P_{a,be}{}^n\cdot\frac{\dot{m}_{inf.grav}}{\rho_{a.e}}\cdot C_e}^{\text{Konvektsioon välisõhust põhjustatuna õhu tiheduste erinevusest tingitud õhurõhuerinevuses}}$$

(2.1)

Kus:

C_i radooni kontsentratsioon siseõhus, Bq/m^3;

C_e radooni kontsentratsioon välisõhus, Bq/m^3 (Välisõhu radooni kontsentratsioon on üldjuhul väike. Siiski võib teisel pool (pinnasega mitte kontaktis olevaid) välispiirdeid olla ka kõrge õhu radoonisisaldus: näiteks kui on tegemist puuduliku õhuvahetusega alt tuulutatava põrandaga või hoone piirneb pinnases oleva teeninduskanaliga (KUMU näide);

C_m radoonisisaldus ehitusmaterjalides, Bq/m^3;

C_g radoonisisaldus pinnases, Bq/m^3;

W_{be} välisõhuga kontaktis olevate piirdetarindite radoonijuhtivus (difusioon), m/s;

W_g pinnasega kontaktis olevate piirdetarindite radoonijuhtivus (difusioon), m/s;

ν radooni emissioon ehitusmaterjalidest, m/s;

A_{be} hoone välispiirete pindala, m^2;

A_m radooni sisaldavate tarindite pindala, m^2;

A_g hoone pinnaega kontaktis oleva põrada pindala, m^2;

C_f põranda või mõne muu pinnasega kontaktis oleva tarindi õhulekkevoolu kordaja, m^3/(m^2·s·Pa)^n (iseloomustab õhulekke suurust läbi tarindi);

C_{be} välisõhuga kontaktis oleva tarindi õhulekkevoolu kordaja, m^3/(m^2·s·Pa)^n (iseloomustab õhulekke suurust läbi tarindi);

n lekkevoolu eksponent (vahemikus 0,5–1 sõltuvalt, kas lekkeõhuvool on turbulentne või laminaarne);

ρ_a õhu tihedus, $\rho_{a.e} = \frac{p\cdot M}{R\cdot T_e}$, kus p: õhurõhk: 101325 Pa; M: molaarmass: 29 kg/kmol, R: ideaalgaasi konstant 8315 J/(kmol·K), T: temperatuur, K;

$\Delta P_{a.f}{}^n$ välis- ja sisekeskkonna õhurõhu erinevus hoone põranda tasapinnal, Pa^n;

$\Delta P_{a.be}{}^n$ välis- ja sisekeskkonna õhurõhu erinevus tasapinnal, kus arvutatakse õhuvoolu, Pa^n;

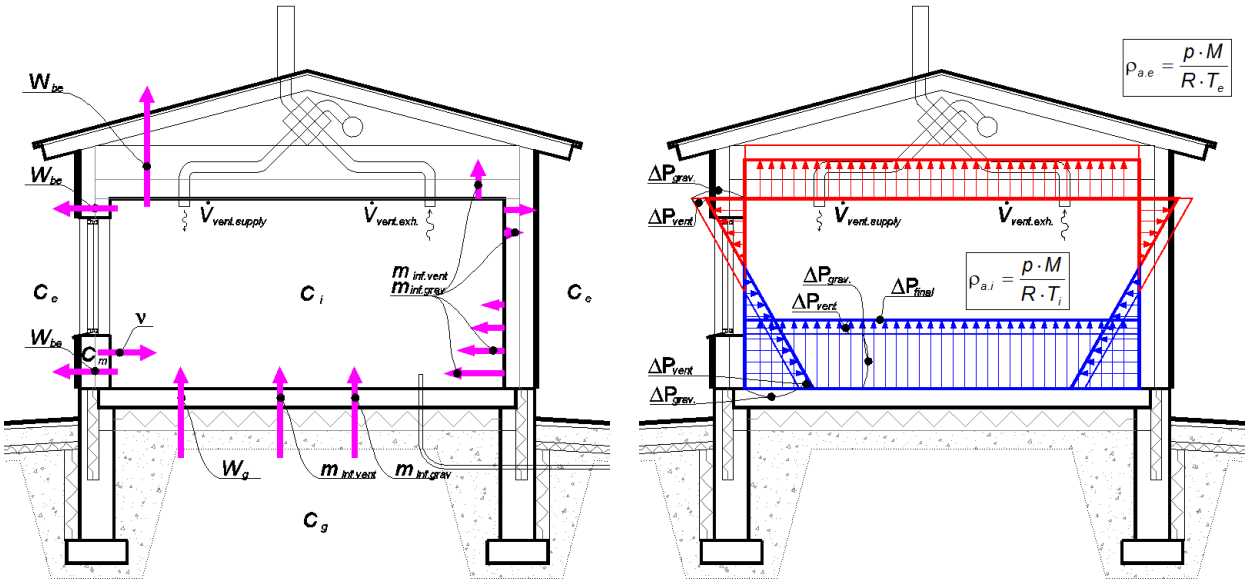
$\dot{m}_{inf,grav}$ läbi piirdetarindite ruumi sisenev lekkeõhuvooluhulk, mis liigub õhutihedustest põhjustatud õhurõhkude erinevuse mõjul, m^3/s;

$\dot{m}_{inf.vent}$ läbi piirdetarindite ruumi sisenev lekkeõhuvooluhulk, mis liigub ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevusest põhjustatud õhurõhkude erinevuse mõjul, m^3/s;

$\dot{V}_{vent}$ ventilatsiooni õhuvooluhulk, m^3/s;

$\dot{V}_{exf}$ eksfiltratsiooni õhuvooluhulk, m^3/s.

Valemist (2.1) on jäetud välja tarbeveega ruumi sisenev radoonihulk ja tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevus. Kui need on määrava tähtsusega, tuleb ka need arvutustes kindlasti arvesse võtta.



Joonis 2.1 Valemit (2.1) selgitavad joonised: vasakul radoonivoo komponenid; paremal: konvektsiooni põhjustava õhurõhkude kujunemine õhu tiheduste erinevusest ja ventilatsiooni õhuvooluhulkade erinevusest.

Kui tegemist on radooni mittesisaldavate ehitusmaterjalidega (ν = 0 m/s) ja tarindite aurutõke takistab lisaks veeauru radooni difusioonile ka radooni difusiooni ($W_g \approx$ 0; $W_{be} \approx$ 0), jääb määravaks radooni liikumine konvektsiooni teel ja ruumiõhu radoonisisalduse arvutamiseks saab kasutada valemit:

$$C_i = \frac{\dot{V}_{vent.supl} \cdot C_e + \sum C_f \cdot \Delta P_{a,f}{}^n \cdot \frac{\dot{m}_{inf.vent}}{\rho_{a.g}} \cdot C_g + \sum C_f \cdot \Delta P_{a,f}{}^n \cdot \frac{\dot{m}_{inf.grav}}{\rho_{a.g}} \cdot C_g + \sum C_{be} \cdot \Delta P_{a,be}{}^n \cdot \frac{\dot{m}_{inf.vent}}{\rho_{a.e}} \cdot C_e + \sum C_{be} \cdot \Delta P_{a,be}{}^n \cdot \frac{\dot{m}_{inf.grav}}{\rho_{a.e}} \cdot C_e}{\sum \left(\dot{V}_{vent.exh} + \dot{V}_{exf} \right)} \tag{2.2}$$

Sõltumata sellest, kas tegemist on uusehitisega või olemasoleva hoonega (renoveerimise eelne olukord või renoveerimislahenduse analüüs), saab radooni tasakaaluvõrrandi lahendamisega leida radooniohutu lahenduse. Arvutuste tegemisel on vaja valida kriitilised kliimatingimused (temperatuur, tuul, pinnase omadused), tehnosüsteemide toimimine (eelkõige ventilatsiooni sissepuhke ja väljatõmbe õhuvooluhulkade suurus ja nende erinevus, ventilatsiooni töörežiim jne) ning tarindite ehituslik teostus (eelkõige õhulekete omadused).

Sise- ja välisõhu tiheduste erinevusest tingitud õhurõhkude erinevus on võimalik arvutada valemiga:

$$\Delta p_\rho = \rho_e \cdot h \cdot g - \rho_i \cdot h \cdot g = (\rho_e - \rho_i) \cdot h \cdot g \Rightarrow \rho_i \cdot \frac{T_i - T_e}{T_e} \cdot g \cdot h \tag{2.3}$$

kus

ΔP_a	õhutiheduste erinevusest tingitud rõhu vahe välisõhus maapinnal ja ruumis põrandapinnal, Pa;
ρ_e	välisõhu tihedus, kg/m^3;
ρ_i	ruumiõhu tihedus, kg/m^3;
h	neutraaltelje ja analüüsitava koha kõrguste vahe, m;
g	raskuskiirendus Maal, 9,81 m/s^2;

T_e välisõhu absoluutne temperatuur, K;
T_i ruumiõhu absoluutne temperatuur, K.

Ventilatsioonisüsteem, mille õhuvooluhulgad pole tasakaalus, tekitab ruumides ala- või ülerõhku ning läbi hoonepiirete teatud õhulekke tekitamiseks vajalikku rõhku saab arvutada õhulekkegraafiku (valem 2.4) abil, teades hoonepiirete õhulekkearvu ja iseloomu:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^n \tag{2.4}$$

kus
ΔP rõhkude vahe üle piirdetarindi, Pa;
$\dot{V}$ lekkeõhuvoolhulk, m^3/h;
n lekkevoolu eksponent (vahemikus 0,5–1 sõltuvalt, kas lekkeõhuvool on turbulentne või laminaarne);
C tarindi õhulekkevoolu kordaja (saadakse õhulekketesti abil või arvutatakse hoonepiirete õhulekkearvust), $m^3/(h \cdot Pa)$.

Tuulest tingitud õhurõhkude erinevus on võimalik arvutada valemiga:

$$\Delta P_w = \frac{\rho_e \cdot v^2}{2} \cdot \mu \tag{2.5}$$

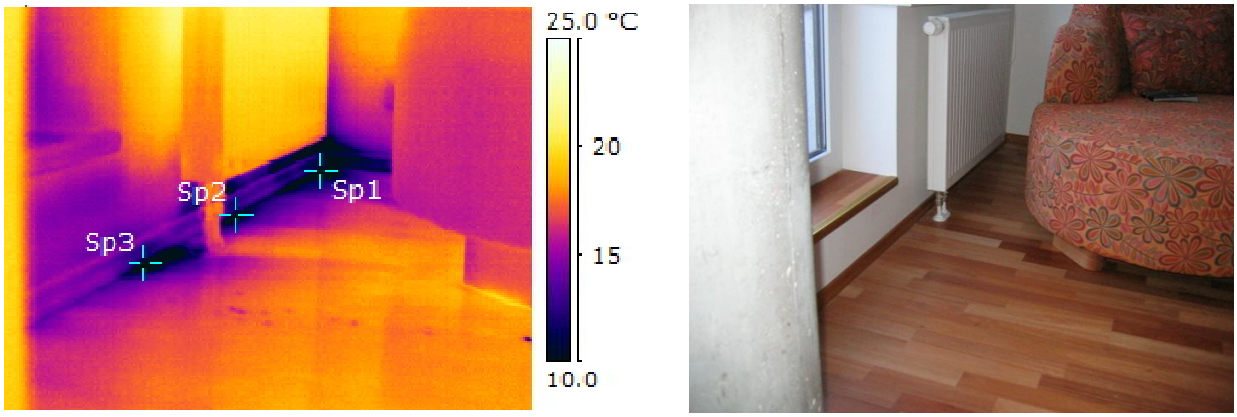
kus

ΔP_w tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevus, Pa;
ρ_e välisõhu tihedus, kg/m^3;
v tuule kiirus, m/s;
μ tuule rõhutegur.

Järgnevalt on toodud ühekorruselise eramu radoonibilansi arvutuse abil siseruumide radooni kontsentratsiooni arvutus. Kui hoones on üks ventilatsioonisüsteem ja vaheuksed on oma tavaolukorras avatud, võib eeldada ruumidevahelist õhu segunemist ja kõiki siseruume käsitleda ühe ruumina (massitasakaalus on siseruum üks sõlmpunkt). Eramu on 10 × 15 = 150 m^2, korruse kõrgus 3 meetrit.

Radoonitaseme mõõtmisel talvel (t_e = –5°C) saadi siseruumide keskmiseks radoonisisalduseks 839 Bq/m^3. See ületab mitmekordselt lubatud piirtaset ja on vaja leida lahendus radoonitaseme alandamiseks. Enne lahenduse väljatöötamist on vaja tuvastada ka kõrge radoonitaseme põhjus. Selleks on vaja viiakse läbi rida mõõtmisi:

- Hoonepiirete õhulekkearv mõõdetakse vastavalt standardile EVS-EN 13829 *Hoonete soojuslik toimivus. Hoonepiirete õhupidavuse määramine*. *Ventilaatoriga survestamise meetod.* Mõõtmistulemuseks saadi q_{50} = 6 $m^3/(h \cdot m^2)$.
- Õhulekke asukohad ja nende suurus kaardistatakse, kasutades infrapuna termokaamerat vastavalt standardile: *EVS-EN 13187 Thermal performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method* (Joonis 2.2). Võib kasutada ka märkesuitsuandureid (Joonis 2.3), anemomeetrit vms.
  Mõõtmistel selgus, et 25% õhuleketest on pinnasega kontaktis olevast põrandast, kust võib radoon siseruumi imbuda.
- Ruumi õhuvahetus mõõdetakse mehaanilise ventilatsiooni korral õhuvooluhulkade mõõtmise abil; loomuliku ventilatsiooni korral märkegaasi abil. Õhuvahetuskordsus oli 0,2 h^{-1}.
- Ventilatsioonist tingitud õhurõhu erinevuse suuruse väljaselgitamiseks tuleb uurida, kuidas toimib ventilatsioon: mis suunas liigub õhk, kus paiknevad väljatõmbeventiilid ja kus sissepuhkeventiilid või välisõhu sissevõtuklapp, milline on ventilatsiooni töörežiim. Kaardistada tuleb ka, milline on õhurõhu erinevus üle hoonepiirete (eriti pinnase suhtes) erinevate ventilatsioonisüsteemi(de) töökiiruse korral. Õhutihedustest ja tuulest põhjustatud õhurõhkude erinevuse arvessevõtmiseks mõõdetakse ka need kliimaparameetrid.



Joonis 2.2 Infrapuna termokaamera abil õhulekkekohtade leidmine eeldab mõõtmist ilma õhurõhu erinevuseta ja koos alarõhuga ruumis.

Joonis 2.3 Õhulekkekohti on võimalik leida ka visuaalselt või märkesuitsu abil.

Hoonete renoveerimise eesmärgiks on tagada radoonitase alla 200 Bq/m^3 ja seda arvutusliku välisõhu temperatuuril, mis selles hoone asukoha puhul oli –22 °C.

Järgnevalt analüüsitakse kahte meedet eraldi ja nende kombinatsiooni radooni kontsentratsiooni alandamiseks hoones.

- Põranda konstruktsiooni ja liitekohtade tihendamine, mille tulemusena väheneks õhuleke pinnasest läbi põranda viis korda.
- Soojustagastusega sissepuhkeventilatsiooni paigaldamine, mille tulemusel on õhuvahetuse kordsus eramus 0,6 h^{-1}.

Renoveerimismeetmete mõju analüüsiks lahendatakse radooni massivoolu tasakaal (valem 2.2). Peamised lähteandmed ja tulemused on toodud ka Tabel 2.1.

Arvutustest selgub, et kumbki meede eraldi rakendatuna ei taga ohutut radoonitaset alla piirmäära 200 Bq/m^3. Põranda konstruktsiooni tihendamine koos õhuvahetuse tõhustamise sissepuhke-väljatõmbeventilatsiooniga (millel on võrdsed õhuvooluhulgad) tagab arvutusliku radoonitaseme 161 Bq/m^3, mis on alla piirmäära ja lubab eeldada, et mõlema meetme kasutamine tagab radooniohutuse. Tabel 2.1 toodud tulemustest on näha, et ainult põranda õhutiheduse suurendamine suurendab alarõhku põranda pinnal, mis võib suurendada radooni infiltratsiooni üksikutest kohtadest pinnasest siseruumi (summaarne radoonivool pinnasest siseruumi väheneb, kuna lekkekohti tihendatakse). Samuti on näha, kuidas välisõhu temperatuuri alanemine suurendab alarõhku põrandapinnal ja seeläbi radooni sisaldavat õhuleket pinnasest, kuna õhutiheduste erinevusest põhjustatud rõhuerinevus suureneb.

Tabel 2.1 Radooniohutuse tagamise meetmete arvutuste lähteandmed ja tulemused.

	Algne olu-kord	Arvutuslik välis-temperatuur	Ainult tihenda-mine	Ainult ventilat-sioon	Tihendamine ja ventilat-sioon
Hoonepiirete õhulekkearv q_{50}, m^3/(h·m^2)	6	6	4,8	6	4,8
Alarõhk põranda pinnal ΔP, Pa	1,8	1,8	4,0	3,1	4,0
Välisõhu temperatuur t_e, °C	–5	–22	–22	–22	–22
Ventilatsiooni õhuvooluhulk $\dot{V}_{vent}$, l/s	25	25	25	75	75
Õhuleke ruumi välisõhust $\dot{V}_{inf.e}$, l/s	12	17	24	17	24
Õhuleke ruumi pinnasest $\dot{V}_{inf.soil}$, l/s	17	25	6	25	6
Radooni sisenemine hoonesse läbi põranda, Bq/(h·m^2)	155000	220600	52600	220600	52600
Radooni kontsentratsioon ruumis C_i, Bq/m^3	839	987	292	589	161

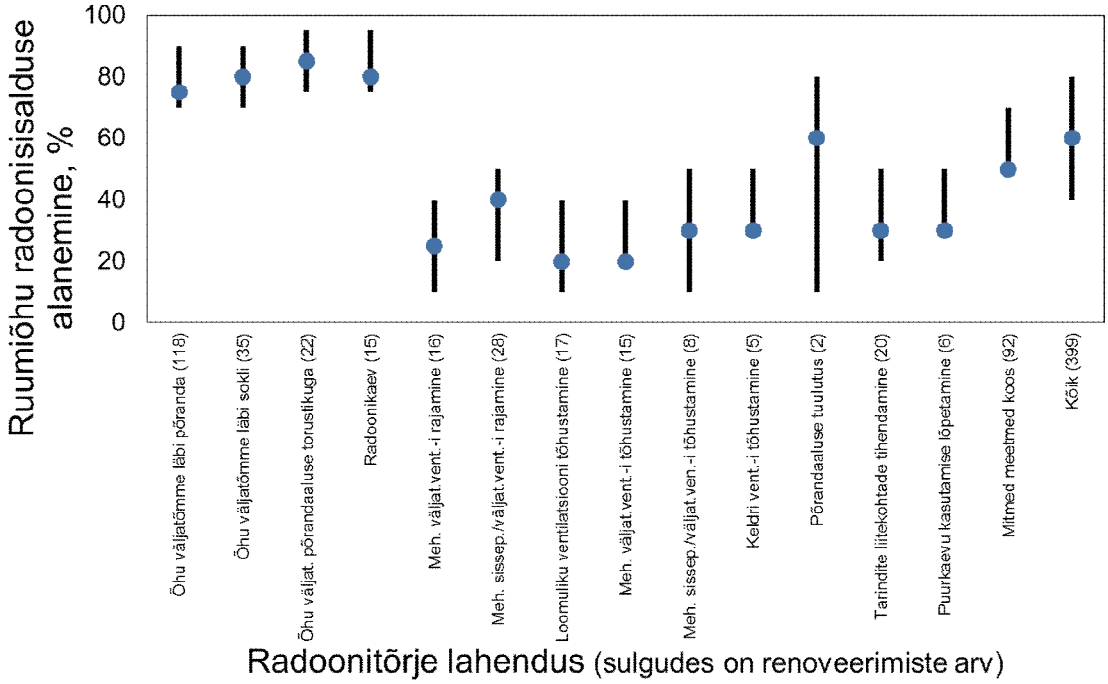
3 Radooniohutu ehitamise põhimõtted

Nagu kõikide probleemidega on ka radooniohu vastu võitlemisel efektiivseim viis vältida radooni hoonesse sattumist, selle asemel et vähendada radoonisisaldust siseruumis (võidelda tagajärjega). Võrreldes hoone renoveerimisel saadava tulemusega on radooni hoonesse sattumist lihtsam vältida uusehitises, kuna juba projekteerimise alguses on võimalik valida töökindlamad lahendused. Hoonete renoveerimisel tuleb tihti tegeleda nii radooni hoonesse sisenemise vähendamisega kui ka ruumiõhu radoonisisalduse vähendamisega.

Ruumide ventileerimine on alati radooniohutu ehitamise eelduseks. Radoonitõrje meetmed võib käitlemisenergia alusel jagada põhimõtteliselt kahte rühma: aktiiv- ja passiivvõtted.

- Passiivmeetmete hulka kuuluvad:
  - radoonitõkketarindid,
  - õhulekete vähendamine tarindite ja liitekohtade ning tarinditest läbiviikude õhulekke vähendamise abil,
  - pinnasesisene torustik võimaldamaks radooni difusiooni läbi torustiku pinnasest välisõhku.
- Aktiivmeetmed on õhurõhkude reguleerimine ning pinnase ventileerimisega seotud võtted.

Võimaluse korral tuleks alati eelistada passiivmeetmeid, kuna nende toimimiseks ei ole vaja pidevalt energiat kulutada ja need töötavad ka ilma inimesepoolse sekkumiseta. Passiivseid meetmeid on enamasti hõlpsam kasutada uute hoonete juures, kuna need hõlmavad peamiselt pinnasega kontaktis olevate alustarindite lahendusi. Kui pinnases on kõrge radoonitase, ei pruugi piisata passiivsete meetmete rakendamisest, et tagada viitetasemest madalam radoonitase hoones. Renoveeritavatel hoonetel on esimese korruse või keldripõranda alla tervikliku radoontõkke tegemine ja õhupidavuse tagamine sageli raskendatud, mistõttu on aktiivsed meetodid olnud efektiivsemad (Joonis 3.1).



Joonis 3.1 Erinevate renoveerimismeetmete mõju ruumiõhu radoonisisalduse vähenemisele Soomes (STUK-A229).

Radoonitõrje meetmete kasutamisel ei tohi unustada nende mõju hoone ja tarindite niiskustehnilisele toimimisele (tarindisse ei või jääda mitu veeaurutihedat materjalikihti, mille

vahelt niiskus ei pääse välja kuivama) ja energiakasutusele. Meetme kasutuselevõtt ei tohi halvendada hoone sisekliimat ega ohustada tarindi püsivust.

Radoonitõrje meetmete projekteerimise peamised tingimused:

- meetmed võimaldavad radoonitaset alandada märkimisväärselt alla nõutud viitetaseme;
- välistatud on radooni sattumine ruumi radoonieraldussüsteemidest;
- radoonitõrje meetmete toimimine on tagatud kogu hoone eeldatava kasutusaja jooksul;
- radoonitõrje lahenduse toimimist on lihtne kontrollida;
- paigaldatavad ventilaatorid ei tekita häirivat müra;
- tagada tuleb madalad kasutamise ja hooldamise kulud;
- täiendava ventilaatori lihtne paigaldamine, kui kasutatakse passiivset pinnase ventileerimise süsteemi.

Tabelis 3.1 on toodud erinevate radoonitaseme vähendamise meetmete mõju, toimimine ja maksumus. Nüüdisaegset soojustagastusega sissepuhke-väljatõmbeventilatsiooni kasutades on võimalik lisaks heale sisekliimale märgatavalt vähendada ka radooni kontsentratsiooni ruumis, seejuures radooni vähendamiseks täiendav energiakulu puudub või on väga väike. Soovitud radoonitaseme saavutamiseks tuleb pärast ventilatsioonisüsteemi ehitamist mõõta radoonitaset ruumis korduvalt pikema aja jooksul.

Tabel 3.1 Radoonitaseme vähendamise meetmete valikukriteeriumid (uutele hoonetele).

Meede	Radooni-taseme saavutamine	Pikaajaline toimimine	Vaikne ja mitte häiriv	Maksumus	
				Paigalda-mine (1)	Kasutamine (2)
Pinnasega kontaktis olevate piirete tihendamine	Puudub kuni madal	Tavaliselt halb kuni talutav	Tavaliselt väga hea	Keskmine	Väga madal
Radoonimembraan	Suuresti varieeruv	Stabiilne, kuid sageli piiratud radooni vähenemine	Väga hea	Sõltub tööde kvaliteedist	Puudub
Tuulutatav kasutuseta kelder	Keskmine kuni hea	Väga hea	Väga hea	Madal	Madal
Mehaanilise ventilatsiooniga kasutuseta kelder	Hea	Väga hea	Väga hea	Keskmine	Keskmine
Mehaaniliselt tekitatud alarõhk pinnases	Keskmine kuni parim	Väga hea	Tavaliselt väga hea	Madal	Keskmine
Soojustagastusega sissepuhke-väljatõmbe-ventilatsioon	Madal kuni keskmine	Hea kui kasu-tatakse ja hooldatakse	Tavaliselt väga hea	Madal kuni kõrge (3)	Madal

(1) Paigaldamise maksumus – meetme väljaehitamise maksumus (ühekordne investeering).

(2) Kasutamise maksumus – meetme käigushoidmise kulu kogu hoone kasutusaja jooksul (pidev kulu).

(3) Kuna säästlik ventilatsioonisüsteem tuleb paigaldada sõltumata radoonitasemest hoones, siis radoonitaseme alandamiseks tehtavad täiendavad kulutused on madalad.

Hoone piirdetarinditest mõjutavad siseruumi radoonitaset enim pinnasega kontaktis olevad piirdetarindid (esimese korruse põrand, keldripõrand, keldriseinad, vundamendi müüritis jne).

Väikeplokkidest keldriseina või vundamendimüüri ladumisel tuleb müüritis kindlasti laduda täidetud püstvuukidega (kuigi kandevõime tagamiseks võib mõnikord piisata ka täitmata

püstvuukidega müüritisest) ja võimalikult väikese õhujuhtivusega ehitusmaterjalist. Keramsiitplokk eristub teistest vundamendimaterjalidest oluliselt suurema õhujuhtivusega. Keramsiitplokkmüüritise õhupidavuse suurendamiseks tuleb terve müüritis kindlasti kahelt poolt krohvida (krohvida tuleb ka elektriinstallatsiooni süvendid). Betoonist õõnesplokid on õhupidavuse saavutamiseks hea valada betooni täis. Monoliitsest raudbetoonist keldriseinte korral on õhutiheda ja radoonikindla tarindi eeldused kõige suuremad. Radooni difusiooni pinnasest keldrisse vähendab märgatavalt hüdroisolatsiooni kiht (rull- või vedelmembraan) vundamendimüüritise välispinnal.

Alt tuulutatava põranda korral eraldab ventileeritav õhkvahe esimese korruse põranda pinnasest, mis on radooniohutuse tagamiseks üldiselt väga turvaline lahendus. Samas on alt tuulutatav põrand niiskustehnilise toimimise poolest liigitatud riskilahenduseks.

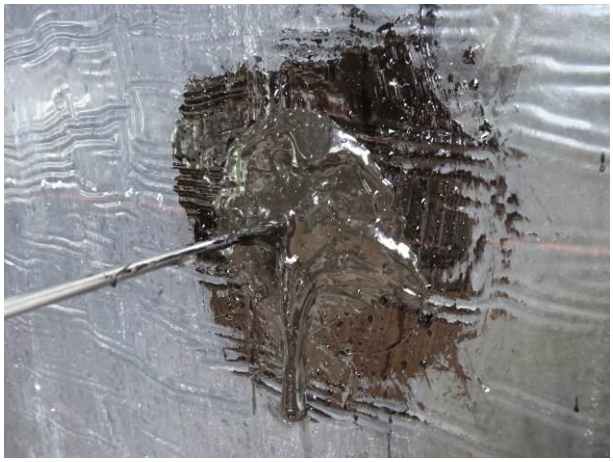
Pinnasele toetatud põranda puhul on peamised õhulekkekohad läbiviigud ja praod põrandas, põranda liitekohad vundamendiga ja välis-/vaheseintega, mis tuleb hoolikalt tihendada. Ristuvate lintidega plaatvundamendi korral valatakse põrand ja vundament üheks tervikuks ning nii on võimalik liitekohtade mõju minimeerida. Betoonplaadi ühtse terviku suurus on limiteeritud niiskus- ja soojuspaisumisega, mis võib põhjustada pragude teket. Pragude vältimiseks on vaja kasutada deformatsioonivuuke, mis tuleb hermetiseerida (vt. ptk. 3.3 Pragude tihendamine)

Pinnasele toetatud põranda puhul tuleb igati vältida sellesse pragude tekkimist. Pragude põhjused võivad olla:

- aladimensioneeritud kandevõime (betooni tugevus, piisav armeering);
- aluspinnase vajumine (aluspinnase konstruktsioon ja tihendamine);
- betooni mahukahanemine (betooni omadused, betooni järelhooldus, valamisulatus, armeering, tihendamine, temperatuurimuutused).

Pinnasele toetatud põranda radooniohutust suurendab põrandaalune torustik, ventilaatori abil tekitatakse alarõhk ja minimeeritakse õhuliikumise potentsiaali ning vähendatakse pinnase radoonisisaldust. Loomulikule tõmbele projekteerimisel tuleb toimivus tõendada ka olukorras kus temperatuuride erinevus pinnase ja välisõhu vahel on väike või puudub.

Kui pinnasest hoonesse tulevad kaablid või torud on paigaldatud hülssidesse, tuleb tihendada nii hülsi ja seina liitekoht kui ka toru/kaabli ja hülsi vahe.

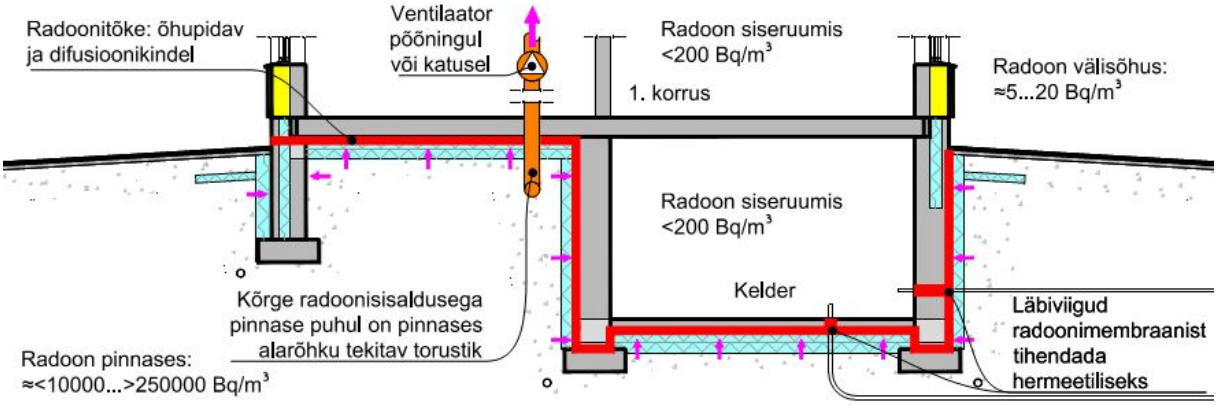


Joonis 3.2 Vundamendist läbiviigud tuleb hoolikalt tihendada (vasakul on tihendamata).

Joonis 3.3 Esimese korruse või keldri põrandas olevad süvendid ja tehnosüsteemide läbiviigud on sageli radooni siseruumi sisenemise kohtadeks.

3.1 Radoonimembraan

Radoonimembraani eesmärk on tekitada põranda alla ühtne õhutihe (vältimaks radooni konvektsiooni: liikumine õhurõhkude mõjul) ja radooni difusioonile (radooni kontsentratsiooni mõjul) läbimatu kiht (Joonis 3.4 ja Joonis 3.5). Radoonimembraani kasutamise võib liigitada nn passiivsete meetmete alla, mis toimimise tagamiseks täiendavat energiat ei vaja.



Joonis 3.4 Radoonimembraani paigalduse põhimõte: õhupidava ja difusioonikindla kihiga tekitada pinnase ja siseruumi vahele tõke radoonile ning põranda alla tuulutustorustiku abil tekitada siseruumi suhtes alarõhk ning vähendada pinnase radoonisisaldust

Projekteerimise ja ehitamise käigus tuleb tähelepanu pöörata järgmistele asjaoludele:

- ehitustehnoloogiaga välditakse radoonimembraani kahjustamine ehituse käigus;
- radoonimembraanid tuleb omavahel ja teiste tarinditega hermeetiliselt liita tervikuks;
- radoonimembraan peab moodustama ühtse tervikliku õhutiheda kihi üle kogu põranda ja keldriseinte (kaasa arvatud müüre läbivad osad ja läbiviikute tihendamine);
- tuleb minimeerida läbiviike radoonimembraanist, vajalikud läbiviigud hermetiseerida hoolikalt (vaata täpsemalt alapeatükk 0);
- hoone vajumid ja deformatsioonid ei tohi radoonimembraani ühtset tervikut lõhkuda: radoonitõkke ühtne tervik hõlmab ka müüritises olevat horisontaalset tõket, millega radoonitõkkekile on ühendatud.

Radoonimembraani paigutus peab ühekorraga vastama mitmele vajalikule tingimusele:

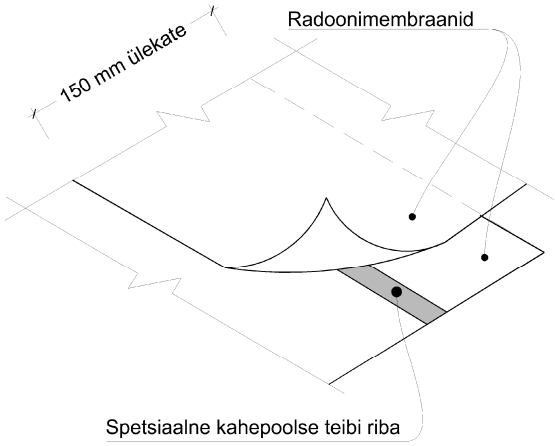
- radoonimembraani kahjustumise vältimine (soojustuskihtide vahel, madalamal elektri- ja vee-torustikest, mis tehnoloogiliselt paigaldatakse eelkõige põranda pealmistesse soojustus-kihtidesse);

- ehitusfüüsikaline toimimine (tuleb vältida tarindisse mitme veeaurutiheda kihi teket ja radoonikile asetsemist „valel pool“ soojustust);
- ehitustehnoloogiline paigaldatavus ja hermeetilise liitmise võimalus müüritise või müüritises oleva horisontaalse hüdroisolatsioonikihiga.

Radoonitõkkeks sobivad erinevad õhutihedad (gaasitihe) membraanid, mis on selleks otstarbeks toodetud, mida on võimalik liita terviklikuks süsteemiks ja mille omadused püsivad kogu hoone kasutusaja jooksul. Sobivuse tõendamiseks on parim radoonikindluse sertifikaadi olemasolu. On olemas ka mitmekihilised nöör armeeringuga membraanid kasutamiseks juhtudel, kui on vaja suuremat koormustalvust, kaitset ehitustööde käigus tekkida võivate vigastuste eest, tõmbetugevust ja/või lisakaitset pinnasest eralduvate teiste gaaside ja/või erineva pinnase saastatuse eest.

Radooni tõkestamise seisukohalt ei ole niivõrd tähtis materjali paksus, kuivõrd on oluline tagada liitekohtade õhupidavus (sh. ka muude gaaside pidavus). Õhupidavuse saavutamiseks tuleb radoonimembraanide erinevad paanid liita õhutihedaks tihendusmastiksi abil või keevitades kuuma õhuga (Joonis 3.6). Kui kasutatakse teipe, tuleb veenduda nende kvaliteedis. Tavaline montaažiteip ei taga radoonimembraani liitekoha pikaajalist õhutihedust.

Joonis 3.5 Radoonimembraan on paigaldatud põrandale (vasakul) ja müüritise all on koormust taluv soklilint (paremal). Radoonimembraan ja soklilint ühendatakse õhutihedalt üheks tervikuks.



Joonis 3.6 Radoonimembraani paanid tuleb ühendada tervikuks spetsiaalse kahepoolse teibiga (joonistel) või keevitades kuuma õhuga (vastavalt membraani tüübile).

Radoonimembraani valikul tuleb tähelepanu pöörata ka selle paigaldatavusele. Jälgida tuleb kasutatavate toodete paigaldusjuhiseid, sealhulgas minimaalset paigaldustemperatuuri (et materjalid oleksid paigaldamiseks piisavalt elastsed). Paksem või jäigem materjal on küll vigastustele vastupidavam, kuid selle paigaldamine nurkadesse ja äärtesse on keerukam, kuna

paksemat materjali on raskem painutada ja voltida ning nurkadesse võivad jääda õhulekkekohad (Joonis 3.7). Nurkades on soovitatav kasutada radoonitõkkematerjalide tootjate poolt pakutavaid spetsiaalseid vormitud nurgadetaile. Alternatiivina võib kasutada paksemat materjali põranda üldpinna ulatuses ning perimeetril ja keerukates kohtades kasutada (õhemaid) materjale, mida on kergem painutada, voltida ja tihendada. Laiemalt on hakanud levima ka tehases eeltoodetud kogu hoone alust katvad tooted. Sellised tooted keevitatakse kokku tehases kontrollitud tingimustes vastavalt konkreetse maja parameetritele ning tarnitakse ehitusplatsile ühes tükis, vähendades niimoodi radoonimembraani vigastamise ohtu. Sellise toote kasutamisel tuleb arvestada, et pärast põranda betoonivalu peab edasine töö toimuma vihma eest kaitstult. Vastasel korral valgub sadevesi põrandasse, kust tema väljakuivatamine on kallis ja pikaajaline protsess.

Joonis 3.7 Radoonimembraani liitekohtadesse ei või jääda õhulekkekohti

Tuleb toonitada, et paigaldatud radoonimembraan on õrn ja sellega tuleb ümber käia väga ettevaatlikult. Ehitustööde tehnoloogia peab olema selline, et radoonimembraan ei saaks kahjustada. Kui tavaliselt on betoonpõranda alla pandava ehituskile peamine eesmärk takistada valatava betooni valgumist soojustusplaatide vahele või reguleerida veeauru difusiooni, siis radoonimembraani peamine eesmärk on takistada õhuleket pinnasest ja ka väikesed kahjustused rikuvad membraani õhutiheduse (Joonis 3.8).

Joonis 3.8 Radoonimembraani kasutamisel peab olema väga tähelepanelik, et sellele ei tekiks armatuurist põhjustatud vigastusi (vasakul, Jelle *et al.*, 2010) või täiendava soojustuskihi lõikamisega tekitatud sisselõikeid (paremal).

Radoonimembraan tuleb paigaldada vahetult enne betooni valamist. Kui on ette näha, et üle paigaldatud radoonimembraani hakkavad käima ehitustöölised või liikuma seadmed ning tekib radoonimembraani vigastamise oht (eelkõige ehitusaegsed vigastused), tuleb membraani peale vahetult peale paigaldamist kaitseks lisada õhuke (30–50 mm paksune) piisavalt jäik soojustuskiht (Joonis 3.9) või ajutine kaitsematerjal (näiteks papp). Nii jääb radoonimembraan

põranda kahe soojustuskihi vahele ja on paremini kaitstud. Kindlasti ei tohi lubada ehitustöölistel soojustuse lisakihi lõikamist paigaldatud radoonimembraani peal (Joonis 3.8 paremal). Enne membraani katmist järgmiste konstruktsioonikihtidega tuleb alati kontrollida, kas membraan on terve. Sageli pole kahjustused visuaalsel ülevaatusel tuvastatavad, seega tuleb püüda vältida membraani vigastamist. Kui siiski on membraani vigastatud, tuleb enne töödega jätkamist kahjustatud kohad paigata sama materjaliga, jättes ülekatteks alates kahjustatud kohast vähemalt 150 mm ja kinnitades parandused teibi või mastiksiga.

Joonis 3.9 Kui üle paigaldatud radoonimembraani hakkavad käima ehitustöölised või liikuma seadmed ning tekib radoonimembraani vigastamise oht, tuleb membraani peale kaitseks paigaldada õhuke (30–50 mm paksune) piisavalt jäik soojustuskiht.

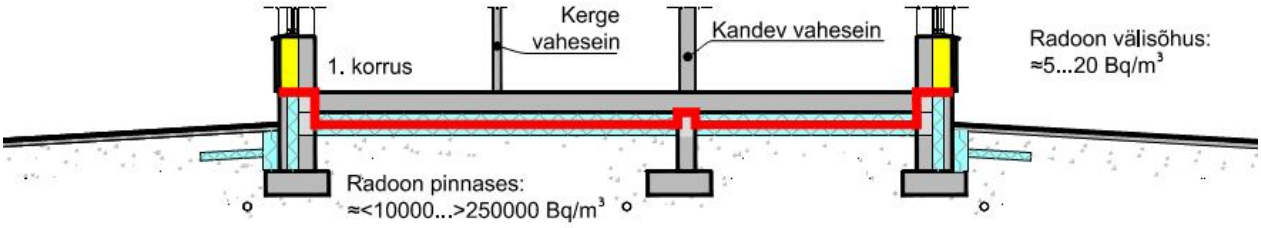
Müüritist läbiv või vundamendi ja seina müüritiste vahel olev hüdroisolatsioon on üks hoone kõige olulisemaid isolatsioone ja peab olema ajas kestev, koormusi taluv, veekindel (vajaliku auru-, vee- ja gaasikindlusega vastavalt eeltingimustele). Radoonitõkkekile enamasti müüritise alla ei sobi. Müüritises tuleb kasutada suurema koormustaluvusega materjali. Paraku ei taga tavaline SBS rullmaterjalist müüriisolatsioon või bituumenpakskate aga samaaegselt normaalset radoonikaitset, kuna seda ei ole võimalik radoonitihedalt (garanteeritult, süsteemselt) ühendada põranda aluse radoonimembraaniga.

On olemas kummibituumen rullmaterjali, mida saab garanteerituna kasutada radoonimembraanina, kuna need on selgelt eritooted. Et radoonimembraani kasutada müüritise all peab see taluma müüritise koormust. Kummibituumenist radoonimembraanid liidetakse tervikuks kuuma õhuga või spetsiaalset isekleepuvat materjali kasutades. Hüdroisolatsiooni ja radoonimembraani ühitamine või omavaheline eristamine eri kihtidesse tuleb kindlasti planeerida juba projekteerimise ajal. Hüdroisolatsiooni ja radoonimembraani ühitamist tohib projekteerija kavandada ja ehitaja ehitada ainult siis, kui valitud materjal võimaldab valida sellised tooted, mis võimaldavad üheaegselt ja täiel määral täita nii ühte kui teist kirjeldatud funktsiooni. Niipea kui üks funktsioonidest materjalide valiku tõttu halveneb, ei tohi neid ühendada vaid tuleks viia need kahte eraldi materjali.

Seega mõistlikuks alternatiiviks on siin kaks võimalikku lahendust:

- Müüre läbiv spetsiaalne kummibituumen radooniisolatsioon, mis ühtlasi tagab täieliku kaitse niiskuse vastu;
- Müüre läbiv tavaline kummibituumen müüriisolatsioon (mis annab kestva ja hea kaitse niiskuse vastu) ja lisaks selle peal olev radoonimembraan (mis annab kaitse radooni vastu ja võimaldab seda süsteemselt ühendada põranda aluse radoonimembraaniga. Nende kahe materjali ühendamine peab olema tehtud väljaspool müüri, kuhu peab müürialune koormusttaluv materjal ulatuma.

Radoonimembraan peab ulatuma kuni välisõhuni (vt. Joonis 3.10…Joonis 3.13) ja paiknema ka siseseinte ning põrandani ulatuvate akende all. Kui müüride ehitamise käigus on raske vältida kogu põrandat katva kile vigastamist, on mõistlik paigaldada siseseina alla seinast laiem radoonimembraani riba, mis hiljem mõlemalt poolt põrandat katva radoonimembraaniga ühendatakse hermeetiliselt. Kandvate siseseintega sarnasel põhimõttel tuleb lähenda ka korstnate, ahjude, kaminate ning teiste põrandaplaati katkestavate vundamentidega. Oluline on tagada radoonimembraani hermeetilisus ja terviklikkus ka eelmainitud vundamentide peal.



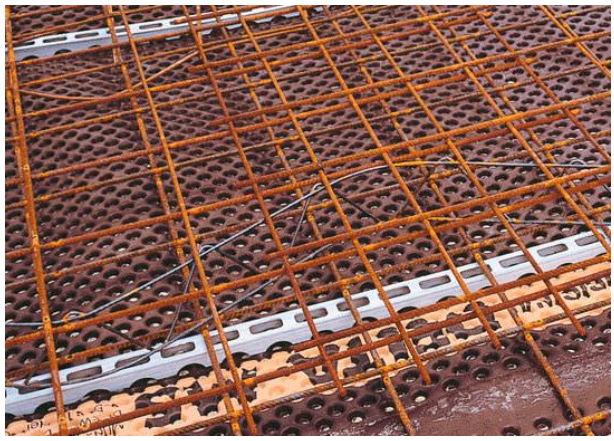
Joonis 3.10 Radoonimembraan peab ulatuma välisõhuni ja asuma ka siseseinte all.

Joonis 3.11 Kummibituumen rullmaterjalist radoonitõke (vasakul) hästi kleepuva pinnaga (paremal).

Joonis 3.12 Plastist radoonimembraan on pandud vundamendil oleva kummibituumenist rullmaterjali peale.

Joonis 3.13 Radoonimembraan peab olema ka põrandani ulatuvate avatäidete all.

Radoonimembraaniks on kõlbmatud mummulise pinnaga plastist vundamendikatted (nendega ei saa tagada õhu- ja gaasitihedaid liitekohti) ning Tšehhi teadlaste kogemusele tuginedes ka alumiiniumiga kaetud bituumenmaterjalid (ei ole tagatud toimimine pärast vajumisi).



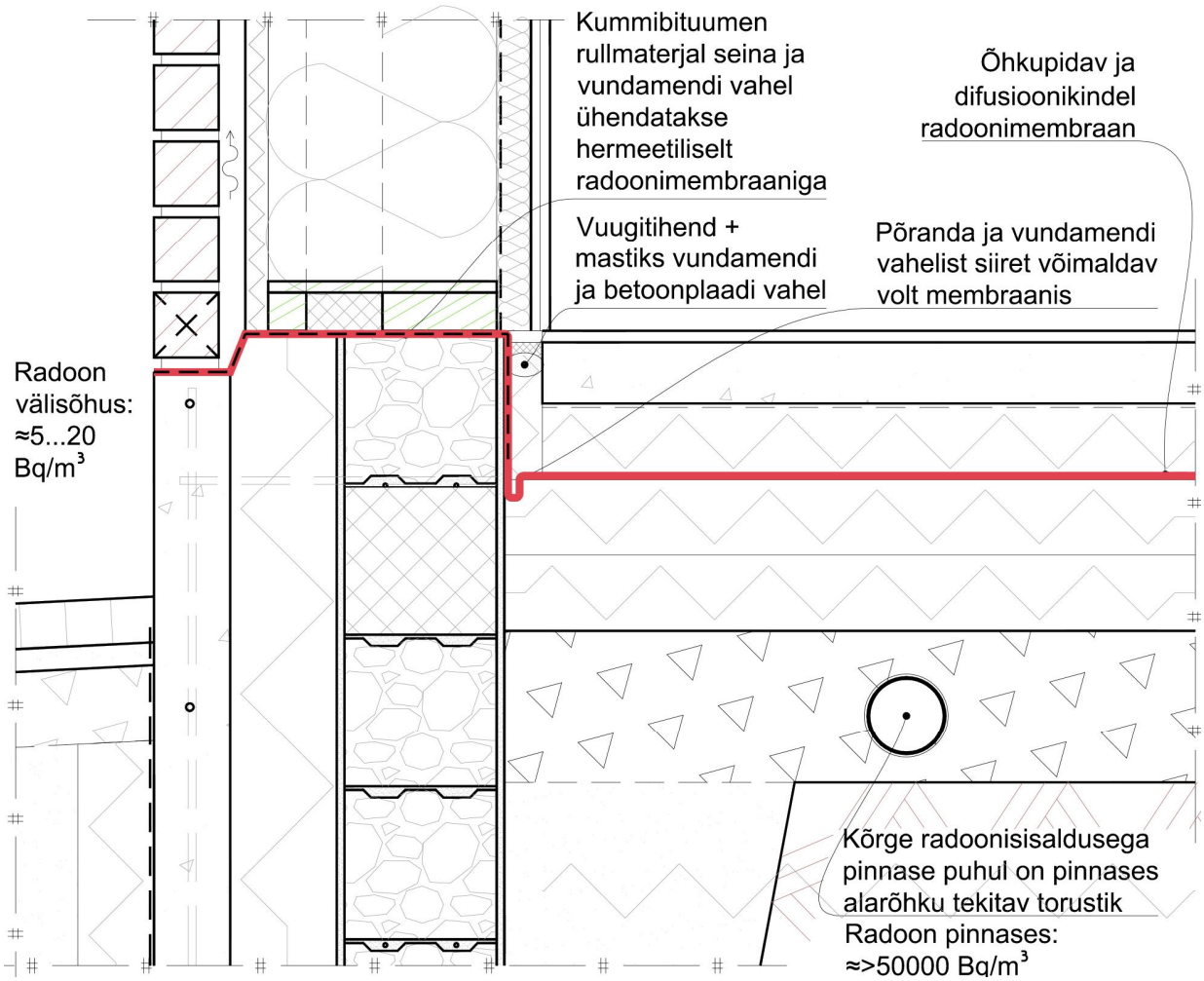
Joonis 3.14 Mummulise pinnaga plastmaterjal sobib küll soojustuse kaitseks või veeauru difusioonitõkkeks, kuid ei sobi radoonitõkkematerjaliks, kuna ei ole õhutihedate liitekohtadega terviklik membraan.

Erinevate konstruktsioonide liitekohtades, kus tõenäoliselt võivad esineda vajumid (näiteks betoonist põrandaplaadi ja vundamendiseina liitekoht), tuleb radoonimembraani jätta volt. See võimaldab konstruktsioonielementide siiret ilma radoonimembraani kahjustamata.

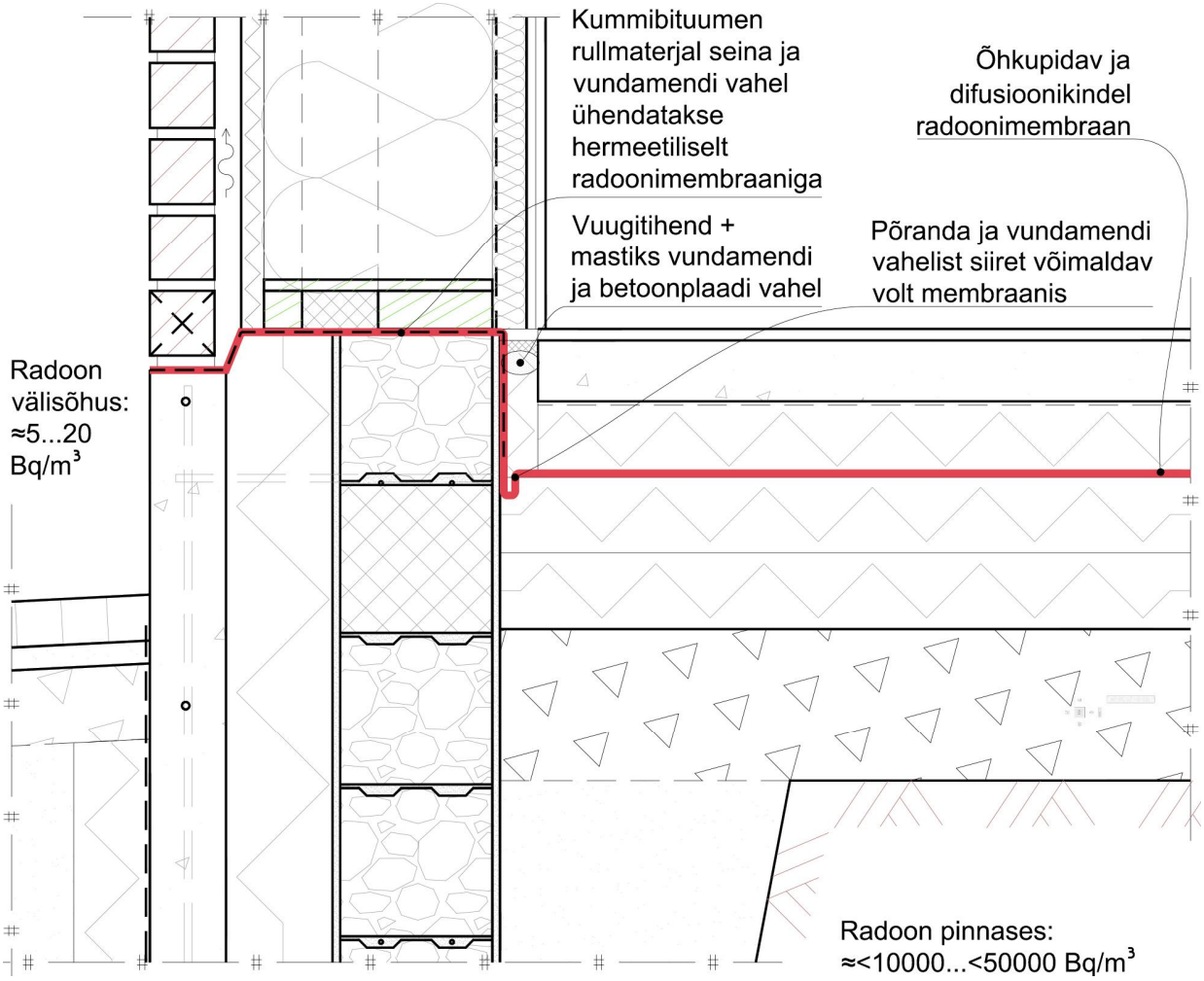
Radoonimembraani lahendused võib jaotada vastavalt pinnase radoonisisaldusele ja õhuläbivusele kolmeks.

- Baaslahenduse moodustab radoonimembraan, mis eraldab õhutihedalt ja radooni difusioonile läbimatult pinnasele toetatud põranda pinnasest. Täiendavalt paigaldatakse põranda alla torustik, mille kaudu tekitatakse pinnasesse hoone suhtes alarõhk ja ventileeritakse pinnasest radoon välja (Joonis 3.15).
- Normaalse radoonisisaldusega pinnase puhul, kui radoonirisk on väiksem, võib loobuda ventileerimisest pinnasesisese tuulutustorustiku (Joonis 3.16).
- Madala radoonisisaldusega ja väikese õhuläbivusega pinnase puhul võib moodustada radoonitõkke tihedast betoonplaadist ja selle õhutihedalt liita teiste tarinditega (Joonis 3.17).

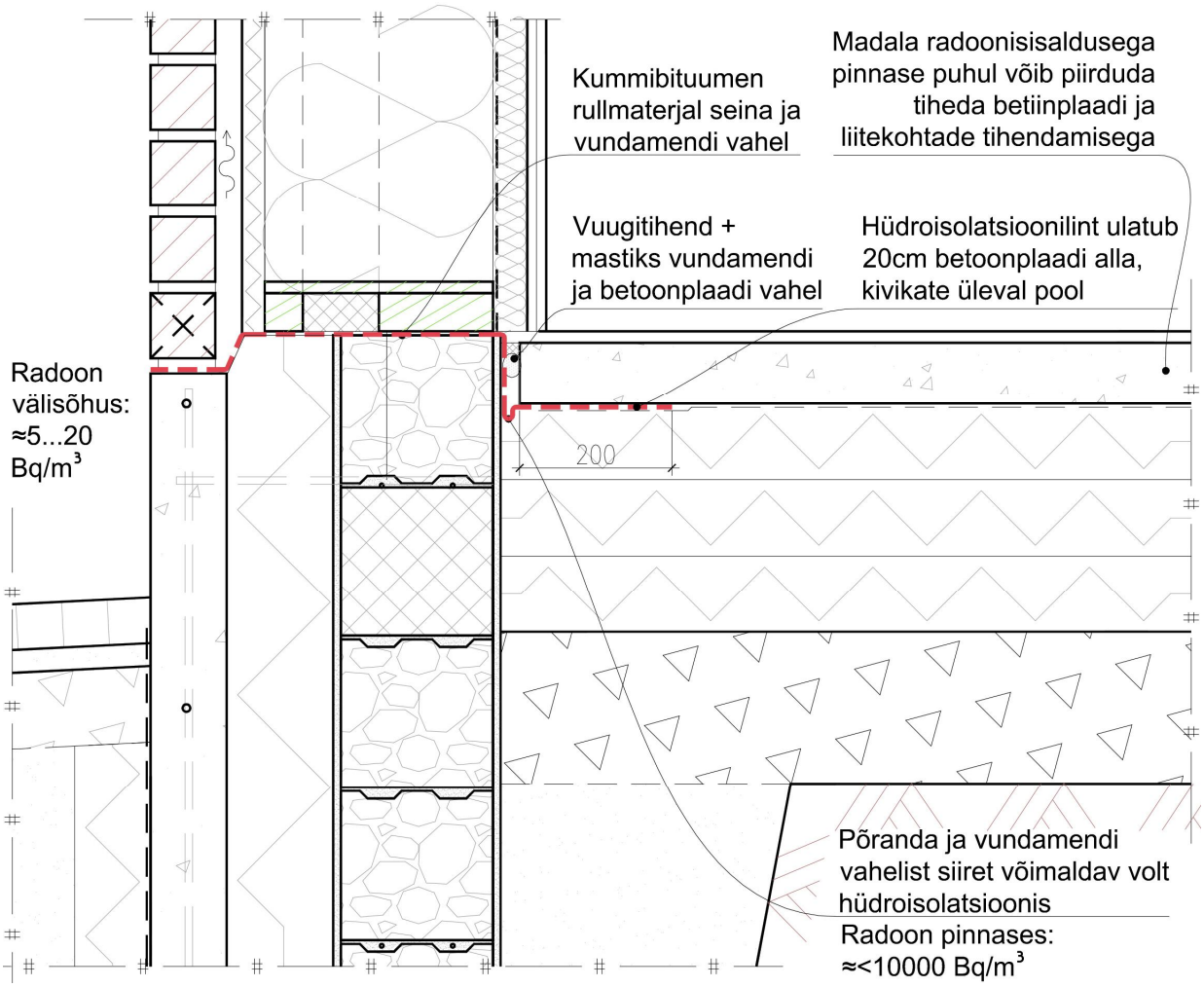
Ainult betoonpõrandast ei piisa radoonitõkkeks, sest betooni mahukahanemise või koormuse all tõmbetugevuse ammendumise tõttu tekkivate pragude kaudu tungib radoon pinnasest siseruumi. Kui pinnasele toetatud betoonpõranda projekteerimisel ja ehitamisel on tagatud pragude mittetekkimine ja betoonpõrand liidetakse teiste tarinditega hermeetiliseks tervikuks, võib madala radoonitasemega pinnase puhul sobida radoonitõkkeks betoonpõrand (Joonis 3.17).



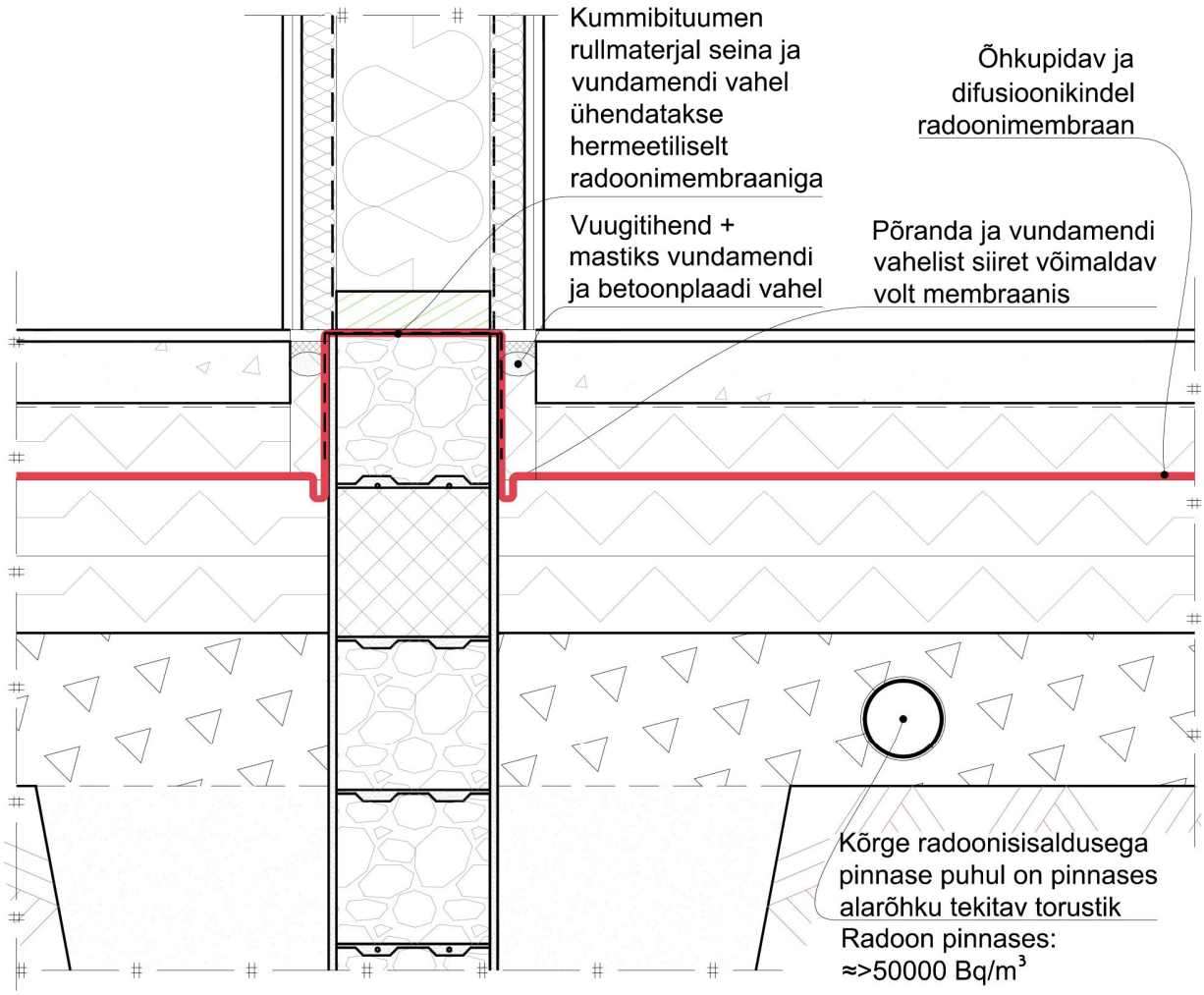
Joonis 3.15 Radoonitõke hermeetilise radoonimembraani ja põrandaaluse õhutustorustikuga. M1:10.



Joonis 3.16 Radoonitõke hermeetilise radoonimembraaniga. M1:10.



Joonis 3.17 Radoonitõke tiheda betooniga, mis on hermeetiliselt liidetud naabertarinditega. M1:10.



Joonis 3.18 Radoonitõke vaheseinte all. M1:10.

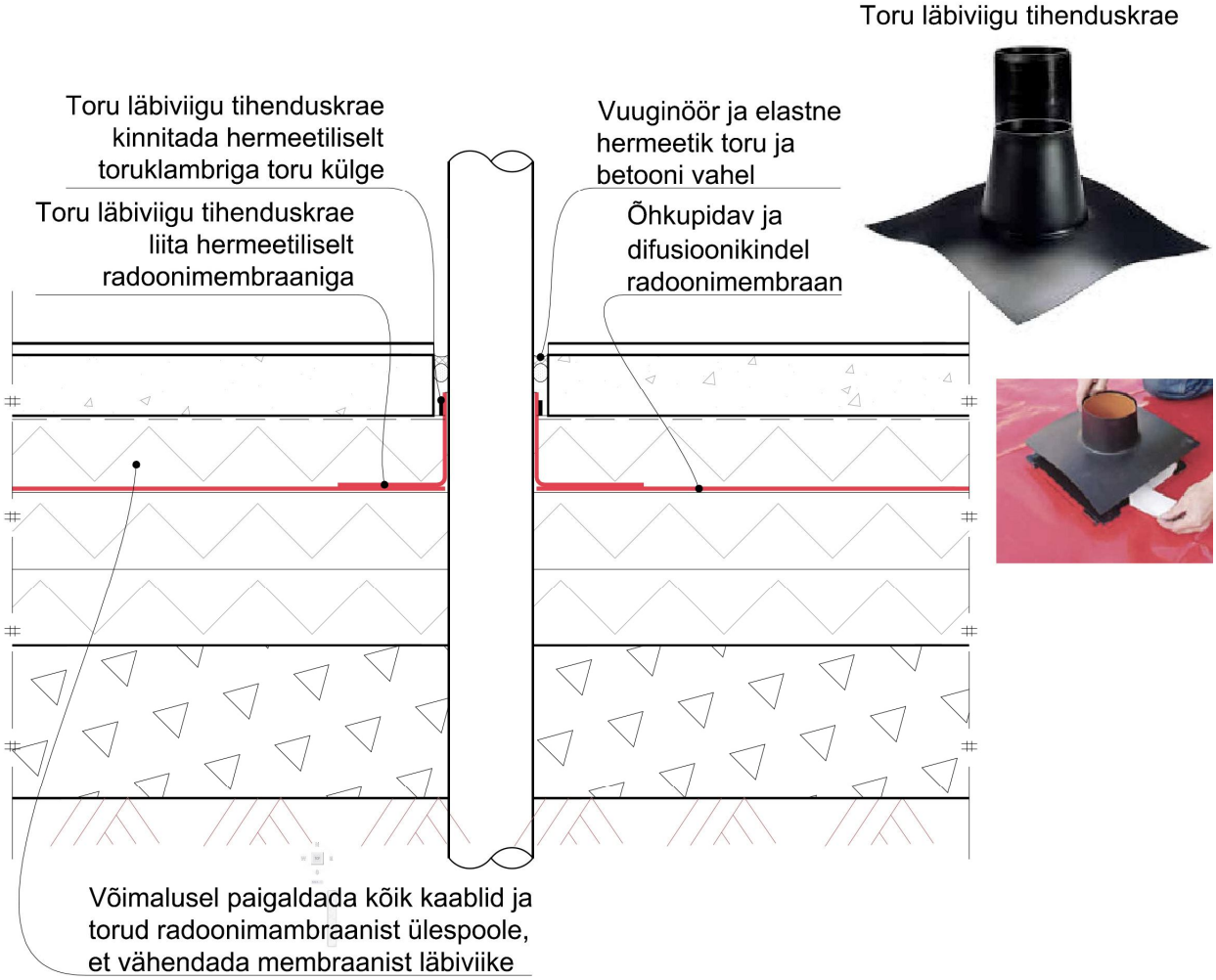
3.1.1 Läbiviikude tihendamine

Torude ja kaablite läbiviikude arvu radoonimembraanist tuleb minimeerida juba ehitusprojekti staadiumis, st projekteerija peab käsitlema kompleksselt:

- hoone tehnosüsteemide torustikke põrandates ja seintes;
- radoonimembraani asetust põrandakihtides;
- hoone piirdetarindite, sh põranda ehitusfüüsikalist toimimist (veeaurutihe radoonimembraan ei tohi paikneda soojustuse välistsoonis).

Enamik kommunikatsioonide läbiviike on võimalik hoonesse vedada läbi välisseinte. Siiski on torustikke, mida ei saa paigaldada radoonimembraani peale: näiteks on kanalisatsioonitoru läbimõõt ja kalle selline, mis võtab ruumi rohkem, kui seda on radoonitõkke peal. Seetõttu on tavapärane, et mõned torud ja kaablid läbivad radoonimembraani.

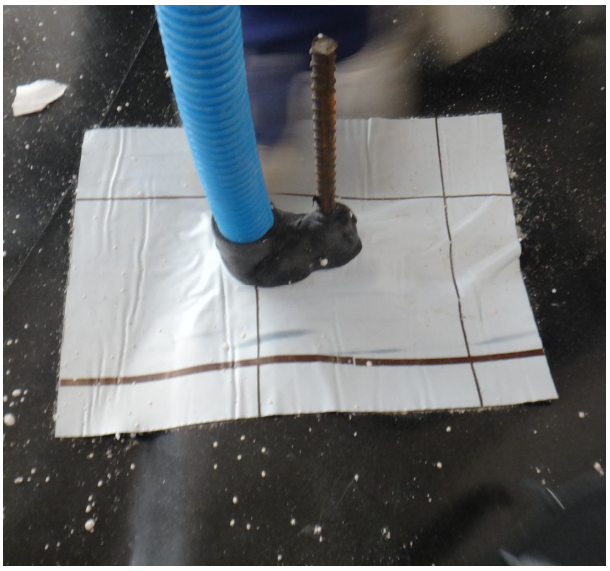
Läbiviigud radoonitõkkest tuleb hoolikalt tihendada (Joonis 3.19, Joonis 3.20, Joonis 3.21). Kanalisatsioonitrapid ja teised põrandas paiknevad kommunikatsioonid tuleks paigaldada nii, et oleks välditud radoonimembraani vigastamine. Iga radoonimembraani läbiva toru/kaabli ümber tuleb tekitada õhukindel tihend, selleks pakuvad mitmed radoonitõkkematerjalide tootjad spetsiaalseid läbiviigutükke. Läbiviigu ümbris tuleb lisaks kattematerjalile vajadusel tihendada ka elastse mastiksiga. Enne tõkkekihi kinnikatmist tuleb kontrollida ühenduskohad ja veenduda, et membraani pole paigalduse ajal vigastatud. Kui läbiviigud radoonimembraanist paiknevad tihedalt koos (Joonis 3.21 vasakul), tuleb tihenduseks kasutada torude ümber valatavat mastiksit.



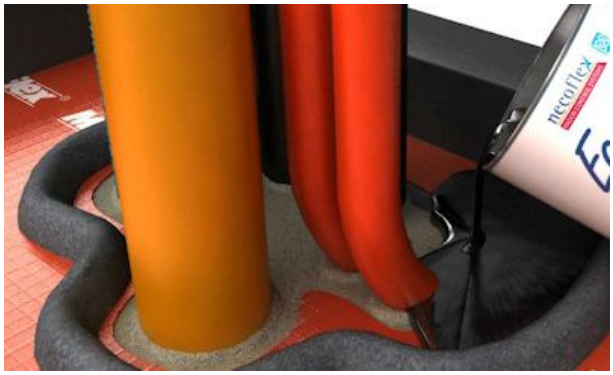
Joonis 3.19 Toru läbiviik läbi radoonimembraani.

Samuti tuleb läbiviikudena käsitleda kandekonstruktsiooniposte (Joonis 3.22, vasakul). Kandvate postide juures võiks radoonimembraan paikneda posti vundamendi all. Kui kandev post läbib radoonimembraani, siis tihendada see analoogiliselt torude läbiviikudega, kasutades sobiva kujuga kraed ja võimalusel kraed fikseerivat metallklambrit. Krae tuleb posti külge kleepida posti materjaliga hermeetiliselt nakkuva tootega.

Kui pinnasest hoonesse tulevad kaablid või torud on paigaldatud hülssidesse, tuleb tihendada nii hülsi ja seina liitekoht kui ka toru/kaabli ja hülsi vahe.



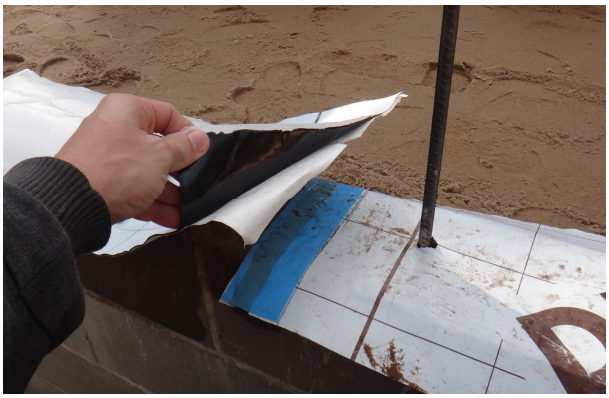
Joonis 3.20 Toru läbiviik läbi radoonimembraani on tihendatud spetsiaalse tihenduslapi abil. Kui kaabli või toru paigalduseks on kasutatud hülssi (vasakul), tuleb ka hülsi ja kaabli/toru liitekoht tihendada. Paremal on kanalisatsioonitoru ümber deformatsioonilint, mis on aga poorne ega ole tihe. Sellisel juhul tuleb tihendus teha vastu kanalisatsioonitoru ja paigaldada deformatsioonilint hiljem



Joonis 3.21 Kui läbiviigud radoonimembraanist paiknevad tihedalt koos, näiteks elektrikilbi (vasakul) või küttejaoturi all, tuleb tihenduseks kasutada torude ümber valatavat mastiksit (paremal, tootefoto).

Joonis 3.22 Selliste kohtade tihendamiseks peavad ehitamise aluseks olevas tööprojektis olema nii joonised kui ka seletuskirjad.

Joonis 3.23 Hoolikalt paigaldatud radoonimembraan vundamendi ja müüritise vahel on katki tehtud elektripaigaldusega. Sellist läbiviiku on juba raske tihendada.



Joonis 3.24 Kui betoonplokkmüüritise sidumiseks vundamendiga on vaja kasutada vertikaalseid armatuurvardaid, tuleb nende läbiviik radoonitõkkest hoolikalt tihendada. Hiljem on sellise lekkekoha avastamine raske ja tihendamine peaaegu võimatu.

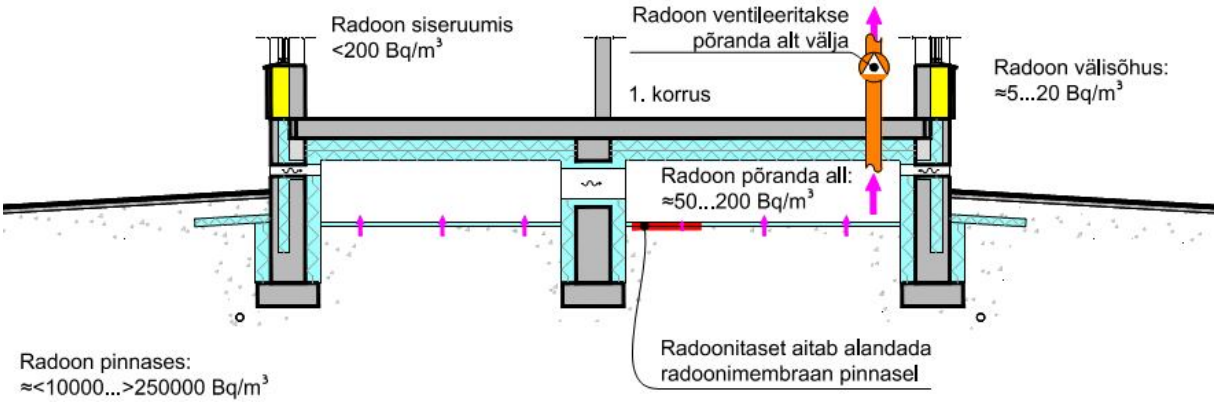
3.2 Alt tuulutatav põrand

3.2.1 Avatud alusega hoone

Kui hoone esimese korruse põranda all on tagatud vaba välisõhu liikumine ja põrandaalune õhuvahetus tagab radooni eemaldamise, siis täiendavaid radoonitõkke meetmeid pole vaja kasutada. Selline hoone võib olla ehitatud postidele või paralleelsetele ühesuunalistele kandvatele seintele ning ristuvas suunas on võimaldatud välisõhu vaba ja intensiivne liikumine. Lisaks ehitisega seotud õhu liikumist takistavatele elementidele tuleb tähelepanu pöörata ka looduslikele ajutistele takistustele, nagu tihe taimestik ja lumevallid. Radooni eemaldamiseks vajalik õhuvahetus põranda all peab olema tõendatud toimimisega tagatud aastaringselt.

3.2.2 Maapinnast kõrgemal asuva põrandaga hoone

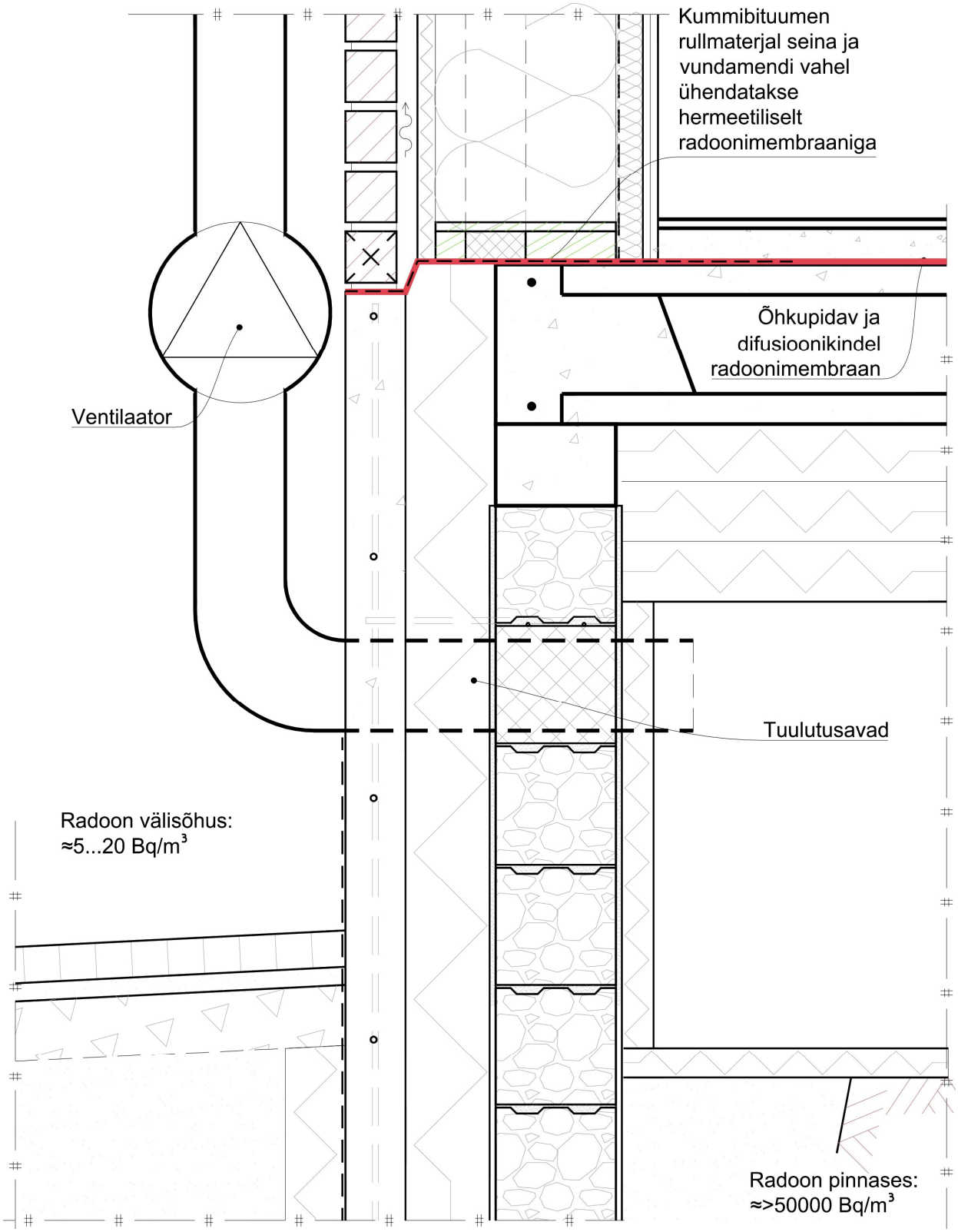
Väikese radoonisisaldusega pinnase korral võib kasutada hea kvaliteediga õhutihedaks ehitatud põrandatarindeid. Normaalse radoonisisaldusega pinnase korral on vajalik põrandaaluse täiendav ventileerimine kas loomuliku tõmbe (toimimine on tagatud õhutiheduse erinevuse või tuule mõjul) või ventilaatorite (pidevalt töötavate või radooniandurite poolt juhitavate) abil. Põrandas peab olema radoonitõke, mille liitekohad on hoolikalt tihendatud. Pinnase suure radoonisisalduse korral on kindlasti vaja välja ehitada põrandaaluse ruumi mehaaniline õhuvahetus, mis ei tekitaks suurt õhurõhu erinevust üle põranda (on piisavalt kompensatsiooniavasid välisõhu sisenemiseks põranda alla).



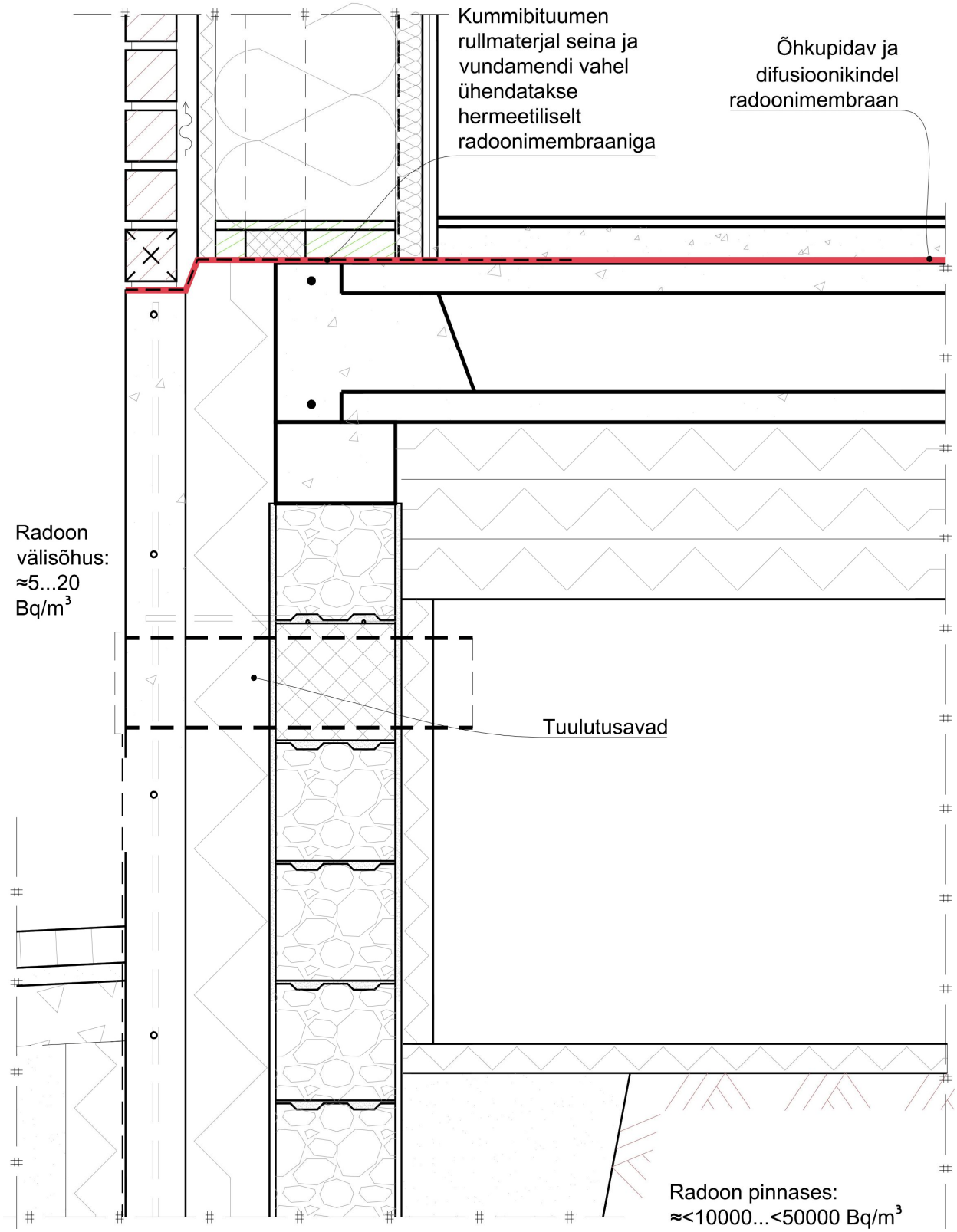
Joonis 3.25 Põrandaaluse tuulutuse rajamise põhimõte: ventileerida põranda alt radoon välja.

Kui hoone ehitatakse alt tuulutatavana (Joonis 3.26), siis paigaldatakse radoonimembraan ujuvpõranda betooni alla või ülemise 30–50 mm soojustuse alla. Samuti võib radoonimembraani paigutada tuulutusvahe pinnasele, ühendada vundamendiseintega ning peale paigaldada soojustus tuulutusruumi soojusliku massiivsuse vähendamiseks (alt tuulutatava põranda niiskustehnilise toimimise tagamiseks). Paigaldades radoonimembraani ehituse alla, tuleb arvestada selle kaitsmisega kogu ehituse vältel, seega kinni katta kattekihiga. Membraani armeeringu mõte on lisada tõmbe ja rebenemise kindlust. Torke ja lõike puhul pole armeeringust suurt abi. Samas on just torkekahjustused peamised, mis ehituse käigus kipuvad tekkima.

Ülisuure radoonisisaldusega pinnastel tuleb põrandaaluse ruumi ventileerimiseks paigaldada ventilaatorid (Joonis 3.26), mis töötavad pidevalt või mida juhivad radooniandurid. Loomulik õhuvahetus (Joonis 3.27) peab olema aastaringse tõendatud toimimisega. Esimeses lähenemises võib tuulutuse rajada läbi vundamendis olevate õhutusavade, mille ristlõikepindala on vähemalt 1500 mm^2 meetri kohta, avade tsentrite maksimaalne vahekaugus võib olla 2 m ja nurkadest ei tohi ava olla kaugemal kui 0,5 m.



Joonis 3.26 Alt tuulutatav põrand, radoonimembraan ja mehaaniliselt tuulutatav põrandaalune ruum.



Joonis 3.27 Alt tuulutatav põrand, radoonimembraan ja loomuliku tuulutusega põrandaalune ruum.

Kui põrandaaluse ruumi põrand on õue maapinnast madalamal, tuleb tuulutus tagada vastavate tuulutuskorstnatega Joonis 3.28). Tuulutuskorstnate arvu ja asukoha projekteerimisel tuleb arvestada korstna õhuvoolutakistusega. Kuna tuulutuskorstna õhuvoolutakistus on suurem kui tuulutusrestil, ei pruugi tuulutuskorstnate kasutamine ilma mehaanilise ventilatsioonita radoonitaset alandada.

Joonis 3.28 Põrandaaluse tuulutuseks ettenähtud tuulutuskorstnad.

On oluline tagada, et ventilatsiooniavad oleksid alati puhtad ning pinnasetööd maja ümber ei tohi vähendada põrandaalust ventilatsiooni. Kuigi põrandaaluse ruumi tuulutamine vähendab radoonitaset, ei tohi seda kindlasti käsitleda kui peamist radoonitõkke meetodit. Radoonitõkkekiht soojustuses, mis samaaegselt täidab ka niiskustõkke ülesannet, peab vältima radooni sattumist ruumi radoonitõke tuleb korralikult projekteerida ja hoolikalt paigaldada.

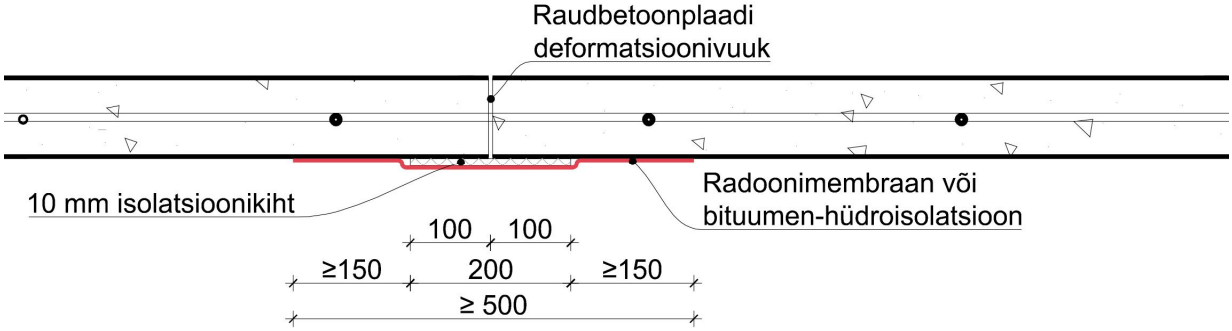
Kui loomuliku õhuvahetusega projekteeritud ja ehitatud hoone kontrollmõõtmistel selgub, et radoonitase ruumis on siiski liiga kõrge, on võimalik õhuvahetust põranda all suurendada, lisades ventilatsiooniavadesse nii sissepuhke, kui ka väljatõmbe ventilaatorid tagades nii tasakaalus õhuvahetuse. Ventilaatorite paigaldamine eeldab elektrivarustuse olemasolu ventilatsiooniavade juures.

3.3 Pragude tihendamine

Tarindite ning nende liitekohtade õhulekke vähendamine on efektiivne meede nii radoonitõrje kui energiatõhususe aspektist. Õhutihedad tarindid saadakse vaid siis, kui sõlmed hoolikalt projekteeritakse, ehitustööde järjekord planeeritakse ja ehitatakse kvaliteetselt.

Radooniohtlikus piirkonnas peab erilist tähelepanu pöörama keldri sõlmede ja põrandate ehitamisele ja projekteerimisele. Väikesed vead neis võivad põhjustada suurt riski ja hilisemate ümberehitamiste tõttu ka suurt aja- ning rahakulu.

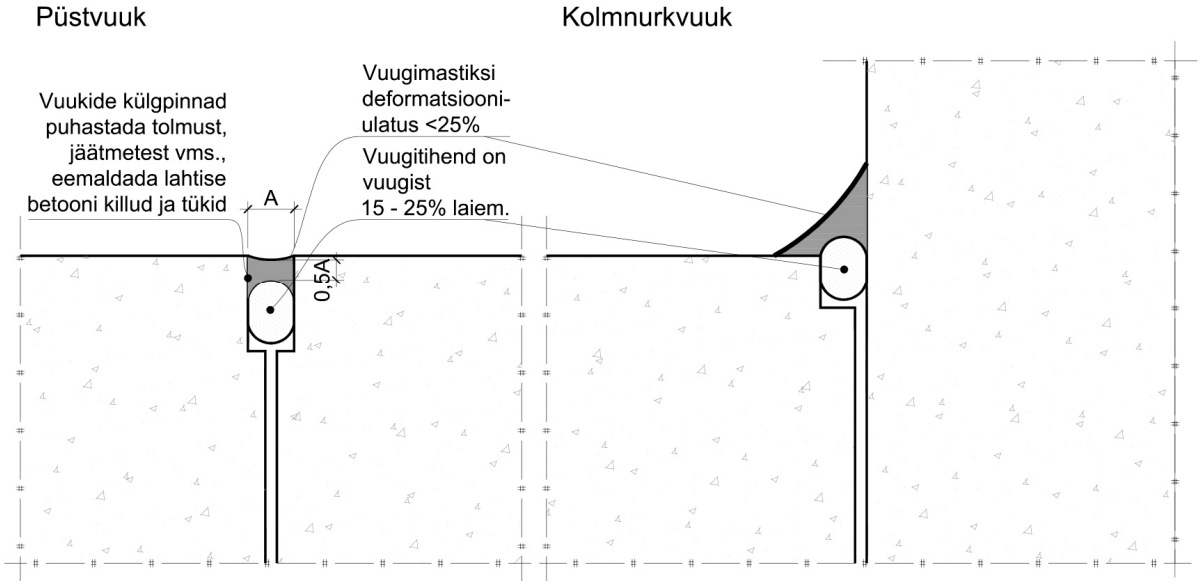
Projekteerimise faasis tuleb läbi mõelda suuremate hoonete raudbetoonpõrandate deformatsioonivuukide täpne paigutus ja ehituse ajal paigaldada vuugikohtade alla radoonimembraani või vundamentide vahel kasutatava hüdroisolatsiooni ribad (Joonis 3.29). Sellist lahendust on vaja kasutada piirkondades, kus pinnase radooni kontsentratsioon on madal, kõrgema radoonitasemega piirkondades peab radoonimembraan olema põranda all kogu hoone ulatuses.



Joonis 3.29 Raudbetoonplaadi deformatsioonivuugi tihendamine.

Olemasolevate konstruktsioonide õhupidavuse suurendamine on keeruline ülesanne. Esmalt tuleb praod ja lekkekohad tuvastada. Selleks võib olla vaja eemaldada tarinditelt viimistluskiht. Nähtavad vuugid ja praod tuleb puhastada ja võimalusel laiemaks ning sügavamaks lõigata või freesida, et neid saaks tihendada (Joonis 3.30). Puhastatud nähtavate pragude täitmiseks tuleb kasutada elastset vuugitihendit, mille peale paigaldatakse spetsiaalne vedel vuugimastiks.

Erilist tähelepanu tuleks pöörata ka kommunikatsioonide ja torustike läbiviikude tihendamisele (vt. ptk. 3.1.1 Läbiviikude tihendamine).



Joonis 3.30 Betoonpõrandasse tekkinud prao tihendamine servades ja keskel.

3.4 Radooni kogumissüsteem ja alarõhk pinnases

Kõrge ja väga kõrge radoonitasemega piirkondades tuleb ehituse (eelkõige olemasolevate hoonete renoveerimise puhul) käigus lisaks radoonimembraanile paigaldada põranda alla radoonitorustik või/ja -kaevud, et tekitada pinnases alarõhku ruumi suhtes ja seeläbi alandada radoonitaset pinnases ning vältida radooni sattumist hoone siseruumidesse (Joonis 3.37). Alarõhk radooni kogumise süsteemi tekitatakse ventilaatoriga, mille peab paigaldama pööningule, õue hoone kõrvale või keldrisse. Ventilaator paigaldatakse torustiku lõppu, et torustikus oleks alarõhk. Alarõhu jaotamiseks hoonealuses pinnases võib kasutada kogumiskaevusid või perforeeritud kogumistorutikku.

3.4.1 Perforeeritud torustik pinnases

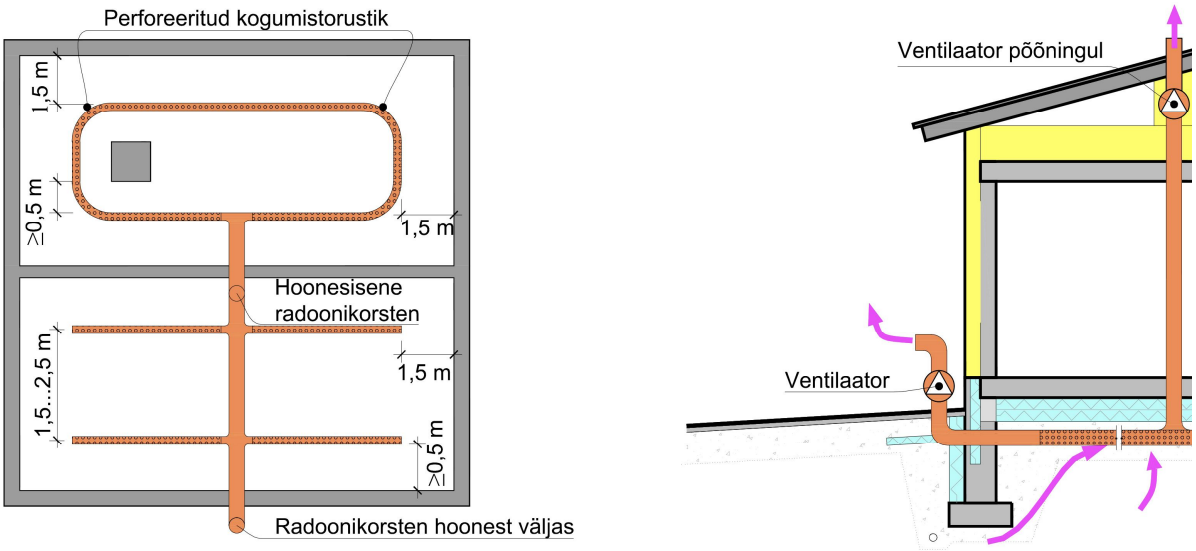
Üks kõige tõhusam ja enim kasutatud meetod pinnasest radooni eemaldamiseks on paigaldada põranda alla ventilatsioonitorud. Põranda ning radoonimembraani alla poorsesse pinnasesse paigaldatakse perforeeritud ventilatsioonitorude süsteem, mis ühendatakse kas hoones või väljaspool hoonet paikneva ventilaatoriga varustatud püstikuga (Joonis 3.31). Eelistatud on hoonest väljaspool paiknevad passiivsed või ventilaatoriga varustatud väljavisketorud, et vähendada läbiviikude hulka radoonimembraanist.

See radoonitõrje meetod sobib kasutamiseks eelkõige hästi õhku juhtivates pinnastes, kuna siis jaguneb alarõhk ühtlaselt ja ulatuslikult üle kogu põrandaaluse pinnase. Meetod ei ole efektiivne, kui on tegu savika halvasti dreeniva pinnasega, sellisel juhul tuleb kasutada hoone all sõmerat täitematerjali.

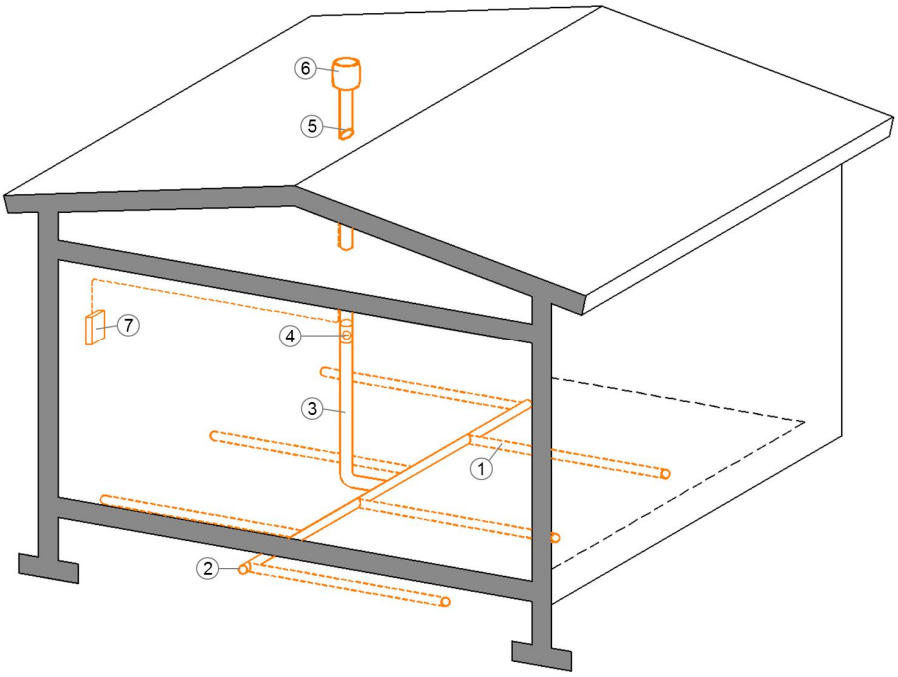
Pärast hoone kasutuselevõttu tuleb ajavahemikul oktoobrist maini vähemalt kahe kuu jooksul mõõta radooni kontsentratsiooni. Usaldusväärse tulemuse saamiseks peavad hoone kütte- ja ventilatsioonisüsteemid töötama tavapärases režiimis ning piirded peavad olema tihendatud. Enne mõõtmist tuleb kontrollida, kas kõik konstruktsioonide sõlmed on ehitatud vastavalt

projektile. Oluline on kontrollida ka tehno- ja muud abiruumid, mis piirnevad kasutatavate ruumidega. Kui radoonitase ruumides ületab ettenähtu, hoolimata kasutusele võetud radoonitõrje meetmetest, tuleb põrandaaluse radoonitõrjetorustiku püstiku otsa paigaldada väljatõmbeventilaator, mis töötab pidevalt.

Hoone põranda alla pinnasesse torustiku paigaldamisega tekitatakse pinnasesse alarõhk ja alandatakse radoonitaset pinnases. Torustik koosneb perforeeritud kogumis-, kollektor- ja väljatõmbetorustikust, mis juhitakse välisõhku ning mille otsa paigaldatakse soovituslikult ventilaator. Torustik tuleb teha korrosioonikindlast materjalist, mis on ette nähtud pinnasesse paigaldamiseks, näiteks plastist drenaaži-, sajuvee- ja kanalisatsioonitorudest. Torustik tuleb hoone sees isoleerida nii, et kondensaadi teke toru sise- või välispinnale oleks välistatud. Hoone ehitamisel võib ventilaatori asendada torustikku otsa paigaldatava vihmakattega, kuid kui mõõtmised tuvastavad liiga kõrge radoonikontsentratsiooni ruumides, tuleb torustiku tööd tõhustada ja vihmakate asendada ventilaatoriga. Ventilatsioonitorustiku komponendid ja paiknemine on näidatud Joonis 3.32.



Joonis 3.31 Pinnase ventileerimiseks vajalik tuulutustorustiku põhimõte plaanil ja lõikel.

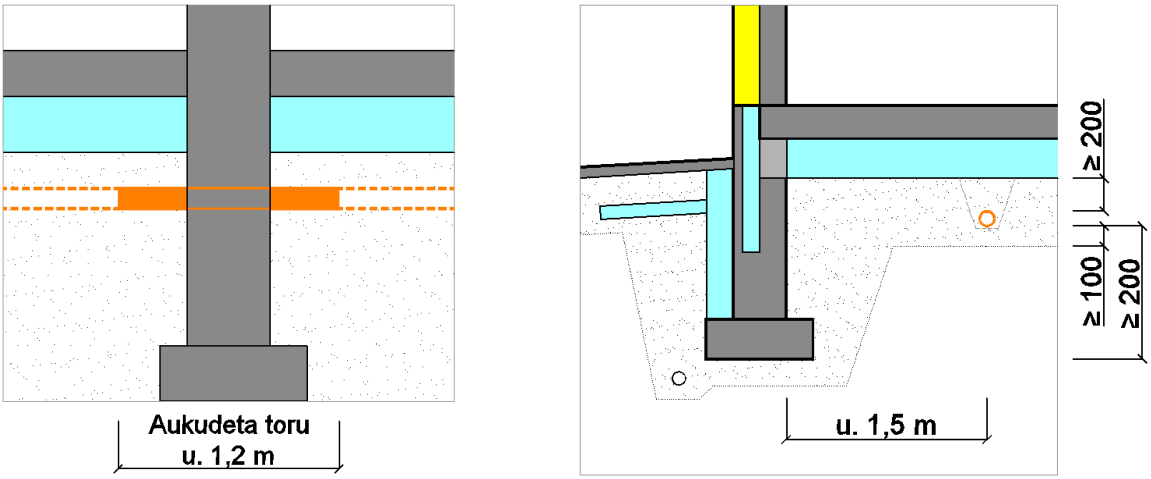


Joonis 3.32 Hoonealuse radooni eemaldamise torustiku komponendid ja paiknemine. Joonisel on kujutatud mitmeharulist paigaldusviisi.

Joonis 3.32 tähistatud torustiku osade kirjeldus.

1. **Kogumistorustik** tuleb paigaldada hoone alla nii, et radoon eemaldatakse võimalikult ühtlaselt. Üldjuhul ehitatakse torustik perforeeritud plastist drenaažitorudest, mille alumine osa võib olla aukudeta, ja kasutatakse drenaažitorustiku ühendusliitmikke.
2. **Kollektortoru** ühendab kogumistorustikku väljatõmbetorustikuga. Enamasti ehitatakse see perforeerimata plasttorudest, näiteks sajuvee- või kanalisatsioonitorustikust, ja kasutatakse vastavate torustike tavapäraseid ühendusliitmikke.
3. **Väljatõmbetoru** juhib radooni pinnasest välisõhku. See tuleb ehitada tihedatest perforeerimata plasttorudest, näiteks sajuvee- või kanalisatsioonitorustikust. Torustiku horisontaalsed osad peavad olema kaldega kogumistorustiku poole. Hoones asuv torustik peab olema soojuslikult ja aurutihedalt isoleeritud näiteks vähemalt 9 mm paksuse poorkummiga.
4. **Reguleerklapp** õhuvooluhulga reguleerimiseks. Klapp toimib kõige paremini ventilaatori olemasolu korral.
5. **Katusest läbiviik** tuleb teha tihedalt, nii et välditakse vee sattumist katusekonstruktsiooni. Läbiviik tuleb valida katusekattele sobiv.
6. **Ventilaator** või vihmakate. Väljatõmbepüstiku otsa soovitatakse paigaldada ventilaator, mis töötab pidevalt ja tõhustab radooni eemaldamist pinnasest. Kui ventilaatorit ei paigaldata, tuleb püstiku otsa paigaldada vihmakate, mille abil välditakse sademete sattumist torustikku.
7. **Ventilaatori juhtpult** ventilaatori töö reguleerimiseks juhul, kui süsteemi juhitakse ruumides paiknevate radooniandurite ga.

Ventilatsioonitorustikuks sobib enamasti ≈110–160 mm läbimõõduga PVC toru, mis on põrandaaluses tsoonis perforeeritud. Põrandast ülevalpool peavad toru pöörded ja jätkud olema ühendatud õhutihedalt. Kogumistorustik paigaldatakse drenaažikihti, mille õhujuhtivus peab olema suurem kui ümbritseval pinnasel. Kogumistorustik tuleb paigaldada umbes 1,5 meetri kaugusele vundamendi välisperimeetrist ja ta peab olema tehtud perforeeritud plasttorudest, näiteks ühe- või kahekihilise seinaga drenaažitorud. Läbiminekud kandvatest seintest tuleb teha perforeerimata torudest (Joonis 3.33).



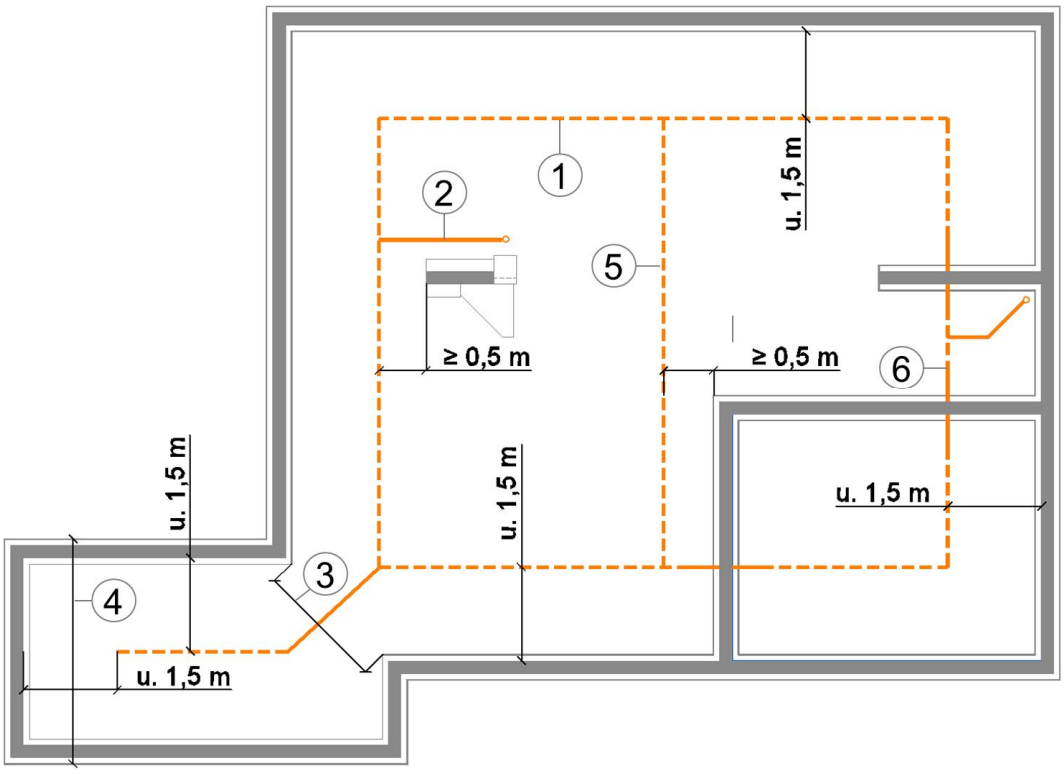
Joonis 3.33 Kogumistorustiku läbiminek kandvast seinast ja paiknemine pinnases.

Toru on soovitatav maja alt välja tuua sealt, kus see visuaalselt kõige vähem häirib. Samas tuleb jälgida, et õhu väljavoolukanal paikneks hoone avatavatest akendest ja ustest eemal või hoonest sellisel kaugusel, et radoon ei satuks uuesti hoonesse. Toru läbiviik läbi vundamendi tuleb tihendada, et vajaduse korral saaks ventilaatoriga tekitada põranda alla alarõhu. Õhutustoru võib juhtida õue ka läbi katuse, sel juhul tuleb toru läbiviik radoonimembraanist õhukindlalt tihendada. Olemasoleva hoone vanu korstnaid kasutades tuleb need hermetiseerida, paigaldades nendesse õhutiheda suka või toru. Kui ventilatsioonitoru kaetakse vihmakaitsega, tuleb tagada, et see ei tekitaks suurt rõhulangu. Hoone ümber paiknevad korgiga kaetud radooni väljavisketorud tuleb ilmastikukindlalt märgistada nii torule kui seinale, et need hiljem lihtsalt leida ja välistada tulevikus nendesse ekslikult vihmavee suunamist.

Radooni kogumistorustik paigaldatakse (RT 81-11099):
- ringtorustikuna,
- harutorustikuna või
- nende kombinatsioonina.

Ringtorustik

Ühepereeramutes või muudes väikestes hoonetes sobib kasutada ringselt paigaldatud kogumistorustikku (Joonis 3.34). Torustik tuleb paigaldada nii, et see ulatub iga vundamendiga eraldatud alasse hoone all. Kitsaste väljaulatuvate hooneosade alla võib paigaldada kogumistorustiku haru ja kui hoone on laiem kui 10 meetrit, tuleb ette näha hoone teljele lisaks üks perforeeritud radoonikogumistoru.



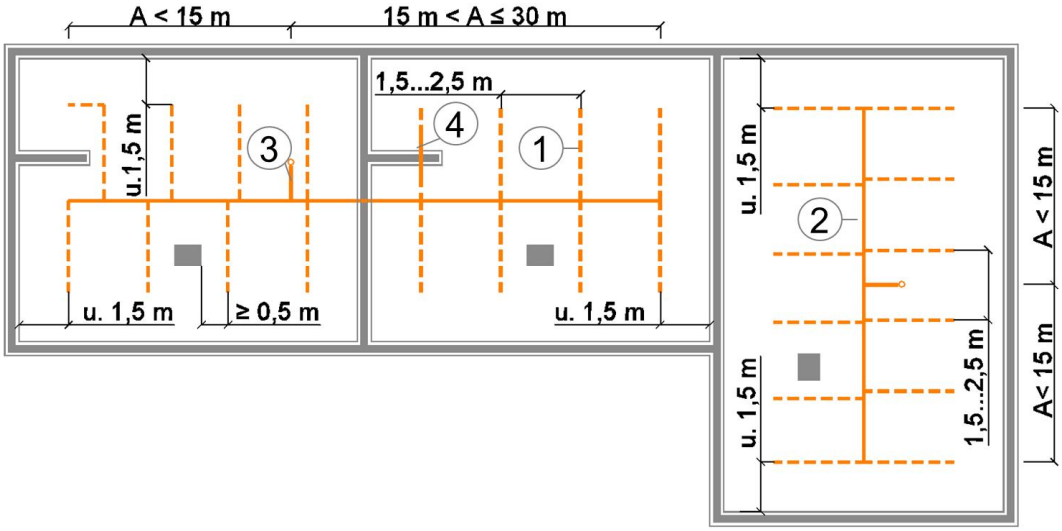
Joonis 3.34 Ringselt paigaldatud torustik.

Joonis 3.34 tähistatud torustiku osade kirjeldus.
1. Kogumistorustik tuleb teha perforeeritud plasttorudest:
   - kaugus välisseinast umbes 1,5 meetrit;
   - kaugus vundamendist ja kandvatest siseseintest vähemalt 0,5 meetrit.
2. Väljatõmbetorustik tuleb teha perforeerimata torudest.
3. Kui torustik läbib ala, kus kandvate seinte vaheline kaugus on väiksem kui 3 meetrit, tuleb kasutada perforeerimata torusid.
4. Kui hoone laius on väiksem kui 3–4 meetrit, võib kasutada ühte kogumistorustiku haru, mille ots peab olema suletud.
5. Kui hoone laius on üle 10 meetri, tuleb kasutada lisaks perforeeritud toru, mis paigaldatakse hoone teljele.
6. Läbiminekud kandvatest seintest tuleb teha perforeerimata torudest.

Harutorustik

Pikliku põhiplaaniga hoonetes on mõistlik paigaldada radooni kogumise torustik pinnasesse harudena (Joonis 3.35). Torustik koosneb perforeeritud harutorustikust ning tihedatest kollektor- ja väljatõmbetorudest. Süsteem tuleb dimensioneerida nii, et torustikus oleks võimalikult ühtlane alarõhk.

Kollektortorud tuleb paigaldada hoone teljele, mille külge harutorud ühendatakse ühtlase sammuga 1,5 kuni 2,5 meetrit. Kogumistorustik tehakse üldjuhul plastist drenaažitorudest ja kollektortorustik tihedatest kanalisatsiooni- või sajuveetorudest, mille põhja võib sajuvee ära juhtimiseks puurida iga 3 meetri järel 5 mm läbimõõduga augu. Kollektortorustiku otsad tuleb sulgeda. Kogumistorustik peab ulatuma iga vundamendi osa ja kandva seina taha.



Joonis 3.35 Harudena paigaldatud torustik.

Joonis 3.35 tähistatud torustiku osade kirjeldus.

1. Kogumistorustik tuleb teha perforeeritud plasttorudest:
   - kaugus kandvast seinast umbes 1,5 meetrit;
   - harude vundamendi pool asuvad otsad tuleb sulgeda;
   - kaugus vundamendist ja kandvatest siseseintest vähemalt 0,5 meetrit.
2. Kollektortorustik tuleb teha perforeerimata torudest, näiteks sajuvee- või kanalisatsioonitorudest.
3. Väljatõmbetorustik tuleb teha perforeerimata kanalisatsioonitorudest.
4. Läbiminekud kandvatest seintest tuleb teha perforeerimata torudest.

Väljatõmbetorustik

Väljatõmbetorustik tehakse plastist kanalisatsioonitorudest. Väljatõmbeharusid võib olla üks või mitu sõltuvalt sellest, kuidas on hoones võimalik torustiku erinevad osad omavahel ühendada ning väljatõmbepüstik läbi hoone ja katuse juhtida. Heitõhk tuleb välja juhtida nii, et oleks välistatud selle sattumine üldventilatsiooni õhuvõttu või avatavate akende lähedale.

Torustik tuleb paigaldada nii, et selle sisepinnale tekkiv kondensaat voolaks tagasi pinnasesse, st väljatõmbetorustiku horisontaalsed osad peavad olema kaldega perforeeritud kogumistorustiku poole. Torustiku ehitamise ajal peab radoonieemaldustorustik olema selgelt märgistatud nii, et seda ei oleks võimalik eksikombel ühendada hoone kanalisatsioonitorustikuga.

Läbiviigud

Läbiviigud tarinditest tuleb teha tihedalt ja katusel võib selleks kasutada spetsiaalseid torustiku-elemente. Torustik tuleb ehitada nii, et see ei kahjusta hoone tuleohutust (kasutada võib näiteks tuletõkkemansette või isolatsiooni).

Soojustus

Hoone all on temperatuur aastaringselt madalam kui hoones ja vältimaks kondensaadi teket väljatõmbetoru välispinnal, tuleb see hoones kogu pikkuses aurutihedalt soojustada näiteks poorkummi isolatsiooniga. Külmades ruumides paikneva torustiku soojustuse paksus sõltub hoone konstruktsioonist. Talvisel perioodil on hoone all õhk välisõhust soojem ja seetõttu võib katusel heitõhuotsiku või ventilaatori juures torustiku sisepinnal tekkida kondensaati või jääd. Seetõttu tuleb vältida lahendusi, kus kondensaat võib koguneda mõnda torustiku osasse.

Torustiku dimensioneerimine

Torustiku osade läbimõõdud vastavalt süsteemiosade pikkustele on toodud Tabel 3.2 ja Joonis 3.36. Kogumistoru minimaalne läbimõõt sõltub selle pikkusest ringtorustiku puhul ja hoone laiusest harutorustiku puhul. Väljatõmbe- ja kollektortorustiku minimaalne läbimõõt sõltub teenindatava ala kogumistorustiku pikkusest. Soovituslik on kasutada standardseid toru läbimõõte ja alati võib kasutada ettenähtust suuremaid torusid, aga mitte väiksemaid.

Ringtorustik

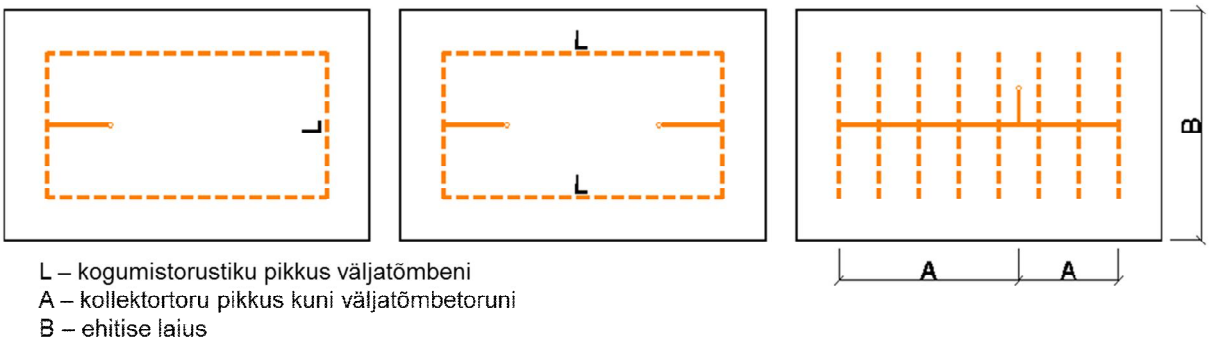
Ringtorustik tehakse tavaliselt ühe või kahe väljatõmbepüstikuga. Kui torustikuga on ühendatud kaks väljatõmbepüstikut, tuleb nende asukoht valida nii, et väljatõmbeühenduste vahele jäävate kogumistorustike pikkused (L) oleks sarnased. Kaks väljatõmbeühendust võib juhtida ühte püstikusse.

Harutorustik

Perforeeritud kogumistorustiku minimaalne läbimõõt sõltub hoone laiusest (B) ja kollektor- ja väljatõmbetorustiku läbimõõt kollektori pikkusest (A). Kollektortorustiku puhul tuleb arvestada selle pikkusega kuni väljatõmbeühenduseni. Väljatõmbetoru läbimõõtu valides tuleb arvestada selle külge ühendatud kollektortoru pikkusega.

Tabel 3.2 Torustiku osade läbimõõdud vastavalt süsteemiosade pikkustele.

Kogumistorustiku pikkus L, m	Kogumistoru läbimõõt, mm
L ≤ 30	≥ 80
30 < L ≤ 45	≥ 100
45 < L ≤ 70	≥ 130
Kollektortorustiku pikkus väljatõmbeni A, m	**Kollektortoru läbimõõt, mm**
A ≤ 15	≥ 100
15 < A ≤ 30	≥ 160
Hoone laius B, m	**Kogumistoru läbimõõt, mm**
B ≤ 10	≥ 65
10 < B ≤ 15	≥ 80



Joonis 3.36 Torustiku osade pikkused, mille põhjal dimensioneerida, kasutades torude läbimõõtusid.

Ventilaatori valik ja paigaldamine

Ventilaatori vajalik õhuvooluhulk sõltub pinnase õhuläbilaskvusest, radooni kogumise pindala suurusest ning ventilaatori tüübist ja efektiivsusest. Ventilaatori valikul tuleb arvestada ka vajadust õhuvoolu intensiivistada (tarindite soojus- ja niiskustehniline toimimine, õhurõhu erinevuse neutraliseerimine jne).

Katuselt välja toodud torus võib korstnaefekti tõttu tekkida loomulik tõmme, mis mõningal määral alandab radoonitaset põranda all. Kui radoonitase ruumis on siiski liiga kõrge, tuleb pööningule lisada ventilaator. Alarõhu tekitamisega hoone alla välditakse radooni tungimist hoonesse, kuna kaob konvektsiooni potentsiaal: õhurõhkude erinevus. Eri suurusega radoonikaevud võivad teenindada üht maja või majade rühma.

Lisaks tuleb veenduda, et ventilaator talub niiskust ja ventilatsioonitorusse sattunud vesi (sademed, veeauru kondensaat) saab läbi radoonikaevu põhja või pinnases paikneva perforeeritud toru pinnasesse imbuda. Kuna pinnase õhuvoolutakistus on suur, vajavad radooni kogumiskaevud enamasti mehaanilist väljatõmmet. Toru on soovitatav juhtida maja alt välja ilma radoonimembraani läbimata, kuid toru on võimalik välja juhtida ka maja keskelt, tihendades hoolikalt radoonimembraanist läbiviigu (vt peatükk 0). Kui projektlahendusena kavandatakse torustik toimima difusioonikanalina, siis ventilaatorit ei paigaldata. Siiski on väga soovitatav, et projekteeritakse ja ehitatakse välja valmidus hilisemaks ventilaatori paigaldamiseks (elektritoide, juhtimine). Sellisel juhul on ümberehitustööd oluliselt väiksemad, kui selgub, et difusioonile projekteeritud süsteem ei taga radooniohutust.

Ventilatsioonitoru väljaviskeava peab paiknema avatavatest akendest, ustest ja hoone üldventilatsiooni sissevõtuavadest eemal, parim väljaviskeava paiknemine on räästast kõrgemal. Torustiku väljaviskeava ei tohi olla pööningul, vaid toru peab ulatuma katusest välja. Ventilaator tuleb paigaldada torule eluruumidest kõrgemale (pööningule), et eluruumis paiknevas torus tagada alarõhk ja seeläbi vältida radooni lekkimist ruumi.

Ventilaatori õhuvooluhulk

Väljatõmbeventilaatori arvutuslik vooluhulk peab tagama pinnase ja siseruumi õhurõhuerinevuse vältimise. See õhurõhu erinevus tekib sise- ja välisõhu tiheduste erinevusest, tuulest või ventilatsiooni sissepuhke ja väljatõmbe õhuvooluhulkade erinevusest. Lisaks ventileerib süsteem ka pinnasest radooni välja. Ventilaatori arvutuslik õhuvooluhulk sõltub hoone suurusest ja pinnase õhujuhtivusest.

Kui pärast radoonitõrjesüsteemi väljaehitamist jääb mõõdetud radooni kontsentratsioon ruumis oluliselt alla 200 Bq/m^3, võib ventilaatori õhuvoolhulka vähendada. Ventilaatori õhuvooluhulga suurendamiseks tuleb teha hoonealuse pinnase soojus- ja niiskustehniline analüüs.

Väljatõmbeventilaator

Ventilaatorina tuleks kasutada väljatõmbepüstiku otsa paigaldatavat katuseventilaatorit. Teistel ventilaatoritel esineb torustikus suvel kondensaati ja talvel jäätumist ning seetõttu ei soovitata kasutada näiteks kanaliventilaatorit.

Vooluhulga seadistamine

Kõige efektiivsem vooluhulga seadistamise viis on reguleerida ventilaatori pöörlemiskiirust sagedusjuhtimise abil ning kasutades reguleerklappi. Reguleerklapp tuleb paigaldada kasutatavatest ruumidest kõrgemale, näiteks pööningule, sest klapist võib ruumi eralduda radooni. Kui väljatõmbeõhu vooluhulk on ettenähtust suurem, siis suureneb vundamendi jäätumisrisk ja suureneb ka hoone küttekulu.

Väljatõmbeõhu vooluhulga mõõtmiseks võib kasutada järgnevaid meetodeid:

- mõõtmine reguleerklapi abil,
- väljatõmbetorustikus õhukiiruse mõõtmine,
- väljatõmbetorustikku paigaldatud mõõteelemendi rõhulangu kaudu õhuvooluhulga leidmine.

Ventilaatori õhuvoolhulka tuleb kontrollida perioodiliselt, vähemalt iga kahe aasta järel.

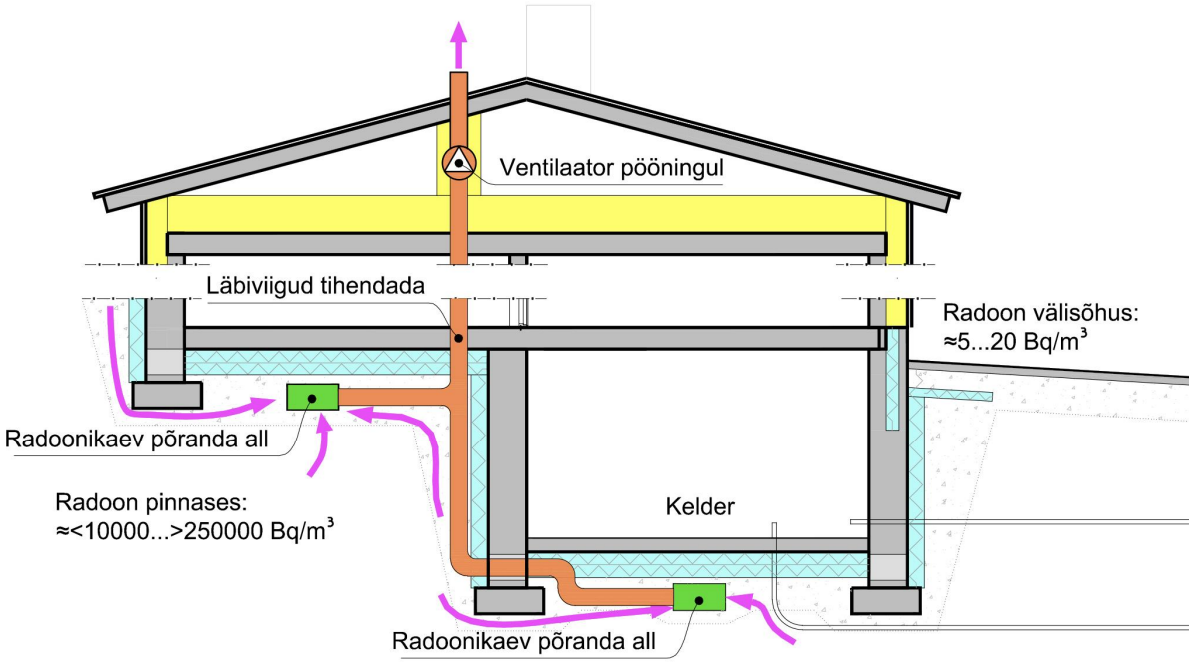
3.4.2 Radoonikogumiskaevud

Radoonikogumiskaev e radoonikaev koosneb kogumiskambrist, ventilaatorist ja ventilatsioonitorust (Joonis 3.37–Joonis 3.39). Eelistatuim koht kaevudele on hoonealuses pinnases, sest siis on kogu hoonealune ala kaetud kogumissüsteemiga kõige efektiivsemalt. Kui kogumiskaev paikneb hoone perimeetrist väljaspool, peab see asuma sügavamal kui hoone vundament. Samas ei tohi radoonikaev olla sügavamal kui pinnasevee piir: veega küllastunud pinnasesse ei ole võimalik alarõhku tekitada, mistõttu see süsteem ei toimi külmas kliimas.

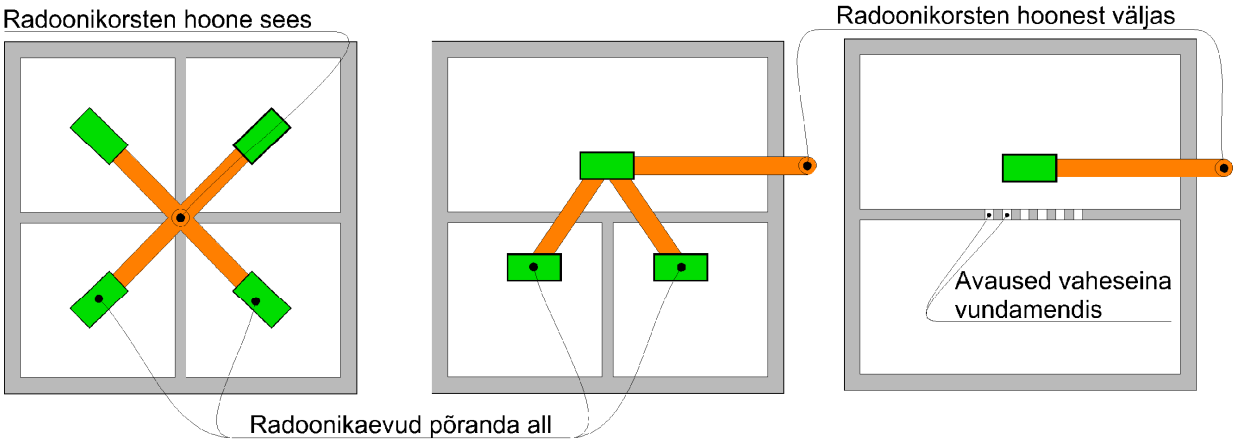
Kogumiskaevu saab rakendada radoonitõrjeks eelkõige hästi õhku juhtivates pinnastes, kuna siis jaguneb alarõhk ühtlaselt ja ulatuslikult üle kogu põrandaaluse ruumi. Vajaduse korral tuleb kaev ümbritseda kas geotekstiili või sõmera täitematerjaliga, et vältida peenemateralise pinnase imemist radoonikogumiskambrisse.

Radoonikaevuks võib olla perforeeritud seinaga kaev või toru läbimõõduga 400–1000 mm ja sügavusega 3,5–4,5 m. Toodetakse ka lihtsalt paigaldatavaid plastist valmistatud kaeve, mille mõõtmed on ligikaudu 400 x 400 x 250 mm (Joonis 3.40, vasakul). Kaevu võib ehitada ka tellistest, jättes piisavad õhuvahed (Joonis 3.40, paremal). Horisontaalsed vuugid peavad olema täidetud, et vältida kaevu varisemist pinnasega ümbritsemisel, kõik vertikaalsed vuugid peavad jääma lahti. Ehitusplatsil valmistatud kaevu soovitatavad välismõõdud on 600 x 600 x 300 mm, kaev kaetakse veekindla ehitusplaadi või jäiga soojususplaadiga, mille peale saab valada põranda.

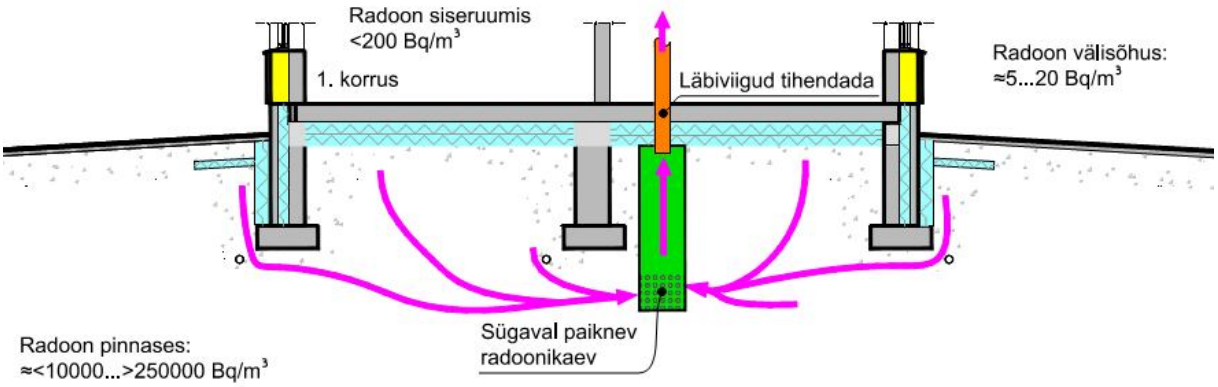
Kogumiskaevust tuleb õhk ventilatsioonitoru kaudu hoonest välja. Ventilatsioonilõõriks sobib enamasti ≈110–160 mm läbimõõduga PVC toru. Toru pöörded ja jätkud peavad olema ühendatud õhutihedalt. Toru on soovitatav maja alt välja tuua sealt, kus see visuaalselt kõige vähem häirib. Radoonikaevu õhu väljavoolukanal paigaldatakse hoonest sellisele kaugusele, et radoon ei satuks uuesti hoonesse. Toru läbiviik vundamendist tuleb tihendada, et vajadusel saaks ventilaatoriga tekitada põranda alla alarõhu. Õhutustoru radoonikaevust võib juhtida õue ka läbi katuse, sel juhul tuleb toru läbiviik radoonimembraanist õhukindlalt tihendada.



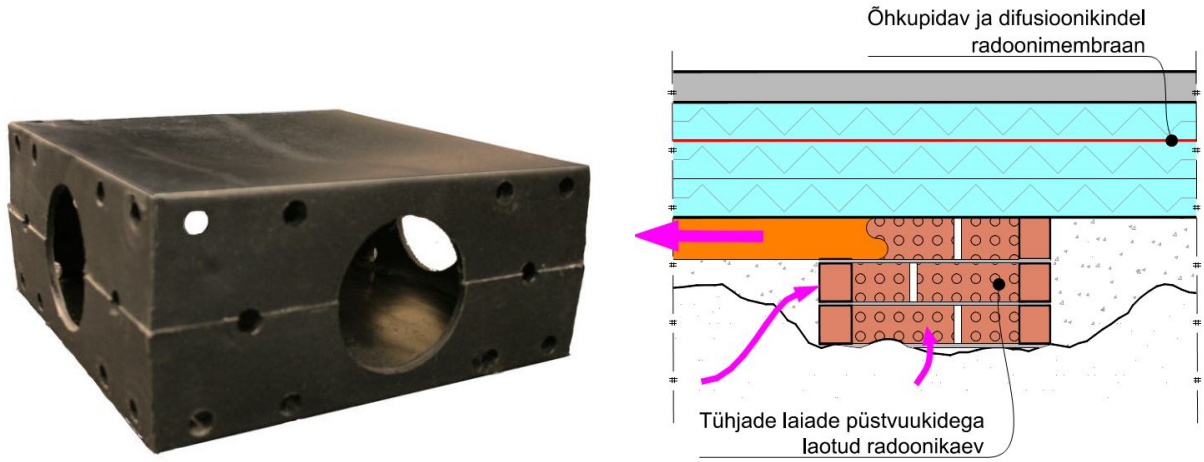
Joonis 3.37 Hoonealuse pinnase ventileerimine alarõhu meetodil.



Joonis 3.38 Radoonikaevude paiknemine plaanil: igas hoone vundamentidega eraldatud sektsioonis radoonikaev hoonevälise ja hoonesisese väljatõmbetoruga (vasakul ja keskel), üks radoonikaev kahesektsioonilises hoones, jättes vaheseina vundamenti avaused (paremal).



Joonis 3.39 Vundamendi taldmikust sügavamal paikneva radoonikaevu korral tuleb tagada, et kaevu ei satuks pinnasevesi.



Joonis 3.40 Tehases toodetud (vasakul) ja ehitusobjektil valmistatav (paremal) radoonikaev.

Olemasoleva hoone vanu korstnaid kasutades tuleb need hermetiseerida, paigaldades nendesse õhutiheda suka või toru. Kui ventilatsioonitoru kaetakse vihmakaitsega, tuleb tagada, et see ei tekita suurt rõhulangu.

Ventilaatori vajalik õhuvooluhulk sõltub pinnase õhuläbilaskvusest, radooni kogumise pindala suurusest ning ventilaatori tüübist ja efektiivsusest. Katuselt välja toodud torus võib korstnaefekti tõttu tekkida loomulik tõmme, mis vähendab mõningal määral radoonitaset põranda all. Kui radoonitase ruumis on siiski liiga kõrge, tuleb pööningule lisada ventilaator. Alarõhu tekitamisega hoone alla välditakse radooni tungimist hoonesse, kuna kaob konvektsiooni potentsiaal: õhurõhkude erinevus. Eri suurusega radoonikaevud võivad teenindada üht hoonet või hoonete rühma.

Lisaks tuleb veenduda, et ventilaator talub niiskust ja ventilatsioonitorusse sattunud vesi (sademed, veeauru kondensaat) saab läbi radoonikaevu põhja või pinnases paikneva perforeeritud toru pinnasesse imbuda. Kuna pinnase õhuvoolutakistus on suur, peab radooni kogumise kaevudel olema enamasti mehaaniline väljatõmme. Toru on soovitatav juhtida maja alt välja ilma radoonimembraani läbimata, kuid toru on võimalik välja juhtida ka maja keskelt, tihendades radoonimembraanist läbiviigu hoolikalt (vt peatükk 0). Kui projektlahendusena kavandatakse torustik toimima difusioonikanalina, siis ventilaatorit ei paigaldata. Siiski on väga soovitatav, et projekteeritakse ja ehitatakse välja valmidus hilisemaks ventilaatori paigaldamiseks (elektritoide, juhtimine). Sellisel juhul on ümberehitustööd oluliselt väiksemad, kui selgub, et difusioonile projekteeritud süsteem ei taga radooniohutust.

Ventilatsioonitoru väljaviskeava peab paiknema avatavatest akendest, ustest ja hoone üldventilatsiooni sissevõtuavadest eemal, parim väljaviskeava paiknemine on räästast kõrgemal. Torustiku väljaviskeava ei tohi olla pööningul, vaid toru peab ulatuma katusest välja. Ventilaator tuleb paigaldada torule eluruumidest kõrgemale (pööningule), et eluruumis paiknevas torus tagada alarõhk ja seeläbi vältida radooni lekkimist ruumi.

Hoone ümber paiknevad korgiga kaetud radooni väljavisketorud tuleb ilmastikukindlalt märgistada nii torule kui seinale, et need hiljem lihtsalt leida ja välistada tulevikus nendesse ekslikult vihmavee suunamist.

Pinnase õhuläbivus määrab ära radoonikaevude vahemaa ja tööulatuse. Kui pinnas on ühtlase koostisega ja õhku hästi juhtiv, on ühe radoonikaevu mõjuala < 250 m^2 või < 15 m kaevust.

Tüüpilisele eramule piisab tavaliselt ühest radoonikaevust maja keskosas (Joonis 3.31). Kui hoonealune pind on siseseinte vundamentidega jagatud mitmeks piirkonnaks, tuleb üldjuhul igasse piirkonda paigaldada eraldi radoonikaev (Joonis 3.38). Kõrvuti asetsevates piirkondades paiknevad radoonikaevud võib torudega kokku ühendada ja teha hoonest ühe väljaviigu, millele saab paigaldada ventilaatori (Joonis 3.38). Erandina on samal joonisel esitatud kahesektsioonilise hoone radoonikaev, kus kandva vaheseina vundamenti on jäetud avad õhu vaba liikumise tagamiseks sektsioonide vahel. Teise alternatiivse lahendusena on toodud allpool

vundamendi taldmiku tasapinda paiknev radoonikaev (Joonis 3.39, vasakul). Sellise kaevu kaks eeldust on hea õhujuhtivusega pinnas ja radoonikaevu aluspinnast aastaringselt sügavamal olev pinnaseveetase.

Ventilaatorite ja torustiku dimensioneerimises võib juhinduda eelmise peatüki soovitustest.

3.5 Keldriga hoone

Hoone keldrisse on radooni siseruumidesse tungimise oht kõige suurem, kuna
- pinnasega kontaktis olevate tarindite pindala on suurem;
- tarindid ulatuvad sügavamatesse pinnasekihtidesse, kus radoonitase võib olla kõrgem.

Seetõttu tuleb keldriga hoonetes pöörata radooniohutusele erilist tähelepanu. Isegi kui keldris ei ole elu- või tööruume, tuleb rakendada radoonitõkke meetmeid, kuna keldriruumidesse sisenenud radoon võib liikuda elu- või tööruumidesse.

Keldriga hoones tuleb erilist tähelepanu pöörata:
- konstruktsiooni ja selle liitekohtade tiheduse tagamisele (Joonis 3.19 ja Joonis 3.30);
- ventileerimise ja rõhuerinevuse vältimisele/tagamisele.

Radoonitõrje meetmetest võib rakendada eelloetletud lahendusi.

3.6 Ventilatsiooni aspektid radooniohu vähendamisel

Ruumide ventileerimine on möödapääsmatu eeldus radooniohutule ehitamisele. Ventilatsiooniga viiakse ruumist välja ruumiõhus esinevad kahjulikud ained, sh radoon. Välisõhus on radoonitase väga madal ja seetõttu on värske õhu ruumi juhtimine väga efektiivne moodus radoonitaseme alandamiseks. Suurem õhuvahetus tagab madalama saastetaseme, kuid sellega kaasneb suurem energiakulu ja seega on ventilatsiooni kavandamisel otstarbekas kasutada efektiivseid (soojustagastuse efektiivsus, ventilaatori elektrikasutus) lahendusi. Radooni vältimise seisukohalt on oluline jälgida, et ventilatsiooniga ei tekitataks alarõhku, mis suurendab radooni hoonesse sisenemist läbi põranda ja sokli ebatiheduste. Toimiv ja efektiivne ventilatsioon ei ole oluline mitte ainult radoonitõrjeks, vaid on vajalik ka tervisliku sisekliima tagamiseks.

Hoonete projekteerimisel määratakse õhuvahetus kas vastavate normarvude või ohtlike ainete eraldumise järgi. Ventilatsiooni mõju ruumide radoonitasemele avaldub eelkõige õhuvahetuse internsiivsuse ja üle hoonepiirete oleva õhurõhu erinevuse kaudu. Üldjuhul tagab piisav õhuvahetus ja tasakaalus ventilatsioon siseruumides madala radoonitaseme ning radooni tõttu ei ole vaja õhuvooluhulkasid suurendada. Normatiivsed õhuvooluhulgad on toodud asjakohastes määrustes (Energiatõhususe miinimumnõuded, Hoonete energiatõhususe arvutamise metoodika, Sisekliima) ja standardites (EVS-EN 15251, EVS 916 ja EVS 845).

3.6.1 Ruumiõhu radoonisisalduse vähendamine õhuvooluhulkade suurendamise abil

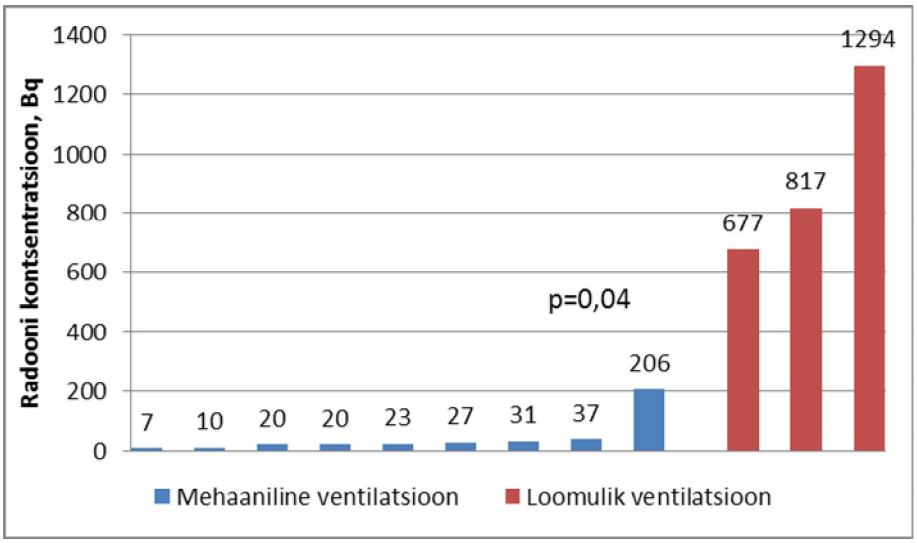
Radooniprobleemide korral on olemasolevas hoones peamisteks parandusmeetmeteks ventilatsiooni tõhustamine ja kasutusel ruumide isoleerimine kõrge radoonitasemega keskkonnast, näiteks mittekasutatav kelder või pinnas. Ventilatsiooni õhuvooluhulga suurendamisega on võimalik saasteainete, sh radooni kontsentratsiooni vähendada hoone õhus. Kuna radooni puhul on tegemist eelkõige saastega pinnasest, on oluline nii õhuvahetuse intensiivsus kui ka üle hoonepiiretel olev õhurõhu erinevus. Kui õhuvahetuse intensiivistumisega kaasneb suurem alarõhk, siis radooni kontsentratsioon ei pruugi langeda. Sellepärast on vaja lahendada ruumide ventileerimine sissepuhke-väljatõmbeventilatsiooniga. Et ruumide õhuvahetuse tagamisel ei oleks takistuseks energiatarbe suurenemine, on tähtis varustada ventilatsioonisüsteem soojustagastusega, nii et ventilaatorid ei tarbiks palju elektrit. Oluline on pöörata tähelepanu ka ventilaatorite müraisolatsioonile ja süsteemi toimimise jälgitavusele. Toimiv ventilatsioon pole oluline ainult radoonitõrje aspektist, vaid ka tervisliku sisekliima tagamiseks.

Kui uues hoones esineb lubatust suurem radooni kontsentratsioon, tuleks kõigepealt kontrollida, kas projekteeritud ventilatsioon vastab nõuetele ning kas väljaehitatud ventilatsioonisüsteem vastab projekteeritule. Vanades hoonetes tuleb kontrollida, kas ventilatsioonilõõrid on lahti ja puhtad, ning teha kindlaks, kas ruumidevaheline õhuliikumine ei ole tõkestatud. Kui ventilatsioonisüsteem vastab projekteeritule ja hoones on lubatust kõrgem radoonitase, võib olukorra parandamiseks kasutada täiendavaid ventileerimismeetmeid.

Kuna paljud uuringud on osutanud, et loomulik õhuvahetus ei toimi Eesti kliimatingimustes (ebapiisavad õhuvooluhulgad, energiatõhusus, soojuslik mugavus, filtreerimise võimalikkus jne), tuleb õhuvooluhulkade suurendamise korral mõelda eelkõige sissepuhke-väljatõmbe-ventilatsiooni paigaldamisele, sest siis on lahendatud ka soojusliku mugavuse, energiatõhususe, akustika, õhukvaliteedi jne aspektid. Lasteaedades ja koolides tehtud mõõtmised näitavad, et mehaanilise ventilatsiooniga on normikohase radoonitaseme tagamine tavapärane, kuid loomuliku ventilatsiooniga ületatakse radoonitaseme piirmäära (Joonis 3.41).

Õhuvahetus ruumides koosneb nii kontrollitavast (ventilatsioon) kui kontrollimatust (õhulekked läbi hoonepiirete) õhuvahetusest. Hoonete energiatõhususe parandamisel on kontrollimatu õhuvoolu vähendamine alati üks eesmärk. Seetõttu on oluline hoonete energiatõhususe parandamisel pöörata tähelepanu ruumi õhuvahetuvuse tagamisele renoveerimisjärgses olukorras.

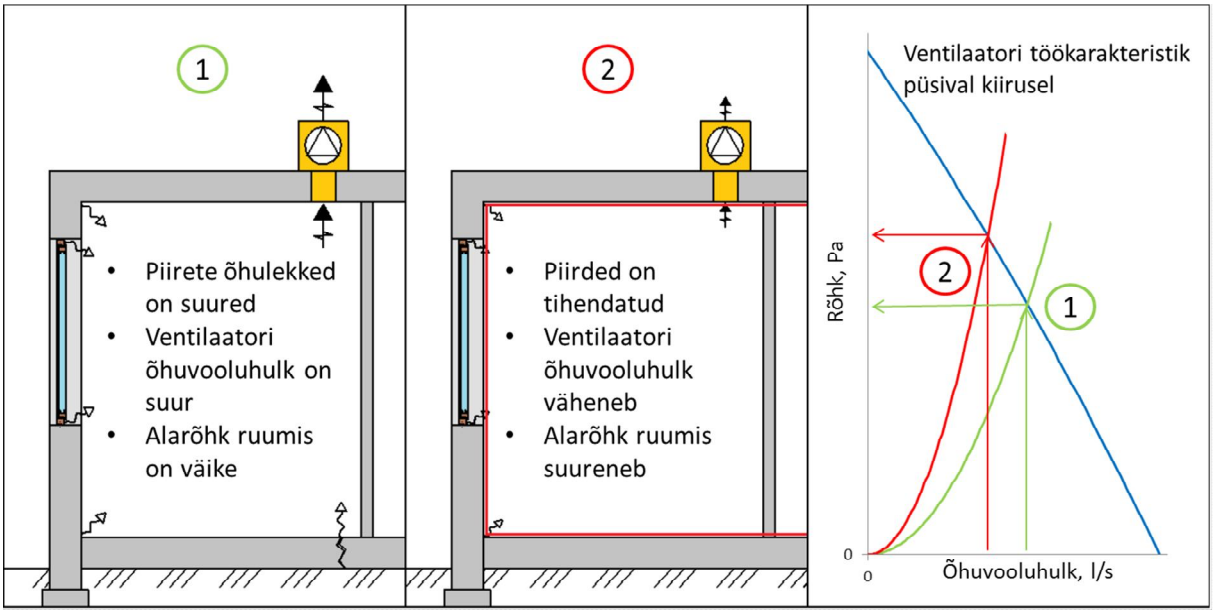
Samas tuleb silmas pidada, et teatud juhtudel ei pruugi uus ventilatsioonisüsteem soovitud tulemusi anda, vaid tuleb tegeleda ka piirdetarindite tihendamisega.



Joonis 3.41 Radooni kontsentratsioon on mehaanilise ventilatsiooniga koolihoonetes ja lasteaedades oluliselt väiksem. Loomulik ventilatsioon ei ole ruumide ventileerimiseks piisav.

3.6.2 Siseruumides suure alarõhu vältimine

Paljudes vanades hoonetes on kasutatud väljatõmbeventilatsiooni, mis tekitab ruumides alarõhu ning välisõhk imetakse ruumi läbi värskeõhuklappide ja piirete ebatiheduste. Koos välisõhuga jõuab ruumi ka pinnases sisalduv radoon. Joonis 3.42 on näidatud, kuidas muutub piirete tihendamise järel alarõhk ruumides, kus on mehaaniline väljatõmbeventilatsioon. Ebatihedate piirete puhul läbivad õhk ja teised gaasid need kergesti ning piisava õhuvahetuse tagamiseks on vaja väiksemat alarõhku (joonisel tähis „1“). Piirete tihendamisega õhulekked vähenevad ja kui ventilaatori pöörlemiskiirust ei suurendata, väheneb õhuvooluhulk, suureneb alarõhk ning radooni kontsentratsioon tõuseb (joonisel tähis „2“). Selleks et tagada varasem õhuvahetus, peab paigaldama värskeõhuklapid või suurendama ventilaatori pöörlemiskiirust ja seeläbi veelgi alarõhku (joonisel tähis „3“). Radooniohutuse ja energiatõhususe seisukohast on mehaaniline väljatõmbeventilatsioon köetavates ruumides sobimatu ning hoone renoveerimisel tuleks paigaldada soojustagastusega sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon.



Joonis 3.42 Piirete tihendamisega suureneb mehaanilise väljatõmbega tekitatud alarõhk ruumis ja seeläbi radooni kontsentratsioon.

Mehaaniline soojustagastusega sissepuhke-väljatõmbeventilatsioon võib külmade ilmade korral tekitada hoonesse alarõhu, mis tõstab radoonitaset ruumides ja suurendab energiatõhusust. Ventilaatorite mahuvooluhulk [m^3/h] on sõltumata õhutihedusest konstantne ja selle muutumisel muutub ventilaatori massivooluhulk [kg/h]. See mõjutab sissepuhke- ja väljatõmbe õhuvooluhulkasid välistemperatuuri muutudes.

Õhutihedus sõltub peamiselt selle temperatuurist. Aasta jooksul muutub õhutemperatuur ventilaatorite juures ning seeläbi ka ventileeritava õhu massivoolhulk.

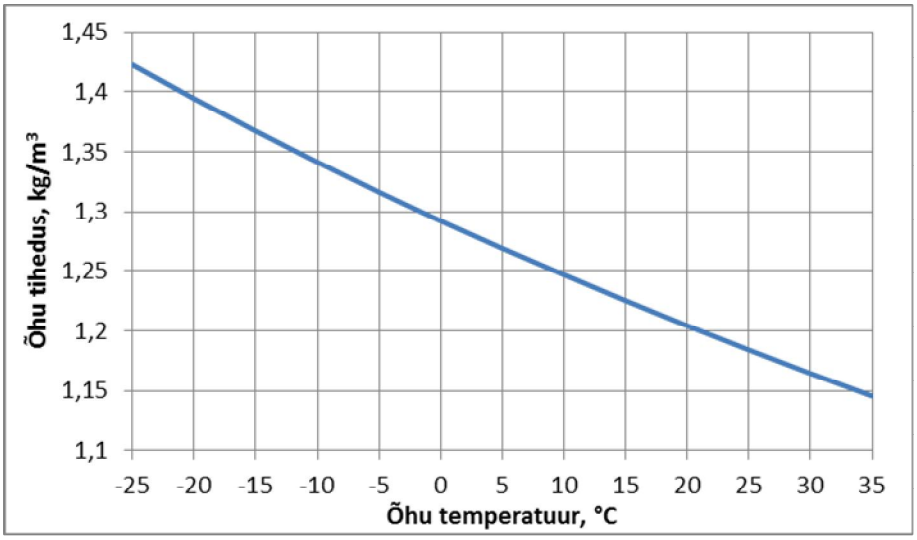
Õhutihedust saab arvutada valemiga:

$$\rho = \frac{P_{atm} \cdot M}{R \cdot T} \tag{3.1}$$

kus

ρ	õhutihedus, kg/m^3
P_{atm}	õhurõhk, Pa (normaalrõhk 101 325 Pa)
M	molaarmass (29 kg/kmol)
R	ideaalgaasi konstant, 8315 J/(kmol·K)
T	temperatuur, K

Joonis 3.43 iseloomustab õhutiheduse muutumist sõltuvalt selle temperatuurist, nt –20 °C välisõhk on +20 °C ruumiõhust u 15% raskem.



Joonis 3.43 Kuiva õhu tiheduse sõltuvus temperatuurist atmosfääri normaalrõhul

Järgnevalt on toodud näiteid, kuidas see nähtus mõjutab ruumide õhuvahetust ning kuidas vältida ruumides alarõhu tekkimist efektiivse ventilaatorite pöörlemiskiiruse juhtimisega.

Automaatika hoiab ventilaatorite massivooluhulgad konstantsed

Ventilatsiooni automaatika hoiab ventilaatorite massivooluhulgad konstantsed ning väldib nende muutumist välistemperatuuri muutudes.

Joonis 3.44 on lihtsustatult kujutatud olukorda, kus automaatika jälgib õhuvooluhulka ventilaatorite juures (FE) ning mõõtes temperatuuri (TE) arvutatakse automaatselt massivooluhulgad. Automaatika tagab sissepuhkeventilaatorit reguleerides, et magistraaltorustikus oleks konstantne staatiline rõhk (PE) ning väljatõmbeventilaatori pöörlemiskiirust reguleeritakse nii, et massivooluhulgad süsteemi sissepuhke- (2) ja väljatõmbetorustikes (3) vastavad ettenähtule. Sellise juhtimispõhimõttega ventilatsioonisüsteem ei tekita ruumides olulist alarõhku, mis põhjustaks suurenenud radoonisisaldust või energiatarbimist.

Massivooluhulga arvutamise valem on

$$\dot{m}_{M,i} = \dot{V}_{V,i} \times \rho \qquad (3.2)$$

kus

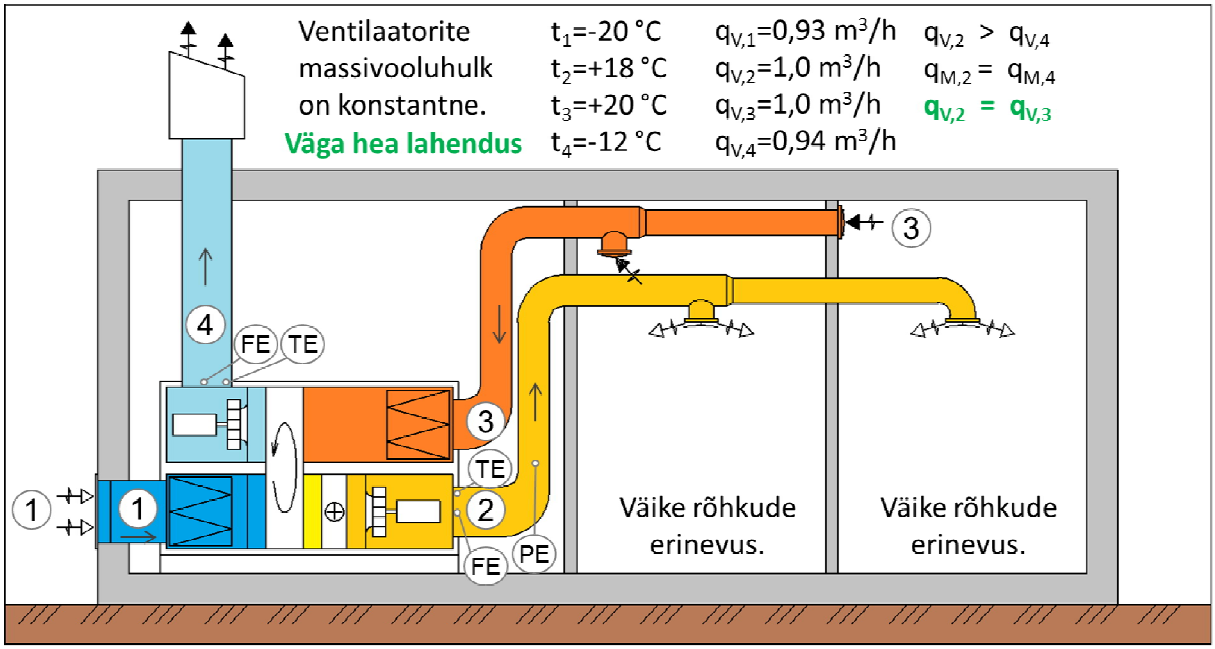
$\dot{m}_{M,i}$ õhu massivooluhulk, kg/h

$\dot{V}_{M,i}$ õhu mahuvooluhulk, m^3/h

ρ õhutihedus, kg/m^3

Automaatika kasutamise puhul on äärmiselt oluline, et ventilatsioonisüsteem tasakaalustatakse võimalikult täpselt. Selleks on vaja koostada detailne tööprojekt, kus on ära märgitud reguleerklappide ja torustiku lõppelementide õhuvooluhulgad ning seadearvud. Projekt võetakse aluseks ehitatud süsteemi tasakaalustamisel, kontrollitakse vooluhulkasid ning vajadusel korrigeeritakse reguleerelementide asendeid.

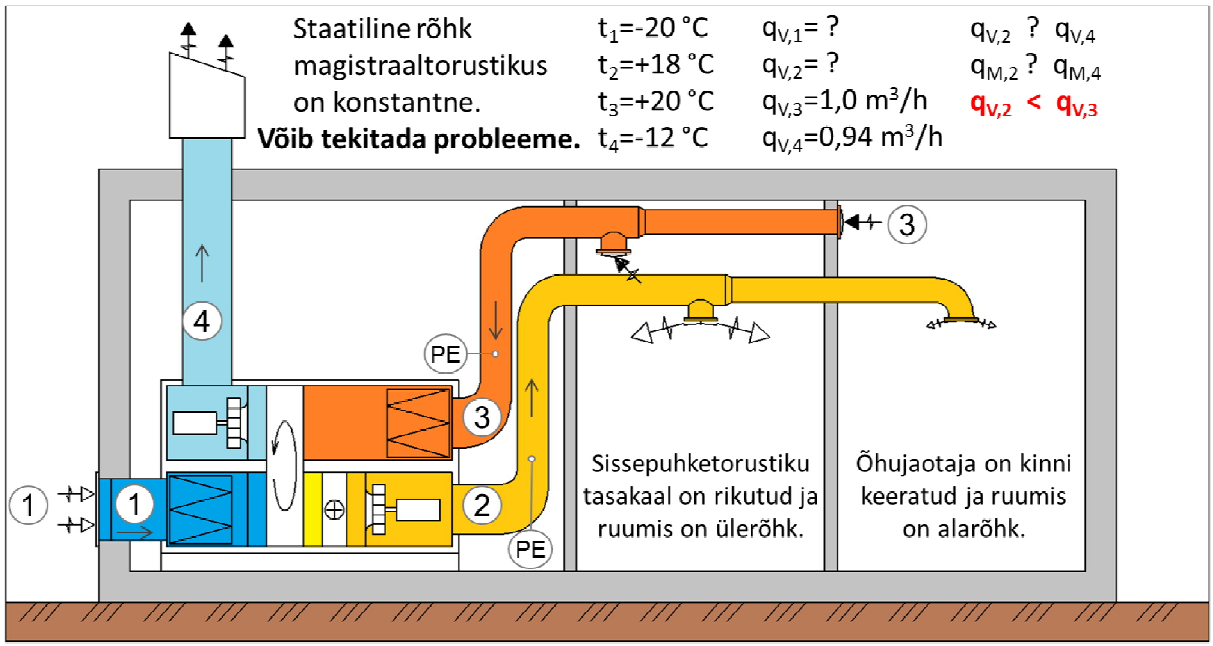
Tänapäevased parimad ventilatsiooniseadmed võimaldavad õhuvooluhulka määrata 2–3% täpsusega, kuid sellest pole kasu, kui torustiku tasakaalustamise tulemusel on sissepuhke ja väljatõmbe õhuvooluhulkade erinevus on näiteks 5% või rohkem.



Joonis 3.44 Soojustagastiga ventilatsioonisüsteem, mille automaatika hoiab ventilaatorite massivooluhulgad aastaringselt konstantsed. Lisatud on temperatuurid t_i, õhuvooluhulgad $q_{V,i}$ ja massivooluhulkade $q_{M,i}$ suhted erinevates süsteemiosades.

Konstantne staatiline rõhk magistraaltorustikus

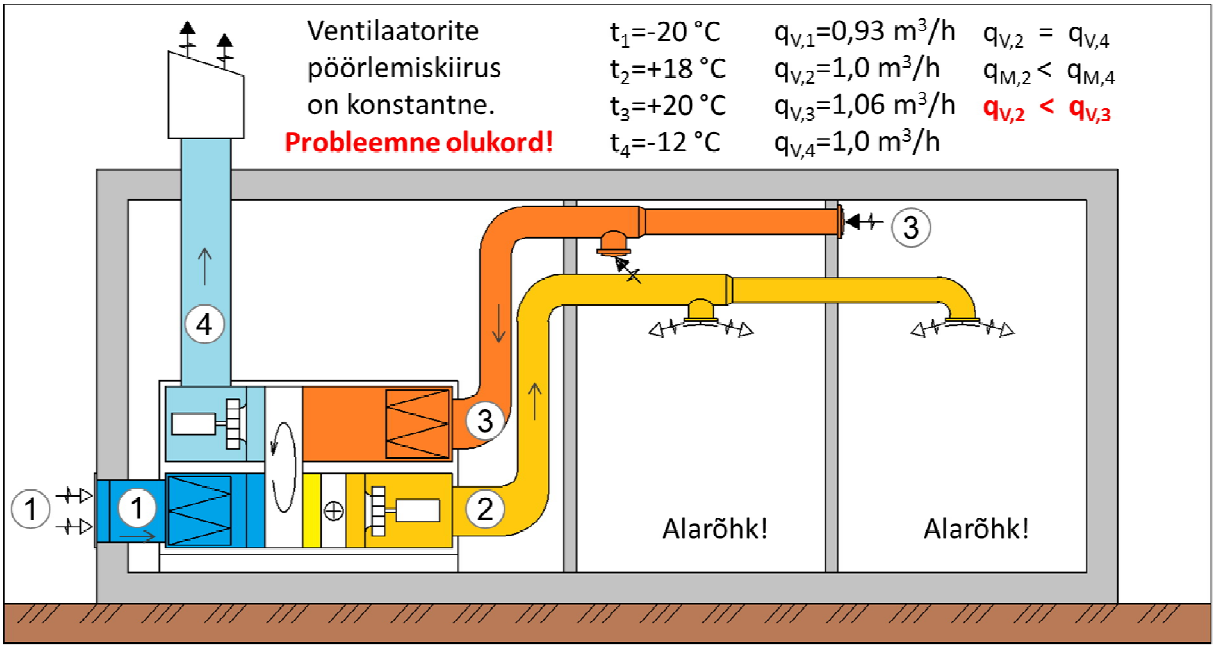
Välistemperatuuri muutusest põhjustatud õhu massivooluhulkade muutust aitab vähendada magistraaltorustikus konstantse staatilise rõhu hoidmine. See on parem lahendus, kui ventilaatorite konstantne pöörlemiskiirus, kuid võib olla ka mõningaid probleeme alarõhu tekkimisega. Joonis 3.45 on lihtsustatult kujutatud olukord, kus sissepuhke- (2) ja väljatõmbetorustikes (3) mõõdetakse staatilist rõhku (PE) ning automaatika juhib ventilaatorite pöörlemiskiirust nii, et rõhk torustikus püsiks konstantne. Torustiku takistus ei muutu, kui selle elemente ei reguleerita omavoliliselt. Õhuvooluhulgad ei muutu oluliselt, sest õhutemperatuur ventilatsiooniseadmest ruumi poole jäävas torustikus ei muutu samuti oluliselt. Kui praktikas reguleeritakse omavoliliselt ventilatsiooni õhujagajaid, millest üks võimalik variant on näidatud ka Joonis 3.45, siis osas ruumides võib tekkida alarõhk ning puudub ülevaade sellest, kuidas ventilatsioon tegelikult töötab. Kirjeldatud lahendust võiks soovitada juhul, kui kasutatakse õhujagajaid, plafoone ja reste, mille asendit on keeruline omavoliliselt reguleerida.



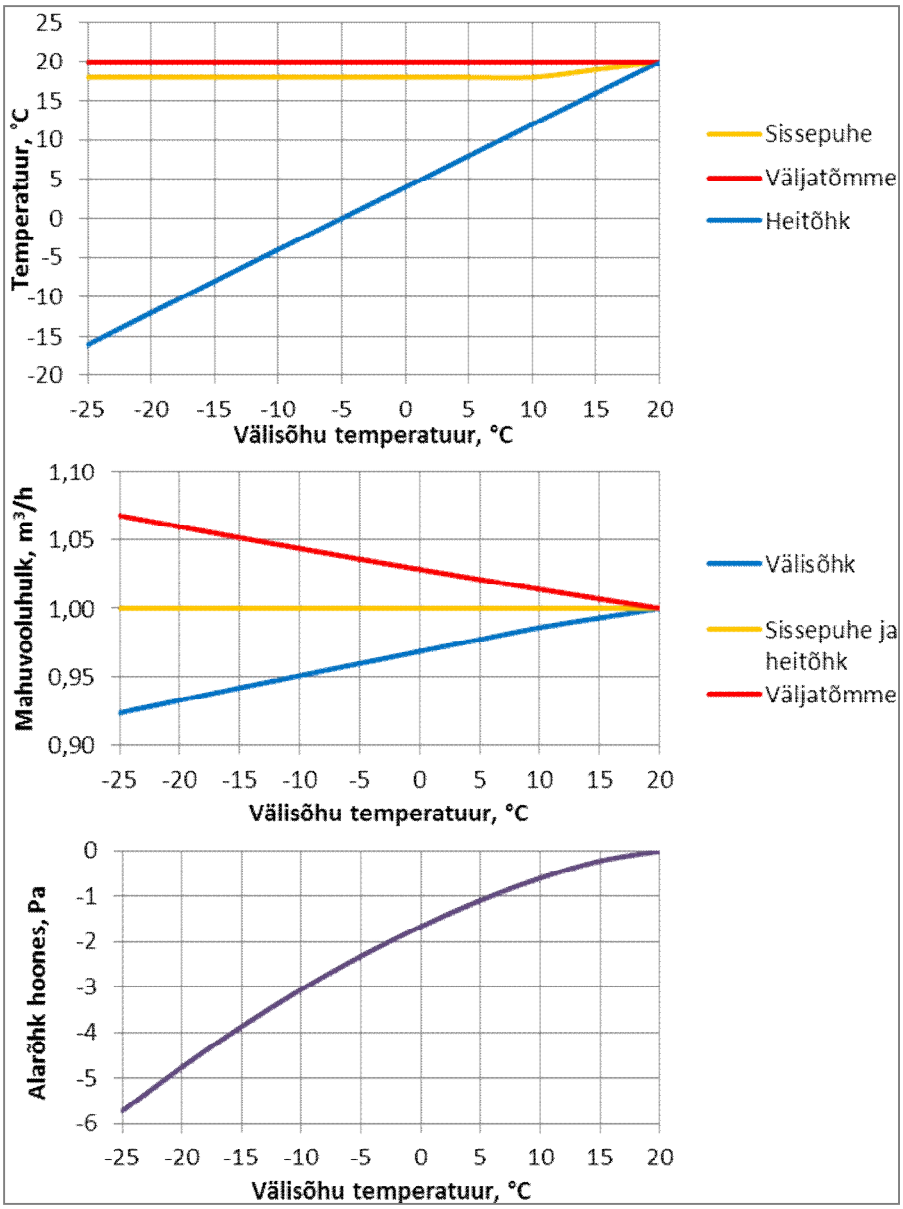
Joonis 3.45 Soojustagastiga ventilatsioonisüsteem, mille automaatika hoiab ventilaatorite massivooluhulgad aastaringselt konstantsed. Lisatud on temperatuurid t_i, õhuvooluhulgad $q_{V,i}$ ja massivooluhulkade $q_{M,i}$ suhted erinevates süsteemiosades.

Ventilaatorite pöörlemiskiirus on konstantne

Kui ventilaatorite pöörlemiskiirus on konstantne, võib külmade ilmade korral tekitada ventilatsioon hoonesse alarõhu, mis tõstab radoonitaset ruumides. Seetõttu on see mittesoovitatav lahendus. Joonis 3.46 on lihtsustatult kujutatud olukord, kus ventilaatorite pöörlemiskiirus on aastaringselt konstantne ning seetõttu on külma ilmaga ruumides alarõhk. Agregaat on seadistatud nii, et mõlemad ventilaatorid hoiavad püsivalt õhuvooluhulka ja kuna soojustagasti on heitõhu (t_4) maha jahutanud, on väljatõmbeõhu mahuvooluhulk ($q_{V,3}$) suurem kui sissepuhkeõhu mahuvooluhulk ($q_{V,2}$), mis omakorda põhjustab ruumides alarõhku ja läbi põranda imbub pinnasest ruumi radooniga saastatud õhku.



Joonis 3.46 Soojustagastiga ventilatsioonisüsteem, mille ventilaatorite pöörlemiskiirus on aastaringselt konstantne. Lisatud on temperatuurid t_i, õhuvooluhulgad $q_{V,i}$ ja massivooluhulkade $q_{M,i}$ suhted erinevates süsteemiosades.



Joonis 3.47 Erinevate õhuvoolude temperatuurid ja mahuvooluhulgad sõltuvalt välisõhu temperatuurist.

Joonis 3.47 on näidatud erinevate õhuvoolude temperatuurid ja mahuvooluhulgad sõltuvalt välisõhu temperatuurist, kui ventilaatorite pöörlemiskiirust ei reguleerita. Välisõhu temperatuuri langedes langeb heitõhu temperatuur ning sellest tulenevalt suureneb väljatõmbeõhu mahuvooluhulk ning suureneb alarõhk ruumides.

3.6.3 Radooni kontsentratsiooni kontroll ruumis

Normaalse ja kõrge radoonisisaldusega piirkondades tuleb pärast hoone kasutuselevõttu esimesel talvel teha siseõhu radoonisisalduse kontrollmõõtmised esimesel korrusel või aktiivses kasutuses olevates keldriruumides (elu- või tööruumid). Mõõtmisi on soovitatav korrata ka järgnevatel aastatel veendumaks, et hoone konstruktsioonidesse pole tekkinud pragusid, kust radoon võib pääseda hoonesse.

Juhul kui mõõdetud tulemus ületab 200 Bq/m^3, tuleb välja selgitada ruumiõhu suure radoonisisalduse põhjus ja see ehituslike meetmetega likvideerida.

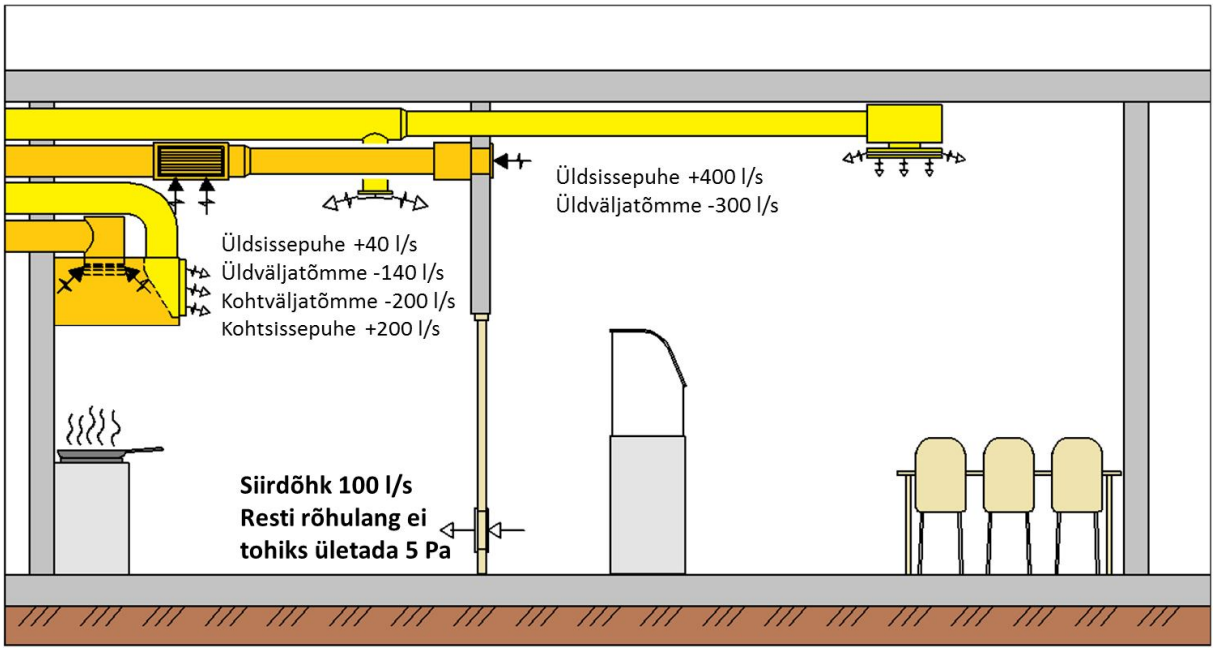
3.6.4 Ventilatsiooniga radooniohutuse tagamine

Kompensatsiooniõhuga ruumid

Kui kõrvuti asetsevad ruumid, mille õhu puhtusklass on erinev, tuleb kavandada ruumide õhubilanss nii, et välditakse ruumide ventilatsiooni erinevast töörežiimist suure alarõhu tekkimist ja sellega pinnasest radooni siseruumidesse imamist. Näiteks tuleb söökla ruumides, kus väljatõmme on suurem kui sissepuhe, ette näha takistamatu kompensatsiooniõhu juurdevool, et vältida suure alarõhu ja seeläbi radooniohu tekkimist.

Joonis 3.48 on näidatud söökla õhubilanss ning siirdõhu liikumine. Köögi üldväljatõmme on üldsissepuhkest suurem ning selleks et kogu söökla õhubilanss oleks tasakaalus, on söögisaali sissepuhe suurem kui väljatõmme. Vältimaks suure alarõhu tekkimist köögis, tuleb ette näha piisavalt suure pindalaga siirdõhu liikumistee, nagu näiteks siirdõhurest ukses rõhulanguga maksimaalselt 5 Pa.

Samasuguseid projekteerimispõhimõtteid tuleks järgida ka näiteks riietus-, duši- ja tualettruumide puhul. Köögis peaks toiduvalmistamisseadmete kohalt olema ka kohtväljatõmme ja selle kompenseerimiseks sama õhuvooluhulgaga sissepuhe.



Joonis 3.48 Söökla köögi ja söögisaali õhubilanss ning siirdõhu liikumine.

Vajaduspõhise õhuvooluhulgaga ruumid

Klassiruumide ja nõupidamisruumide õhuvooluhulgad on suhteliselt suured, kuid ruumide kasutusaeg on väga muutuv ja seetõttu võiks õhuvahetust reguleerida vastavalt vajadusele.

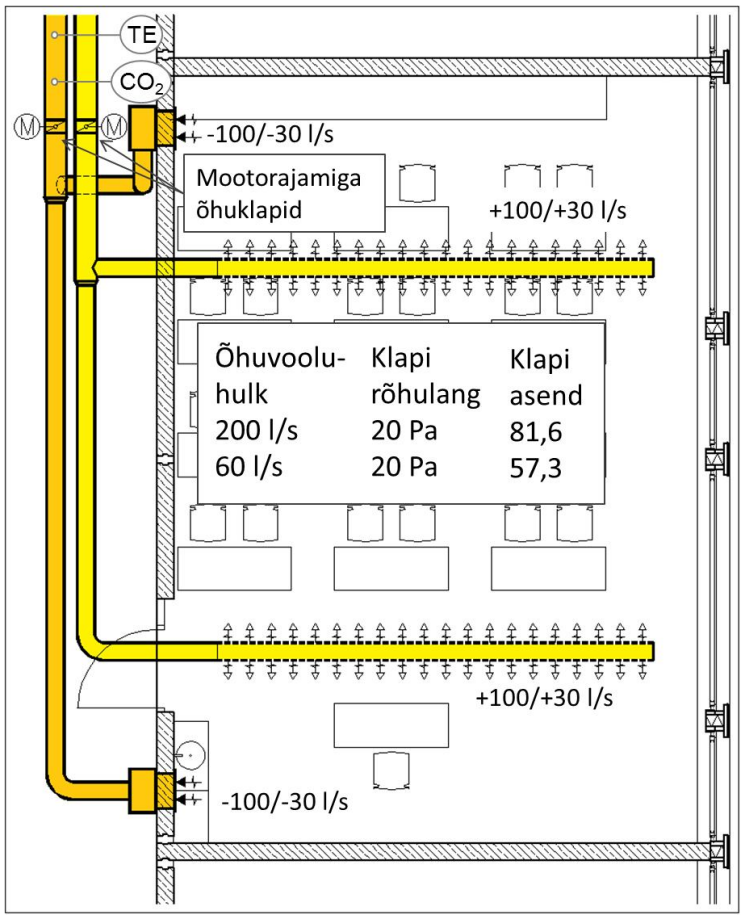
Joonis 3.49 on esitatud lahendus, kus klassiruumi õhuvahetust juhitakse *on-off* mootorajamiga varustatud kaheastmeliste reguleerklappide abil nii, et kõrgema astme õhuvooluhulk on ±200 l/s ja madalama astme ±60 l/s.

Väljaspool hoone kasutusaega ventilatsiooniseade ei tööta ning sel ajal klassiruumides õhuvahetus puudub. Reguleerklapid on seadistatud reguleerelemendi piirajate abil nii, et klappide ajamiga avamisel vastab õhuvoolhulk kasutusaegsele ning klappide sulgumisel kasutusaja välisele.

Kasutusajal määratakse klapi asend ruumi või väljatõmbetorustikku paigaldatud süsihappegaasi- (CO_2) ja temperatuuriandurite (TE) abil. Kui süsihappegaasi kontsentratsioon ületab ette nähtud taseme (näiteks 1000 ppm) või õhutemperatuur tõuseb liiga kõrgele (näiteks 25 °C), suurendatakse õhuvahetust (avatakse klapid) ja soovitud sisekliima saavutamisel

õhuvahetust vähendatakse (näiteks CO_2 < 600 ppm ja temperatuur < 23 °C). Selle süsteemi puhul on oluline, et magistraaltorustikes hoitakse konstantset rõhku ning torustiku takistus rõhuandurite ja reguleerklappide vahel oleks väike võrreldes lõppelementide takistusega. Ruumides, kus on suur radoonioht, võib vajadusel suurendada madalama astme õhuvooluhulka.

Reguleerklappide puhul tuleb tagada ka nende üheaegne töö, kuna erineva sulgemise/avamise kiiruse korral põhjustab ventilatsioon õhurõhu erinevuse üle hoonepiirdetarindite. Lisaks põrandale põhjustab ventilatsioon õhurõhu erinevuse ka teistele tarinditele, sealhulgas ripplaele, mille konstruktsioon peab sellele koormusele vastu pidama. Ventilatsiooni projekteerija peab konstruktsioonide projekteerijale esitama ventilatsioonist põhjustatud õhurõhu erinevuse suuruse.

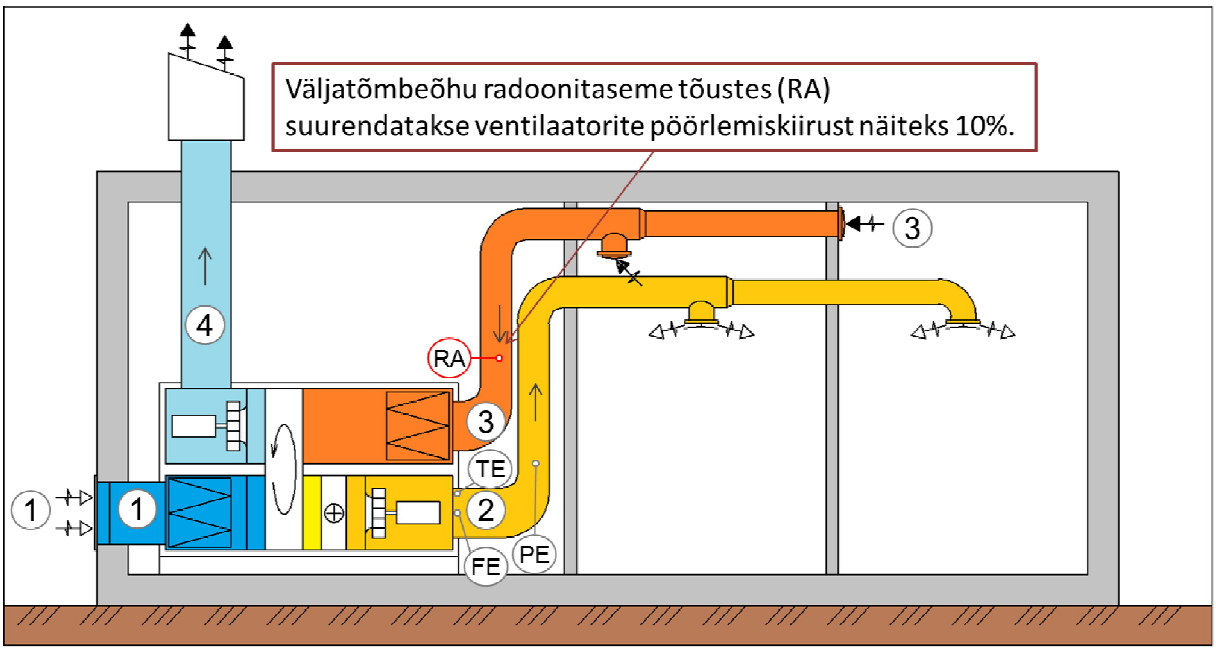


Joonis 3.49 Klassiruumi õhuvooluhulkade juhtimine *on-off* mootorajamiga varustatud kaheastmeliste reguleerklappidega.

Radooniandurigа ventilatsioonisüsteemi juhtimine

Kui üldventilatsiooni õhuvahetusest ei piisa, et aastaringselt tagada radoonitase alla 200 Bq/m^3, võib ventilaatorite tootlikkust suurendada vastavalt radoonitasemele ruumides. Joonis 3.50 on esitatud ventilatsioonisüsteem, kus väljatõmbetorustikku on paigaldatud radooniandur (RA) lisaks eelnevalt kirjeldatud süsteemile, mis hoiab sissepuhke- ja väljatõmbeõhu massivooluhulgad võrdsena.

Väljatõmbeõhu radoonitaseme tõustes üle 200 Bq/m^3 suurendatakse ventilaatorite pöörlemiskiirust näiteks 10% või magistraaltorustikus tagatavat rõhku 20% (PE) ja suurenenud üldõhuvahetusega alandatakse radoonitaset ruumides. Sellist lahendust saab kasutada ainult ruumides, kus radoonilisa on sarnane. Vastasel juhul vähendab madala radoonitasemega ruumide õhk radooni kontsentratsiooni väljatõmbeõhus ja mõõtmistulemused ei pruugi kajastada olukorda kriitilistes ruumides.

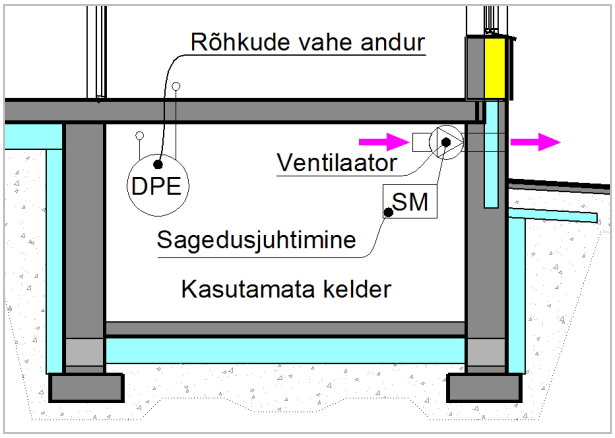


Joonis 3.50 Ventilatsiooniseadme töö juhtimine vastavalt radoonitasemele väljatõmbeõhus. Võrreldes Joonis 3.44 toodud süsteemiga on lisatud radooniandur (RA).

Ventilatsiooniga õhurõhu erinevuse hoidmine kahe ruumi vahel

Kui keldri/põrandaaluse ruumi ja esimese korruse vahel tuleb vältida õhurõhu erinevust, mis põhjustaks radooni konvektsiooni siseruumidesse, saab seda tagada keldri/põrandaaluse ruumi ventileerimisega. Vältimaks radooni kandumist kasutuses olevasse ruumi, tuleb vältida ruumide vahel õhu liikumist põhjustavat õhurõhu erinevust. Sellist süsteemi saaks rakendada pinnasega ühenduses olevates mittekasutatavates ruumides, kus on kõrgem radoonitase kui neid ümbritsevates kasutuses olevates ruumides.

Joonis 3.51 on kujutatud olukord, kus kütmata keldris on mehaaniline väljatõmme, mida juhitakse nii, et keldris ei oleks esimese korruse ruumi suhtes ülerõhku. Selleks mõõdetakse ruumide rõhkude vahet (DPE) ja sagedusjuhtimise abil reguleeritakse väljatõmbeventilaatori pöörlemiskiirust nii, et keldri alarõhk oleks näiteks 10 Pa. Kirjeldatud juhul tuleb vähemalt kaks korda aastas kontrollida, kas andur töötab korrektselt.



Joonis 3.51 Kütmata keldri väljatõmbeventilaatori juhtimine vastavalt rõhkude vahele esimese korruse ruumiga

Ventilaator dimensioneeritakse, arvestades suurema radoonikontsentratsiooniga ruumi õhuleket ja ruumi suurust. Ventilaatorit juhitakse vastavalt keldri/põrandaaluse ruumi ja esimese korruse vahel tekkivale õhurõhu erinevusele.

4 Olemasolevate hoonete spetsiifilised lahendused

Radoonitõrje meetme efektiivsust olemasolevas hoones saab hinnata kogemuspõhiselt radooni keskmise vähendusteguriga (Joonis 3.1 ja Tabel 4.1) või arvutuslikul teel (2. Siseõhu radooni kontsentratsiooni arvutusmetoodika).

Vähendustegur on enne meetme kasutamist mõõdetud radoonitase jagatud pärast meetme kasutuselevõtmist mõõdetud radoonitasemega. Vähendusteguri alusel võib teha esialgse valiku vajalikest radoonitõkestamise meetmetest.

Tabel 4.1 Enam kasutatud renoveerimismeetmete mõju radoonitaseme alanemisele

Kasutatav meede	Vähendustegur
Hoone ventilatsiooni suurendamine	2–3
Tarindite õhulekete vähendamine	2–3
Põrandaalune alarõhu tekitamisega radoonituulutustorustik / või/ja radoonikaev või/ja radoonivöö	20

Renoveerimistööd, mis on vajalikud radoonitaseme alandamiseks siseruumides nõutud piiridesse, sõltuvad eelkõige mõõdetud keskmisest radooni kontsentratsioonist siseõhus. Kui siseõhu radooni kontsentratsioon on alla 600 Bq/m^3, piisab lihtsatest meetoditest, nagu õhulekkekohtade tihendamisest ja ventilatsiooni parandamisest.

Kui siseõhu radooni kontsentratsioon ületab 600 Bq/m^3, on vaja rakendada efektiivsemaid meetodeid:

- alarõhu tekitamine põranda alla,
- olemasolevate põrandate asendamine ja
- mehaanilise sissepuhke-väljatõmbeventilatsiooni paigaldamine.

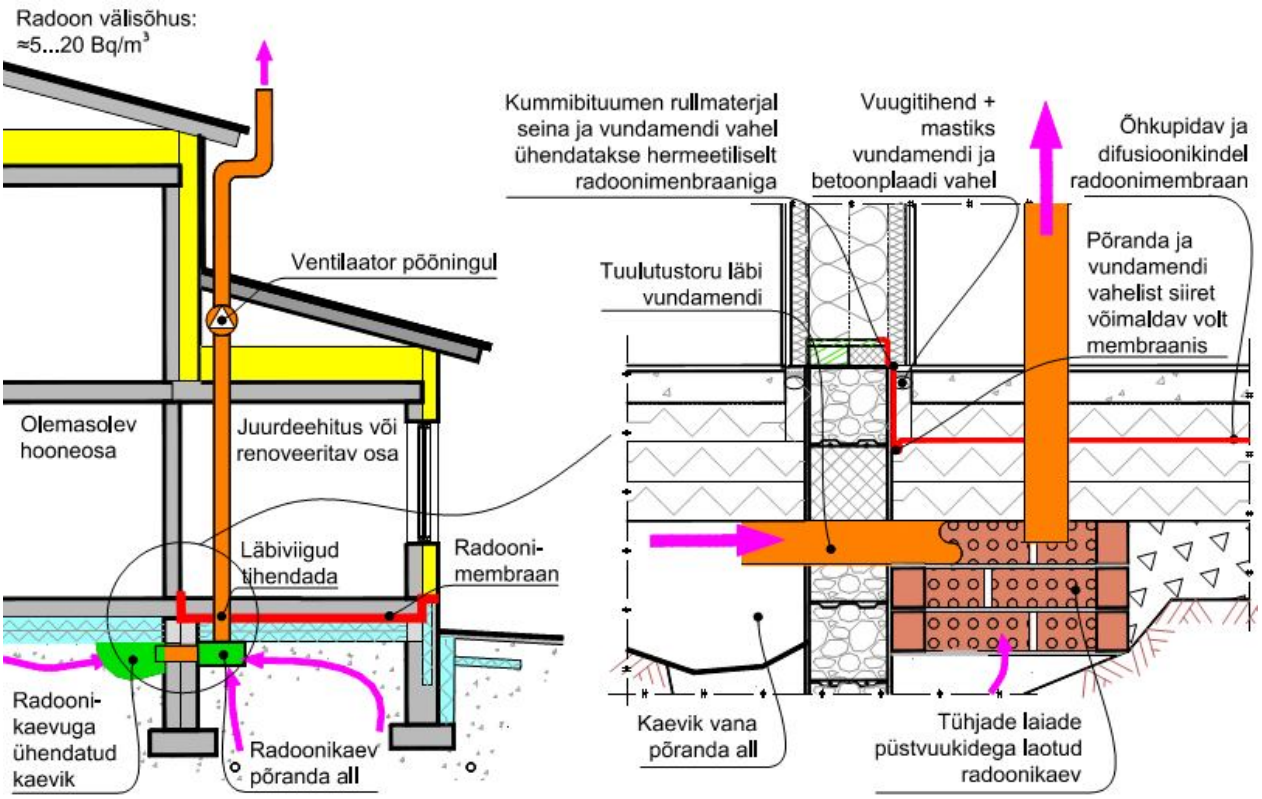
4.1 Juurdeehitised

Kui radooniohtlikul alal paiknevale elamule plaanitakse juurdeehitist, on enne projekti koostamist mõistlik teha kontrollmõõtmised nii hoones kui ka pinnases. Pinnase radoonisisalduse mõõtmised on olulised, et ei tekiks olukorda, kus olemasolev hoone on radoonikindel ja mõõtmiste tulemustest lähtuvalt jäetakse juurdeehitusel tõkked paigaldamata. Nii võib juhtuda, et lisaks selle, et uues osas tõuseb üle normi rikub ära ka vanas osas asuvate ruumide õhu.

Kui radoonitase hoones on lubatust kõrgem või pinnases on radoonitase ülisuur, tuleb uues osas kasutada radoonimembraani ja radoonikaevu ning viimasesse ühendada toruga läbi olemasoleva vundamendi ka hoone olemasolev osa.

Kui radoonitase jääb alla lubatud ülempiiri (tuginedes eespool kirjeldatud pikaajalistele mõõtmistele) ja pinnase radoonisisaldus on madal, ei pea kasutusele võtma spetsiaalseid radooni tõkestamise meetmeid. Piisab, et lähtutakse ehitamise üldistest kvaliteedireeglitest: tagatakse hoonepiirete õhupidavus, mida on vaja tagada nagunii hoone energiatõhususe ja piirdetarindite ehitusfüüsikalise toimivuse tagamiseks.

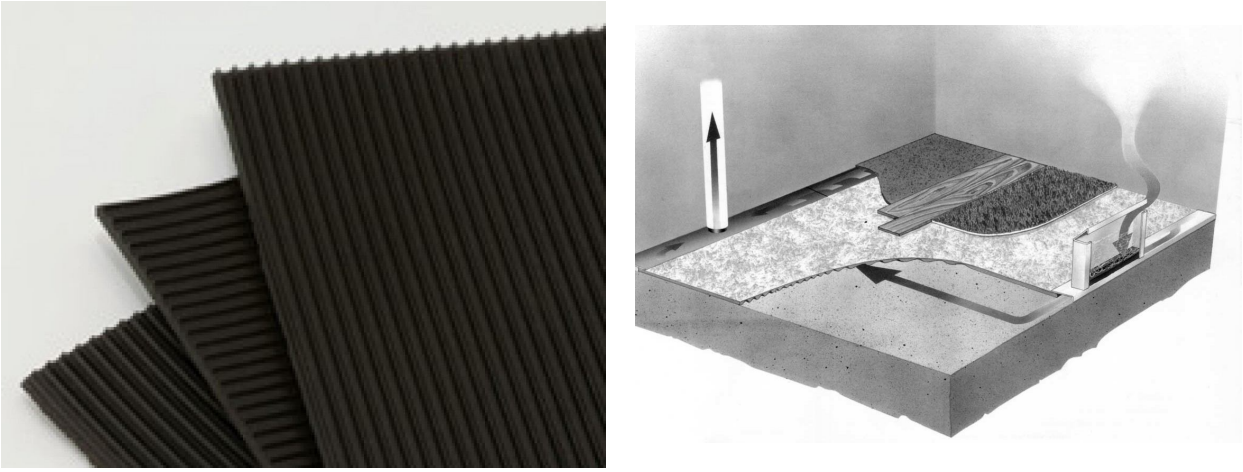
Hoonete juurdeehitistele, mis paiknevad normaalse või kõrge radoonitasemega piirkonnas, ehitatakse vastavalt varemkirjeldatud uusehituse lahenduse kohaselt. Kui olemasoleval hoonel on juba rakendatud radoonitõkke meetmeid, peavad juurdeehitisel rakendatavad meetmed olema võrdväärsed või paremad. Võimalusel tuleb olemasoleva ja uue hooneosa põrandad õhutihedalt ühendada (Joonis 4.1).



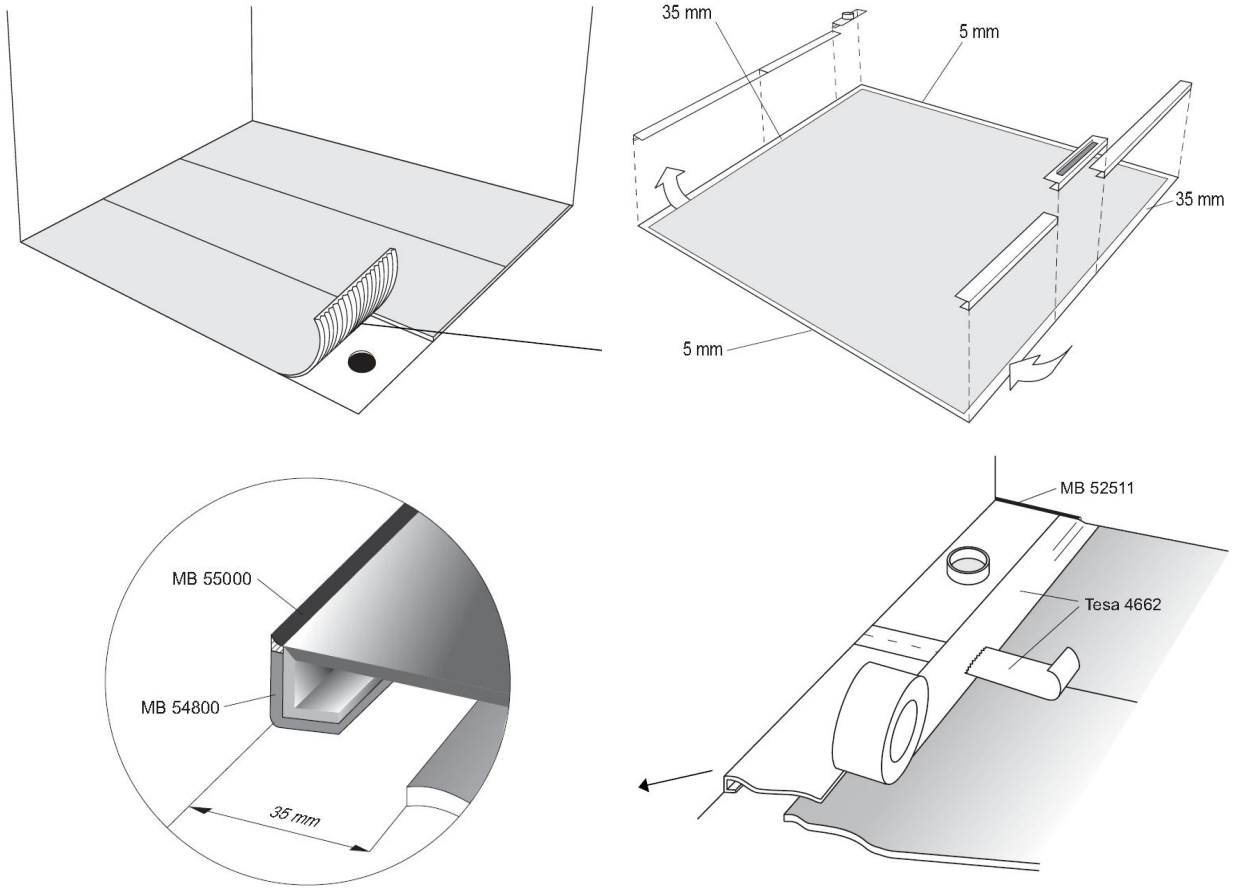
Joonis 4.1 Juurdeehitise radoonitõkke liitmine olemasoleva hoone radoonitõkkega.

4.2 Põrandakatte aluse ventileerimine

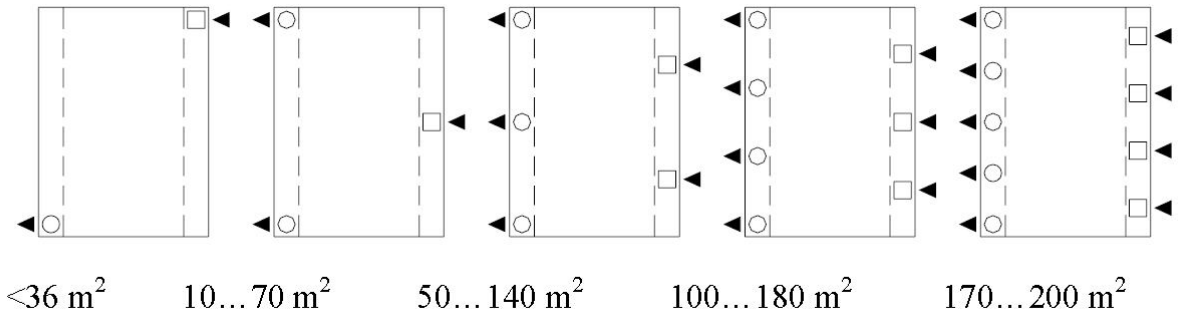
Põrandakatte aluse ventileerimist kasutatakse enamasti hoonete renoveerimisel ajutise meetmena või keerukates konstruktsioonides lisameetmena. Eesmärk on tarindi sisepinna lähedal tekitada ventilaatoriga alarõhk ning õhuvahetus. Tarindi ventileerimiseks kasutatakse põranda (või keldriseina) pinnakatte rullmaterjali all spetsiaalset alusmatti, mille tarindipoolne külg on ribiline (Joonis 4.2, vasakul) ning mille otsad ühendatakse hermeetiliselt tootele sobivate kogumistorudega (Joonis 4.2, paremal). Kogumistorud omakorda ühendatakse ühest ruumi servast väljavisketoru ja ventilaatoriga ning teisest servast õhu sissevõtuplafooniga (Joonis 4.3). Põrandakatte aluse tuulutuse väljatõmbe- ja pealevooluõhuavad valitakse vastavalt ruumi suurusele (Joonis 4.4).



Joonis 4.2 Ribilise põrandakatte kasutamine põranda ventileerimiseks.



Joonis 4.3 Põrandakatte aluse ventileerimise põhimõte (Trelleborg, RTV-Yhtymä):
- üleval vasakul: kasutatakse spetsiaalset alusmatti, mille alumine külg on ribiline ja mis paigaldatakse põrandale;
- üleval paremal: põrandamati otsad ühendatakse hermeetiliselt tootele sobivate kogumiskanalitega (all vasakul),
- all paremal: kogumiskanalid ja põrandamatt ühendatakse hermeetiliselt.



Joonis 4.4 Põrandakatte aluse tuulutuse väljatõmbe- ja pealevooluõhuavad valitakse vastavalt ruumi suurusele.

4.3 Spetsiifilised lahendused vanadele keldriga hoonetele

Vanade hoonete keldriseinte ja -põrandate täpne konstruktsioon ja kvaliteet võib olla väga erinev ning on sageli teadmata. Seetõttu peab igas konkreetses hoones tegema uuringud ja projekteerima ning ehitama konkreetset hoonet silmas pidades. Ühes hoones kasutatud lahendus ei pruugi ootuspäraselt toimida teises samasuguses hoones.

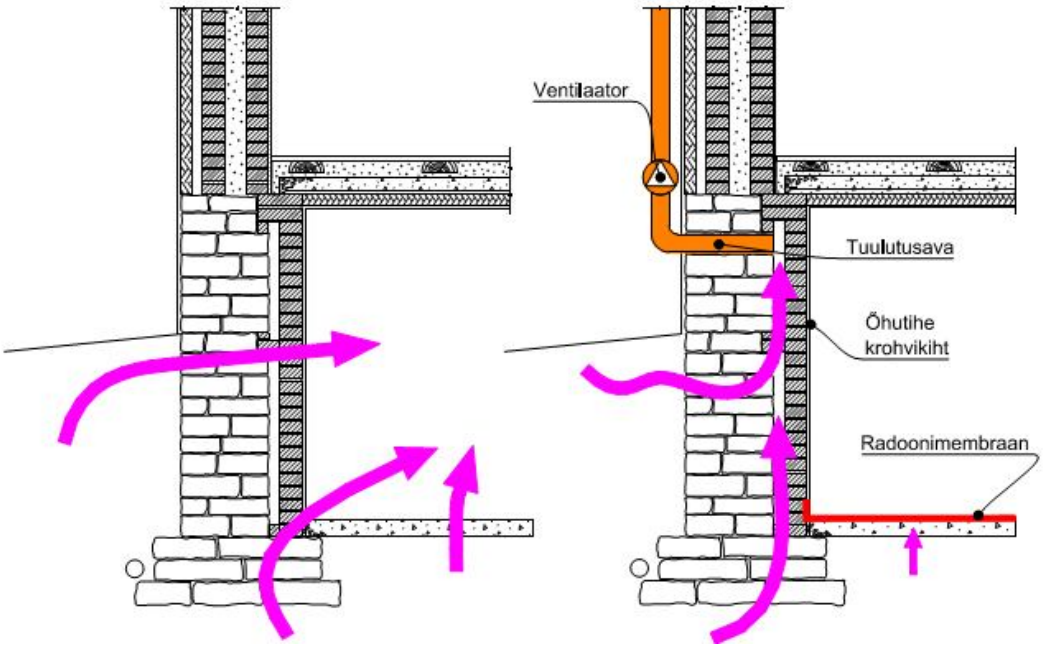
Olemasolevates hoonetes on radoonitõkke meetmeid raskem realiseerida ja tihti on soovitatav rakendada astmelist renoveerimist, kus järgmine ümberehitust nõudev töö tehakse alles siis, kui esmane meede ei toiminud. Nii välditakse nn ülerenoveerimist ja on võimalik säästa raha. Samas võib olla ka olukordi, kus odavam on teha üks kord ja põhjalikult, selle asemel et osade kaupa renoveerida. Seetõttu tuleb erinevad stsenaariumid alati põhjalikult läbi mõelda.

Joonis 4.5 on toodud radoonitõrje viis olukorras, kus radoonitõrjet rakendatakse hoone sees. Kindlasti on parim lahendus hoone ümbruse lahti kaevamine, keldriseina krohvimine väljastpoolt ja sellele radoonitiheda kihi paigaldamine ning vana põranda lammutus ning uue õhutiheda ja radoonikindla põranda ehitus. See on aga ressursimahukas tegevus. Seetõttu võiks esmalt rakendada lihtsamaid radoonitõrje meetmeid hoone sees.

Vanematel hoonetel on vundamendi veetõke sageli puudulik ja ka müüritis võib olla laotud nii, et vuugid ei ole tihedad. See kõik loob soodsad tingimused pinnasest radooni tungimisele keldrisse ja sealt eluruumidesse. Samuti võib ka keldripõrand olla pragudega või õhku sedavõrd läbilaskev, et ka sealt võib radoon tungida keldrisse (Joonis 4.5, vasakul on olemasolev tellisvoodriga keldrisein).

Võimalik renoveerimislahendus on toodud Joonis 4.5 paremal.

- Põrandale paigaldatakse radoonimembraan ja uus põrandakate. Kaaluda võib ka põrandakatte aluse tuulutamist (vt peatükk 4.2. Põrandakatte aluse ventileerimine).
- Tellismüüritise õhutihedamaks muutmiseks plaanitakse see krohvida ja kõik liitekohad hermetiseerida elastse mastiksiga.
- Tellisvoodri ja vundamendimüüritise vahet ventileeritakse, et vältida sealt radoonileket keldrisse. Tuleb arvestada, et liiga intensiivse ventileerimisega võib talvel langeda keldriseina temperatuur ja suhteline niiskus tõusta üle kriitilise taseme, kuna tellisseina ja vundamendimüüritise vahele tungib külma välisõhku.



Joonis 4.5 Seespoolse tellisvoodriga keldri vundamendisõlm: algne konstruktsioon (vasakul) ja pakutud renoveerimislahendus (paremal).

5 Kirjandusviited

Boverket 7147-922-8, 2007. Åtgärder mot radon i bostäder.

Byggforskserien 701.706. 2012.Tiltak mot radon i eksisterende bygninger.

Byggforskserien 520.706. 2013. Sikring mot radon ved nybygging.

Clavensjö, B., Åkerblom, G. 1994. The Radon book. Measures against radon, Stockholm, 129 p.

Eesti Geoloogiakeskus 2008: Harjumaa radooniriski kaart. Eesti Geoloogiakeskus, Geofüüsika, mere- ja keskkonnageoloogia osakond.

EVS 840.2003. Radooniohutu hoone projekteerimine.

Ilmanvaihtojärjestelmän korjaus- ja parannuskonseptit − Ilmanvaihtomaton käyttö.

Jelle, B.P., Noreng K., Erichsen T.H. ja Strand, T. 2010. Implementation of radon barriers, model development and calculation of radon concentration in indoor air. *Journal of Building Physics* 34(3): 195–222.

Jürgenson, L. 1942. Elamu soojapidavus.

Keskkonnaministeeriumi koduleht www.envir.ee

RT 81-11099 Radonin torjunta. 2012. Rakennustieto.

Scivyer, C. R. 2007. Radon. Guidance on protective measures for new buildings.

Scivyer, C. R. 2010. Surveying dwellings with high indoor radon levels: a Bre guide to radon remedial measures in existing dwellings.

Scivyer, C. R. ja Jaggs, M. P. R. 2010. A BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings.

Talviste, E. 1974. Hooned.

Trelleborg Terveyslattia. Asennusohjeet alipaineella tuulettuvalle lattialle. RTV-Yhtymä (2005). Veski, A. 1969. Individuaalelamute ehitamine.

6 Kasulikku lisalugemist radooniturvalisuse tagamise kohta

Airaksinen, M., Arvela, H. ja Jokiranta K. 2002. Ilmanvaihto- ja radontutkimukset tuusulan asuntomessualueella. Raportti B73.

Arvela, H. 2010. Indoor Radon Sources, Remediation and Prevention in New Construction. In: *Proceedings of Third European IRPA Congress 2010 June 14−16, Helsinki, Finland.*

Arvela, H., Holmgren, O. ja Reisbacka, H. 2012. Asuntojen radonkorjaaminen. STUK-A252.

Arvela, H. ja Ravea, T. 1997. Radonturvallinen rakentaminen Suomessa.

Arvela, H. ja Reisbacka, H. 2008. Asuntojen radonkorjaaminen. STUK-A229.

Jelle, B.P., Noreng K., Erichsen T.H. ja Strand, T. 2010. Implementation of radon barriers, model development and calculation of radon concentration in indoor air. *Journal of Building Physics* 34(3): 195–222.

The Canadian Real Estate Association (CREA): A Homeowner's Guide to Radon

Clavensjö, B. ja Åkerblom, G. 1994. The Radon Book: Measures Against Radon

ČSN 73 0601 Protection of buildings against radon from soil

ČSN 73 0602 Protection of buildings against radon and gamma radiation from building materials

EVS 840:2003 Radooniohutu hoone projekteerimine

Health Canada. 2010. Reducing Radon Levels in Existing Homes: A Canadian Guide for Professional Contractors

ICRP, 2014. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).

Jõgioja, E. 2004. Radooniohutu elamu

Kettunen, A.-V., Rissanen, R., Viljanen, M. ja Arvela, H. 1997. Imupistejärjestelmän radontekninen toiminta eri tyyppisissä pien- ja rivitaloissa.

Rahman, N.M. ja Tracy B.L. 2009. Radon control systems in existing and new construction: a review. *Radiation Protection Dosimetry* 135 (4): 243-255.

Rasmussen, T.V. ja Wraber, I. 2011. SBi-anvisning 232 - Radon – kilder og måling

Rasmussen, T.V. 2011. SBi-anvisning 233 - Radonsikring af nye bygninger

RT 81-11099 Radonin torjunta

Scivyer, C.R. 2007.Radon. Guidance on protective measures for new buildings.

Scivyer, C.R. 2010. Surveying dwellings with high indoor radon levels: a Bre guide to radon remedial measures in existing dwellings

Scivyer, C.R. 2010. Major Alterations and Conversions: A BRE Guide to Radon Remedial Measures in Existing Dwellings

Scivyer, C.R. ja Jaggs, M.P.R. 2010. A BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings

Scivyer, C.R. 2010. A BRE Guide to Radon Remedial Measures in Existing Dwellings: Dwellings with Cellars and Basements

Scivyer, C. 2012. BRE Good Building Guide GRG 37 Part 1 Radon solutions in homes: improving underfloor ventilation

Scivyer, C. 2013. BRE Good Building Guide GRG 37 Part 2 Radon solutions in homes: Positive house ventilation

Scivyer, C. 2013. BRE Good Building Guide GRG 37 Part 3 Radon solutions in homes: radon sump systems

Ympäristöministeriö. 1996. Pien- ja rivitalojen radontekninen korjaus. Imupistemenetelmä.