

*Rapporter och meddelanden nr 93*

---

# Radon i bostäder

## Markradonhaltens betydelse för riskklassificering

Bengt Rosén (SGI), Britt-Marie Ek (SGU),  
John Ek (SGU) och Håkan Mattsson (Uppsala universitet)

Särtryck av  
STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT  
Rapport nr 55

**SGU**  
*Sveriges Geologiska Undersökning*

Uppsala 1997

# Radon i bostäder

## Markradonhaltens betydelse för riskklassificering

Bengt Rosén (SGI), Britt-Marie Ek (SGU),  
John Ek (SGU) och Håkan Mattsson (Uppsala universitet)

Särtryck av  
STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT  
Rapport nr 55

**SGU**  
*Sveriges Geologiska Undersökning*

Uppsala 1997

ISSN 0349-2176  
ISBN 91-7158-559-1

© Sveriges Geologiska Undersökning

Tryck: Roland Offset AB, Linköping 1997

# Förord

Radon utgör en hälsorisk för människor. Inomhusluften i byggnader kan ha radonhalter över gällande gränsvärden inomhus till följd av inläckage av markradon.

Markradonmätningar utgör ett underlag vid klassificering av radonrisken och används vid planering och bygglovprövning inför exploatering liksom för spårning av befintliga markradonhus. Erfarenhetsmässigt har det visat sig svårt att repetera uppmätta radonhalter på grund av att radonhalten varierar med tiden, i viss mån också på grund av brister i mätförfarandet. Det finns därför ett behov av att förbättra instruktionerna för radonmätning i mark med tillhörande metodik för klassificering av markradon.

SGI har i en tidigare rapport (Lindmark & Rosén, 1984) publicerat resultat av integrerade markradonmätningar för olika jordarter. Resultaten av rapporten visade bland annat på nödvändigheten att göra mätningar med bättre tidsupplösning och med samtidig mätning av andra parametrar. Den nu genomförda undersökningen har med erfarenhet av tidigare publicerade forskarrapporter samlat in såväl nya mätdata som erfarenhet av olika mätmetoder. Rapporten vänder sig till konsulter, myndigheter och forskare som utför eller utvärderar resultat från markradonmätningar.

Projektet har finansierats av:

Statens strålskyddsinstitut, SSI; P 749, P 818.94, P 818.95

Statens råd för byggnadsforskning, BFR; 920895-3

Sveriges geologiska undersökning, SGU; Dnr 0-193/95

Statens geotekniska institut, SGI; Dnr 1-521/92

Statsgeotekniker Bengt Rosén (SGI) har varit projektledare. Projektet har genomförts i samarbete med statsgeologerna Britt-Marie Ek och John Ek (SGU).

Håkan Mattsson har för sina studier vid Institutionen för Geofysik i Uppsala gjort en statistisk undersökning som presenteras i Kapitel 5.

Två datainsamlingssystem med överföring till dator har installerats och underhålts förtjänstfullt av ingenjör Sven Erik Tornéus.

Värdefulla synpunkter har inhämtats från en referensgrupp som bestått av representanter från Statens strålskyddsinstitut, SSI (Hans Mellander med suppleant Gustav Åkerblom och Lynn Hubbard) och Statens råd för byggnadsforskning, BFR (Nina Dawidowicz). Gruppen har informeras om projektets utveckling dels informellt dels vid regelbundna möten.

Vi har valt att redovisa merparten av alla erhållna mätresultat, även sådana som är påverkade av mättekniska fel och som i andra fall är tveksamma ur mätteknisk synpunkt, och att kommentera oväntade mätresultat i löpande text och figurtext.

Ett särskilt tack riktas till Griftegårdsförvaltningen inom Linköpings Kyrkliga Samfällighet som har upplåtit mark för mätning i Slaka och har bidragit med praktisk hjälp, till Ingmar Lindahl, som har upplåtit mark i Börje, och familjerna Wineström och Lind i Börje för praktisk assistans.

Till alla som bidragit till att projektet kunnat genomföras riktas ett varmt tack.

Två lägesrapporter har utarbetats underhand med datum 1994-01-31 respektive 1995-03-10.

Linköping i september 1996

Bengt Rosén

# Innehåll

<b>Förord</b>	
<b>Summary</b> .....	8
<b>Sammanfattning</b> .....	10
<b>0. Markradonklassificering</b> .....	12
<b>1. Syfte och bakgrund</b> .....	14
<b>2. Mätlokaler</b> .....	20
2.1. Slaka .....	20
2.2. Börje .....	22
<b>3. Mätmetoder</b> .....	24
3.1. Radon .....	25
3.2. Nederbörd .....	27
3.3. Vattenmättnadsgrad .....	27
3.4. Lufttryck .....	28
3.5. Temperatur .....	29
3.6. Vindstyrka .....	29
3.7. Uran och radium, laboratorieanalyser .....	29
<b>4. Resultat</b> .....	32
4.1. Slaka .....	32
4.1.1. Radon .....	33
4.1.2. Inverkan av nederbörd .....	34
4.1.3. Inverkan av vattenmättnadsgrad .....	35
4.1.4. Inverkan av lufttryck .....	35
4.1.5. Inverkan av temperatur .....	36
4.1.6. Inverkan av vindstyrka .....	37

4.2.	Börje .....	38
4.2.1.	Radon .....	39
4.2.2.	Inverkan av nederbörd .....	43
4.2.3.	Inverkan av vattenmättnadsgrad .....	43
4.2.4.	Inverkan av lufttryck .....	44
4.2.5.	Inverkan av temperatur .....	44
4.2.6.	Inverkan av vindstyrka .....	45
<b>5.</b>	<b>Statistisk undersökning</b> .....	46
5.1.	Introduktion .....	46
5.2.	"Dem Reg" .....	46
5.3.	Utförande .....	47
5.4.	Resultat .....	47
5.4.1.	Slaka .....	47
5.4.2.	Börje .....	49
<b>6.</b>	<b>Beräkningar</b> .....	51
<b>7.</b>	<b>Diskussion</b> .....	60
	<b>Referenser</b> .....	65

## Bilagor

<b>Bilaga A - Slaka</b> .....	69
Radon .....	Bilaga A 1:1-4
Radon och nederbörd .....	Bilaga A 2:1-5
Radon och vattenmättnadsgrad .....	Bilaga A 3:1-4
Radon och lufttryck .....	Bilaga A 4:1-4
Radon och jordtemperatur .....	Bilaga A 5:1-2
Radon och lufttemperatur .....	Bilaga A 6:1-2
Radon och vindstyrka .....	Bilaga A 7:1-3
<b>Bilaga B - Börje</b> .....	95
Radon, 1993-1995 .....	Bilaga B 1:a-b
Radon och lufttryck .....	Bilaga B 2:a-b
Vattenmättnad och nederbörd .....	Bilaga B 3:a-b
Radon, nederbörd och lufttryck .....	Bilaga B 4:a-b
Radon, jord- och lufttemperatur .....	Bilaga B 5:a-b
Radon, jord- och lufttemperatur samt nederbörd .....	Bilaga B 6:a-b
Vindstyrka .....	Bilaga B 7:a-b
Radon, december 1993 - juni 1994 och juni-november 1995 .....	Bilaga B 8:a-b

Radon och jordtemperatur, februari-mars 1994 .....	Bilaga B 9:a-d
Radon, nederbörd, lufttryck samt jord- och lufttemperatur .....	Bilaga B 10:a-d
Radon, vind, lufttryck september 1995 .....	Bilaga B 11:a-d
Radon samt jord- och lufttemperatur september 1995 .....	Bilaga B 12:a-b
Jord- och lufttemperatur april och september 1995 .....	Bilaga B 13:a-b
Radon och jordtemperatur november 1995 .....	Bilaga B 14:a-b
<b>Bilaga C - Statistisk undersökning .....</b>	<b>113</b>
<b>Bilaga D - Fotobilaga .....</b>	<b>119</b>

# Summary

## Radon in dwellings -

### The importance of soil concentrations to risk classification

Radon gas is a health risk to man. The radon concentrations in dwellings often exceed valid limits, 200 or 400 Bq/m<sup>3</sup>, depending on the national code. This is often a consequence of soil radon leakage into the house. In Sweden, three risk classes are defined for the ground, high, medium or low, which are linked to the design of the building.

Better knowledge of measuring procedures, variations in radon concentrations in soil gas and the reasons for these variation will improve the instructions for risk classification of radon in soil gas.

The radon concentration in the soil gas was recorded for two different soil types, glacio-fluvial sand and till. Co-variation with precipitation, water saturation, air pressure, wind velocity and temperature were studied. Data have been automatically recorded and transmitted from instruments permanently installed in the ground 1 to 4 times an hour from November 1993 to November/December 1995. Radon and water content measurements were also made manually. In the till area automatic measurements will continue for the time being.

Radon measurements were made in two ways: 1. Passive instruments/detectors (Alphameter and ROAC/Radon on Activated Charcoal), 2. Emanometers (Markus and Bondar Clegg) drawing air from the soil pores. Emanometer measurements were made using different air volumes available in the soil, tubes with a small air volume and cylinders with a sufficient air volume directly available for measurement.

Measured radon concentrations vary depending on the type of instrument and type of equipment attached to the ground. The highest radon concentration in sand was recorded using passive Alphameters. Next to Alphameters, came Emanometer/cylinder (87 %), ROAC at a depth of 0.7 m (75 %) and, finally, Emanometer/tube (60 %). Emanometer measurements in till gave markedly higher and lower values than those of passive Alphameters.

The radon concentrations in sand vary with time, 10-25 % during a short period (some days) and up to 30 % during a year. The highest variations were recorded in the soil at a depth of 1.5 m during short periods. The maximum radon concentration was recorded in the late winter/spring as an early effect of snow melt (increased water content in the soil). Low radon contents occur during dry periods, typically just before autumn rains in September.

Besides these seasonal variations, which are characterized by temperature and precipitation conditions, the radon concentration in coarse soil (sand) is influenced by changes in air pressure and possibly also by the wind. Starting from the maximum measurable radon concentration of the air in the soil, which is a function of a number of factors including the uranium content of the soil, the radon concentration is affected by fluctuating conditions at the measurement point, so that the concentration is lowered from time to time. The greatest reduction is obtained when the soil becomes saturated with water. The radon gas is then trapped in the water-filled pore spaces and the radon concentration value is recorded as being close to zero.

A proposal is presented which is based on the measured radon concentration being converted to the maximum possible radon concentration and compared with the 'limit values' for various ground-radon classes. Such limit values have not been developed but can be discussed on the basis of the values now applied to respective measurement depth.

The project shows that extensive measurements of radon and other parameters are required to obtain representative basic information for assessment. But the project contains neither any proposal of the extent of measurements necessary nor the routines that should be applied.

An alternative proposal involves measuring the radium concentration in situ and comparing these values with existing 'limit values' for each ground-radon class.

# Sammanfattning

Radonrisken utgör en hälsorisk för människan. Radonkoncentrationen i byggnader överskrider ofta gällande gränsvärden, 200 eller 400 Bq/m<sup>3</sup>. Orsaken är ofta inläckande radongas från marken. I Sverige tillämpas tre markradonklasser, hög, normal eller låg, och vid nybyggnation anpassas inläckageskyddet till aktuell radonklass.

Projektet syftar i förlängningen till att förbättra inomhusmiljön. Genom att öka kunskapen kring mätprocessen, radonvariationerna och orsakerna till sådana variationer förbättras möjligheterna att ge mer fullständiga instruktioner vid klassificering med avseende på markradon.

Markradonhalten och radonpåverkande parametrar har registrerats i två typer av jord, isälvsmaterial och morän. Radonhaltens variation över tiden och samvariation med nederbörd, vattenmättnadsgrad, lufttryck, vindstyrka och temperatur har studerats. Automatisk registrering av data har utförts från fast installerade instrument 1-4 gånger per timma under perioden november 1993 t o m november/december 1995. Manuella mätningar av radonhalt och fuktighet i jorden har dessutom utförts i fasta mätrör. Automatiska registreringar kommer att fortsätta tills vidare vid moränstationen.

Radonmätningar har utförts dels med passiva instrument/detektorer (Alphameter och ROAC) dels med emanometrar (Markus och Bondar Clegg) som mäter vid undertryck. Undertrycksmätningar har gjorts både via järnrör med fria volymer understigande instrumentens mätvolym och via behållare/cylindrar med en större tillgänglig mätvolym.

Vid utvärderingen av data konstateras att uppmätt radonhalt varierar beroende på typ av instrument och dess applicering i jorden. Högsta radonhalten för isälvsmaterial erhöles med automatinsamlade Alphameter-mätningar. Närmast kommer sedan emanometermätningar via cylinder (87 %), ROAC-mätning i 0,7 m mätgrop (75 %) och emanometermätningar via järnrör (60 %). I morän erhöles både

markant högre och lägre radonhalter med emanometer jämfört med Alphametermätningar.

I isälvsmaterial, station Slaka, varierar radonhalterna med tiden dels med 10-25 % i dygnspektivet dels med upp till 30 % i en årscykel. Variationerna är störst för stora mätdjup (1,5 m) i dygnspektivet. Högsta radonhalt under året fås under vårvintern i samband med den tidiga effekten av snösmältning (förhöjt vatteninnehåll i jorden). Lägsta radonhalt fås under torra förhållanden i jorden, vanligen strax före höstregnen i september.

I morän, station Börje, är radonhaltsvariationen sett över de två åren störst på 1,5 m, 10-240 kBq/m<sup>3</sup>, och minst på 0,7 m, 5-75 kBq/m<sup>3</sup>. De lägsta radonhalterna erhöles under våren, mars-maj och de högsta från sensommar till vinter. Skillnaden mellan högsta uppmätta radonhalter under de två senaste höst-vinterperioderna är ca 100 kBq/m<sup>3</sup>. Den första vintern var mätförhållandena ännu instabila efter mätarinstallationerna.

Utöver säsongvariationer, som präglas av temperatur- och nederbördsförhållanden, påverkas radonhalten i grövre jordar (sand) av lufttrycksförändringar och eventuellt vind. Med utgångspunkt från den maximala uppmätbara radonhalten i jordluften, som är en funktion av bl a jordens uraninnehåll, påverkas radonhalten av skiftande förhållanden kring mätplatsen så att halten sänks tidvis. Störst sänkning fås om jorden blir vattenmättad. Radongasen kvarhålls då i de vattenfyllda porutrymmena och radonhalten registreras med värden nära noll.

Ett förslag framförs som går ut på att mätt radonhalt omräknas till maximalt möjlig radonhalt och jämförs med "gränsvärden" för olika markradonklasser. Sådana gränsvärden har inte tagits fram men kan diskuteras med utgångspunkt från de värden, som nu tillämpas, för respektive mätdjup.

Projektet visar att det behövs omfattande mätningar av radon och andra parametrar för att erhålla ett representativt bedömningsunderlag. I projektet lämnas dock inga förslag på vilken omfattning som är nödvändig och vilka rutiner som bör tillämpas.

Ett alternativt förslag innebär att radiumhalten mäts in situ och att mätvärdena jämförs med befintliga "gränsvärden" för respektive markradonklass.

## Kapitel 0.

# Markradonklassificering

Nuvarande anvisningar, handbok BFR R85:1988 (Åkerblom et al, 1988), för klassning av markradonförhållandena förutsätter mätning på jorddjupet 1,0 m. Någon av de tre klasserna (hög-normal-låg) tillämpas beroende på radonhalt och jordart. Parallellt finns möjlighet att göra motsvarande klassning med utgångspunkt från radiumhalten.

Erfarenheterna från både Slaka (Tabell 5) och Börje i denna rapport visar att enhetliga regler behövs för ett antal radonmätförfaranden och att dessa dokumenteras med metodbeskrivningar eller motsvarande handling. Det behövs också kompletterande uppgifter om radonpåverkande faktorer som ska vägas in vid bedömningen av markradonklass.

Det är mycket väsentligt att kunna avgöra hur representativa uppmätta värden är. En god geologisk kunskap är nödvändigt för att kunna göra trovärdiga bedömningar av den lokala geologins variationer i sidled och djupled.

Bästa val av mätdjup för radonmätningar innebär en avvägning mellan för- och nackdelar. Större mätdjup har gett relativt stora variationer i ett tidsperspektiv. Fördelen är att bedömningen av radonhalt i förhållande till den maximalt möjliga blir bäst på större djup. Närmare markytan gäller det motsatta d v s mindre radonvariationer i det korta tidsperspektivet men större osäkerhet vid omräkning till maximal radonhalt.

För att få ett representativt värde och utjämna de kortvariga radonvariationerna erfordras integrerande mätningar över minst 1 à 2 veckor. Ett större antal momentana mätningar kan förmodligen nöjaktigt accepteras som jämförbara med enstaka integrerande mätningar över tiden.

Passiva och aktiva (undertryck) instrument har delvis gett skilda radonhalter. Några tänkbara orsaker diskuteras i Kapitel 7.

Med utgångspunkt från ett antal radonmättekniker (metodbeskrivningar), som kan accepteras, föreslås att radonhalten räknas om till maximal radonhalt (diffusion) på stort djup under markytan och jämförs med ”gränsvärden” för olika jordarter och riskklasser.

Innan jämförelsen görs justeras radonhalten med ledning av rådande fuktighet, lufttryck, jordtemperatur, vind och eventuell tjäle. Normer för sådana justeringar behöver arbetas fram systematiskt för olika jordartsförhållanden. Vid vissa förhållanden bör inte radonhaltsmätningar användas för klassificering. I enlighet med erhållna mätresultat i denna rapport gäller det främst när vattenmättnadsgraden är hög i jorden.

Det är en avvägningsfråga om man kan acceptera enklare bedömningar av radonpåverkande faktorer in situ eller om kompletterande mätningar utöver radonhalten behövs.

Ett alternativ till radonhaltsmätningar är fortfarande radiumhaltsbestämningar med direkt jämförelse med uppställda ”gränsvärden” för olika riskklasser.

## Kapitel I.

# Syfte och bakgrund

### **1.1 SYFTE**

Radon utgör en hälsorisk för människor. Detta projektet syftar i förlängningen till att förbättra inomhusmiljön. Genom att öka kunskapen kring mätprocessen, radonvariationerna och orsakerna till sådana variationer förbättras möjligheterna att ge mer fullständiga instruktioner vid riskklassificering med avseende på radon i mark. Erfarenheter från projektet kan utgöra baskunskap för utformning av metodbeskrivningar avseende radonmätningar i mark och för klassificering av markradon.

En högkvalitativ utredning av markradonförhållandena är en förutsättning för att kunna göra en tillförlitlig klassning av marken med avseende på radon och för att erhålla ett säkert beslutsunderlag så att man med väl avvägda skyddsåtgärder erhåller låga radonhalter inomhus vid nyproduktion. Ett alternativ är att bygga radonsäkert oavsett radonrisk eller att radonsanera i efterhand där så behövs. Klassificeringen av marken används också för att spåra befintliga byggnader med möjliga markradoninläckage.

Projektets två mätstationer har också utnyttjats för att jämföra olika instrument och mätförfaranden. Resultaten kan utgöra underlag för framtida anvisningar, exempelvis i form av metodbeskrivningar.

### **1.2 BAKGRUND**

#### **Nuvarande teknik för markradonmätning och riskklassificering**

Radonhalter i byggnader kan överskrida gällande gränsvärden till följd av inläckage av markradon. Marken klassificeras med avseende på radon i tre klasser, hög, normal eller låg. Klassificeringen görs dels översiktligt, riskområden, dels mer detaljerat, radonmark, med byggnadstekniska krav kopplade till begreppet radonmark i enlighet med Boverkets föreskrifter:

Markklass	Består huvudsakligen av	Åtgärdskrav
Högriskområde	Högradonmark	Radonsäkert
Normalriskområde	Normalradonmark	Radonskyddande
Lågriskområde	Lågradonmark	Traditionellt

Radonklassificeringen används dels för planering och bygglovsprövning dels för att spåra markradonhus i befintlig bebyggelse. Boverkets gränsvärden avser boendemiljön och enligt Byggregler (BFS 1993:57. BBR94, 6:223) skall byggnader utformas så att radonhaltens årsmedelvärde inte överstiger 200 Bq/m<sup>3</sup> där personer vistas mer än tillfälligt. Socialstyrelsen gränsvärde för sanitär olägenhet med avseende på radon är 400 Bq/m<sup>3</sup>.

Den tekniska klassificering av markradonrisk kan utföras på olika sätt:

- Radonmätning. Mätning av radonhalt i jordens porluft.
- Gammaspktrometri. Mätning av radiuminnehållet i jord- och berggrund.
- Mätning av radonhalt i grundvatten. Uppmätt radonhalt motsvarar maximalt möjlig radonhalt i jordluften (Åkerblom et al, 1988).
- Emanation. Mätning av radonavgången från jordprov i laboratoriemiljö.

De olika mätmetoderna har för- och nackdelar som översiktligt sammanfattas:

Mätmetod	Fördelar	Nackdelar
Radonmätning	Snabbt, billigt	Tidsvariationer
Gammaspktrometri	Stabila mätvärden	Relativt dyrt instrument
Radon i grundvatten	Billigt	Kan vara svårt att ta representativa prover
Emanation	Radonavgång kan mätas vid önskade vattenförhållanden	Svårt att ta representativa prover. Metoden är inte färdigutvecklad

De radonmätningar som normalt görs i Sverige innebär:

- **momentan** mätning med emanometer, radonhaltig jordluft sugts till ett instrument för direkt analys

- **korttidsmätning**, exponering av koldetektorer i 5-8 dygn med gammaspektrometrisk analys
- **långtidsmätning**, exponering av spårfilm i 2-4 veckor där spåren per ytenhet är ett mått på radonhalten.

Emanometermätning utförs antingen direkt efter etablering av sondrör i jorden eller på jordluft som hunnit stabilisera sig i en nedgrävd uppsamlingsbehållare. Korttidsmätning med koldetektorer innebär att de sista ca tre dygnens radonhalt påverkar resultatet. Radongas som kolet adsorberat tidigare påverkar resultatet endast marginellt på grund av radonets halveringstid (3,82 dygn).

Den metod som praktiserats i Sverige, sedan ca 1980, är att klassificera områden på basis av mätningar av gammastrålningen, radonhalten i jordluften och halterna av radioaktiva ämnen i jordlagren och i berggrunden (Åkerblom et al, 1988). Erfarenhetsmässigt har det visat sig vara svårt att repetera uppmätta radonhalter på grund av att radonhalten varierar med tiden, i viss mån också på g a brister i mätförfarandet. De största missvisande mätresultaten uppkommer sannolikt vid mätning under vattenmättade förhållanden varvid registrerade radonhalter blir väsentligt lägre än under torrare förhållanden. Under nära vattenmättade förhållanden eller med s k lockeffekt (täta förhållanden nära markytan) kan väsentligt förhöjda radonhalter erhållas i förhållande till halter som erhålls under större delen av året. Med spårfilm erhålls ofta för låga halter, vilket orsakas av att filmen varit täckt av kondensvatten, som förhindrar alfastrålning att göra spår i filmen.

### **Erfarenheter av markradonhaltens variationer**

En stor del av kunskapen kring klassificering och mätning av radioaktivitet i marken finns samlad i en rapport "Radon i bostäder - Markradon" (Åkerblom et al, 1988).

De första relaterade markradonmätningarna har hämtats från amerikansk litteratur (Kraner et al, 1964) med referathänvisningar bakåt i tiden från 1912. Antalet markradonundersökningar med forskningssyfte har ökat markant under 1980- och 1990-talen i takt med ökad medvetenhet om radon som hälsorisk.

Många forskare har tagit fasta på att radonhalten varierar med tiden och att det finns ett samband med klimatiska faktorer som nederbörd, lufttryck, vind och temperatur. Effekten av nederbörd kan överföras till förändringar i jorden avseende jordens vatteninnehåll, porositet m m.

Det kan många gånger vara svårt att urskilja enskilda parametrars samvariation med radonhalten eftersom flera parametrar förändras samtidigt vid väderomslag. Påverkan av klimatförändringar har bl a relaterats av Adam (1995), Fukui (1987), Kraner et al (1992), Schumann et al (1992) och Taipale & Winqvist (1985). Oväder och stormar innebär vanligtvis hög nederbörd, höga vindstyrkor och sjunkande lufttryck. Radonhaltens reaktion är beroende av jordens egenskaper och tillståndet (t ex vatteninnehåll) vid varje tillfälle.

Inverkan av lufttryck och vindhastighet har undersökts i många sammanhang. Man anser generellt att radonhalten är omvänt proportionell mot lufttrycksförändringar och direkt proportionell mot vindhastigheten. Påverkan av lufttrycket har konstaterats ner till 2,44 m (Kraner et al, 1964) och till 1 à 1,5 m på grund av höga vindstyrkor i vittrad tuff (Nevada, USA). Ball (1991) konstaterar också att påverkan från vinden är mindre än förändringar i lufttrycket och att påverkansgraden avtar med jordens kornstorlek och ökande vatteninnehåll. Vindpåverkan kan också vara beroende av vindriktningen.

Att markens vatteninnehåll påverkar radonhalten är allmänt omvittnat. Radonhaltsökningar kan konstateras i de yt nära jordlagren när fuktigheten ökar (Kraner et al, 1964; Lindmark & Rosén, 1984; Taipale & Winqvist, 1985). Det omvända gäller vid torr väderlek och mer uttorkade jordar. Ett speciellt fenomen inträffar dock i lerjordar med torrskorpekaraktär genom att radonhalten ökar dramatiskt vid upptorkning varvid radongasen plötsligt kan röra sig i det närmaste obehindrat (Lindmark & Rosén, 1984). Vid radonhaltsmätningar utförda under vattenmättade förhållanden fås mycket låga radonhalter beroende av vattnets låga diffusionskoefficient för radon,  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (Åkerblom et al, 1988).

Det framgår av flera artiklar att man haft svårigheter att mäta jordens vatteninnehåll. Schumann et al (1992) konstaterade vid mätningar i Colorado att tensiometrar och gipsblock gav otillförlitliga resultat och bedömde därefter jordens fuktighet med ledning av nederbörden. Washington & Rose (1990) valde neutronsondsmätningar parallellt med gipsblocksmätningar som visade sig svårtolkade. Adam (1995) valde att mäta permeabiliteten som ett mått på jordfuktighet och porositet. Gemensamt för samtliga artiklar är att man inte kunnat mäta jordens vattenmättnad på ett tillfredsställande sätt.

Woith & Pekdeger (1992) har undersökt radonhalten i jordluften vid fem mätstationer längs med en förkastningszon i norra Anatolien i Turkiet i ett flerårigt forskningsprojekt. Radonhalter har registrerats dels med spårfilm (Kodak LR 115) på 4 - 6 olika djup var tredje vecka dels med kontinuerliga mätningar i en

kompletterande station med Alphameters (kopplad till logger) på tre djup. Dessutom registrerades nederbörd, lufttryck och jordtemperatur. Variationerna i radonhalter över året anses till helt övervägande del bero på förändringar i vattenmättnaden i jorden. Jordtemperaturen visade en tydlig positiv korrelation med radonemanationen. De konstaterar dock att det är en indirekt effekt genom att temperaturen påverkar jordfuktigheten. Under sommarmånaderna när vattenmättnaden är låg påverkades radonhalten av förändringar i lufttrycket. Vid en minskning av lufttrycket med 1 % steg radonemanationen med 30 - 50 %.

Förändringar i vattenmättnadsgraden påverkar också emanationskoefficienten (andel bildat radon som avgår till porluften). Erfarenhetsvärden för emanationskoefficienten bygger på förhållandet att koefficienten är omvänt proportionell mot kornstorleken (Åkerblom et al, 1988). Koefficienten har ett maximum vid en viss materialspecifik vattenmättnadsgrad enligt utförda laboratorieförsök (Lindmark & Rosén, 1984). Enligt Sun & Furbish (1995) ökar emanationskoefficienten med vattenmättnadsgraden upp till ca 30-40 % och är då lika stor som vid vattenmättnad. Vid ungefär 30 % vattenmättnad är alla mineralytor täckta av en vattenfilm som effektivt fångar radonatomerna i vattnet.

Markkanen & Arvela (1992) har undersökt radonemanationens samband med vattenhalt och temperatur i 231 finska moränprover ( $C_{Ra}$  medelvärde = 126 Bq/kg, median = 77 Bq/kg). Emanationskoefficienten varierade mellan 12 - 25 % med ett medelvärde på 20 %. Emanationen var störst för de finaste fraktionerna vid en vattenhalt av 10 - 15 %. I de grövsta fraktionerna var emanationen störst vid en vattenhalt av 1-5 %. De osiktade moränproven har den högsta emanationen vid en vattenhalt av ca 5 %.

Holkko & Liukkonen (1992) fann klara samband mellan radondiffusion och vattenhalt i morän. Den högsta diffusionen erhöles vid 3,8 % vattenhalt. Vid högre vattenhalt var diffusionen lägre.

Beträffande temperaturförändringars påverkan på radonhalten redovisas olika resultat. Klusman & Jaacks (1987) redovisar negativ korrelation mellan temperatur och radonhalt och anger att orsaken kan vara temperaturgradienter i jorden eller mellan jord/atmosfärluft vilka inducerar konvektiv gastransport. Schery & Petschek (1983) har emellertid teoretiskt visat att termala gradienter inte är tillräckliga för att få en konvektiv transport. Enligt Washington & Rose (1990) är jordtemperaturen en faktor som påverkar fördelningskoefficienten mellan radonkoncentrationen i vatten och jordluft på så sätt, att radonkoncentrationen i jordluft ökar då temperaturen ökar.

De mätningar som redovisas i detta projekt har utförts med erfarenhet av i litteraturen redovisade resultat och genom egen erfarenhet av tidigare mätningar, integrerande tvåveckorsmätningar i lera, silt/sand och grus under 1,5 år (Lindmark & Rosén, 1984). Enligt vad vi funnit genom personliga kontakter och litteraturstudier har radonmätningar inte utförts tidigare i den omfattning som redovisas i detta projekt d v s momentana mätningar med korta tidsintervall under två år.

Schumann (1992) har undersökt radonhaltens dagliga variationer i en lerig jord i Denver, Colorado, USA under ett år tillsammans med klimatforskare. Fukui (1987) har kontinuerligt mätt en radonprofil jämte andra faktorer under en månad. Taipale & Winqvist (1985) har följt markradonhalten under ett år genom integrerande tvåveckorsmätningar i en isälvsavlagring.

## Kapitel 2.

# Mätlokaler

Valet av mätlokaler har gjorts med tanke på att undersöka de två jordartstyper som ger de största radonproblemen i Sverige, nämligen isälvsmaterial och morän.

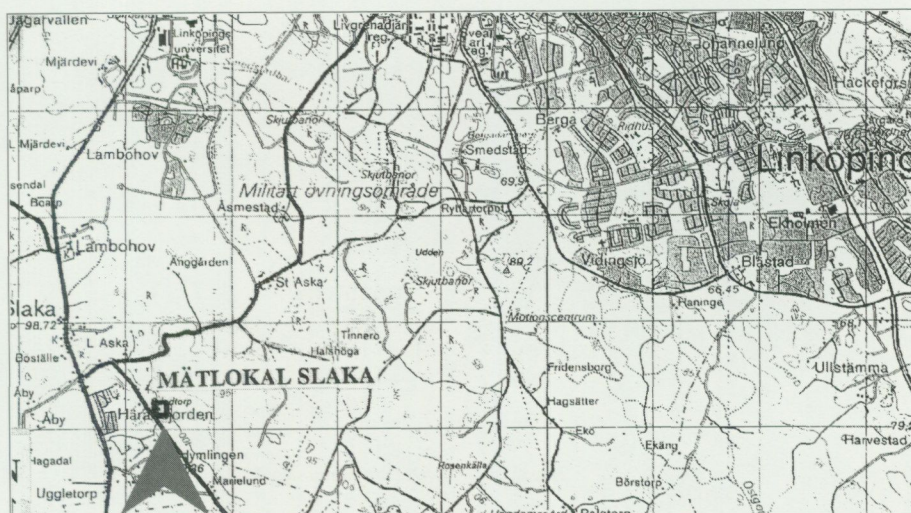
Forskningsprojektet startade 1993-04-01 med val av mätstationer och mätutrustning. Markradonhalten har registrerats i två typer av jord, isälvsmaterial och morän, tillsammans med parametrar som bedömts ha ett samband med radonhalten. I första hand har radonhaltens variation med tiden och samvariation med vattenmättnadsgrad, lufttryck, vindstyrka och temperatur studerats. Automatisk registrering av data har pågått i station Slaka, isälvsmaterial, under perioden november 1993 t o m november 1995. I station Börje, morän, påbörjades mätningarna likaså i november 1993 och avrapporteras t o m december 1995. Den automatiska registreringen fortsätter tills vidare.

Manuella mätningar har dessutom utförts med avseende på radonhalt och fuktighet i jorden.

### **2.1. SLAKA**

Mätlokalen ligger 7 km sydväst Linköpings centrum, se *Figur 1*, i ett nord-sydligt stråk med isälvs sediment, Slakaåsen. Isälvs sedimenten har en varierande sammansättning med lager av silt, sand och grus. Åskärnan består i allmänhet av grovt material, grus och sten, Fotobilaga 1. Åsen är i Slaka utbildad som en flack, bred och oregelbunden rygg. Havets svallning har dessutom ytterligare utjämnat den ursprungliga åsformen och tydliga strandvallar finns ibland utbildade vid nivå 95 m över havet. Eftersom isälvs sedimenten ligger i ett område med israndbildningar förekommer även morän inlagrat i och på isälvs sedimenten, som kan vara kraftigt störda med veckbildningar och förkastningar. Hög halt av block i ytan är vanligt förekommande på åsen i Slakaområdet.

Berggrunden i området utgörs av smålandsgraniter och smålandsporfyrier med måttlig uranhalt, 2,5 - 3,5 ppm. Drygt en mil norr om Slaka är paleozoiska bergarter



Figur 1. Slaka. Mätlokalen i förhållande till Linköping.

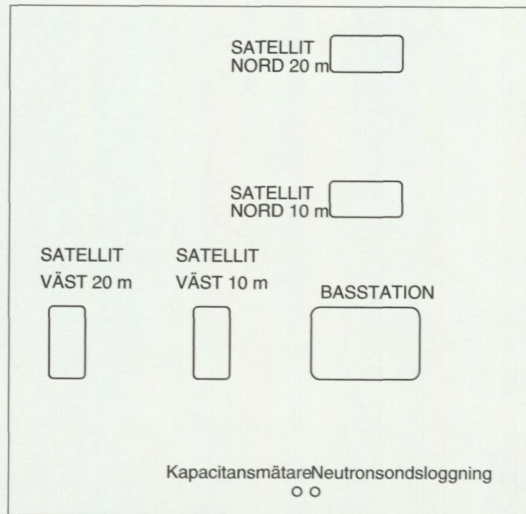
fast anstående med bl a kambriska sandstenar, uranhaltiga alunskifferar och ordovisiska kalkstenar. Eftersom den huvudsakliga isrörelseriktningen har varit nord-sydlig har det paleozoiska bergartsmaterialet spridits söderut av inlandsisen och inslaget av alunskiffer i Slakaåsen är märkbart. Stenräkning av grusfraktionen (8,0-11,3 mm) gav 64,0 % lerskiffer och sandsten, 6,7 % alunskiffer och 29,3 % av den lokala smålandsgraniten.

Grundvattenytan ligger enligt tidigare undersökningar ca 10 m under markytan. Vegetationen består av upp vuxen tallskog och yngre lövträd, främst ek.

Vid gammaspektromettermätningar har följande värden erhållits på respektive djup vid mätning i en grop:

Mätdjup (m)	Kalium (%)	Uran (ppm)	Torium (ppm)
0,7	2,2	6,3	8,1
1,0	1,9	5,9	6,7
1,5	1,8	6,5	6,3
2,5	2,3	6,2	7,2

Instrumenteringen har fördelats på dels en basstation dels fyra satellitstationer (Slaka) i enlighet med Figur 2. Vid satelliterna har temperaturen registrerats under

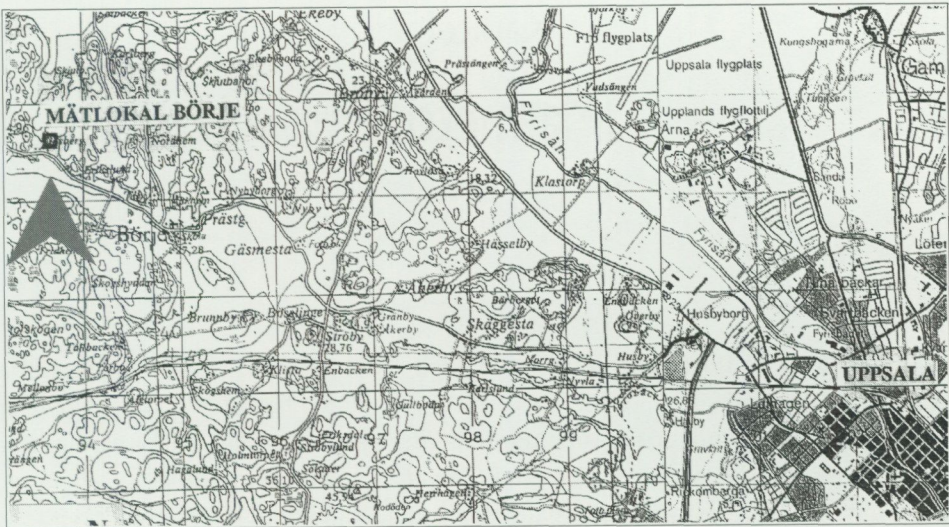


**Figur 2. Mätlokal Slaka med fördelning av instrument på basstation, satelliter och rör för registrering av jordens vatteninnehåll (kapacitansmätare respektive neutronsond).**

hela mätperioden. Planerad flytt av övriga instrument, radon- och fuktighetsregistrering, mellan satelliterna har av kostnadsskäl reducerats till en flytt från väst 10 m till väst 20 m, 1994-06-14.

## 2.2. BÖRJE

Mätlokalen ligger i en mindre moränrygg i Tidsberg; Börje ca 10 km västnordväst Uppsala centrum på en nivå av ca 30 m över havet, *Figur 3* och Fotobilaga 2-3. Moränen framträder främst i anslutning till hållområden och i högre belägna partier, i lägre liggande områden överlagras den av glacial och postglacial lera. Block förekommer ofta rikligt på moränen och även i områden med tunn lera. Moränen är av mycket lokalt ursprung, sandig-moig till sandig-grusig med hög stenhalt. Det är en kompakt bottenmorän med endast enstaka sliror och linser av sorterat material. Moränen är osvallad eller mycket svagt svallad. Bergartsinnehållet i moränens grusfraktion består till 100 % av den lokala graniten och är mycket kantigt. Berggrunden är rikligt blottad i området, nordväst om mätlokalen finns ett större hållparti. Den består av en röd medelkornig sur urgranit s k Vängegranit med en uranhalt som varierar mellan 4 och 11 ppm. Gammastrålningen i området varierar mellan 15 och 26 mikroröntgen per timme. I den västra delen av moränryggen finns en tre meter djup skärning från vilken prover togs för analyser av uran och radium. Vid gammaspektromettermätning i skärningen och på en närbelägen håll erhöles följande resultat.



Figur 3. Börje. Mätlokalen i förhållande till Uppsala.

Material	Kalium (%)	Uran (ppm)	Torium (ppm)
Morän	5,1	6,0	29,6
Granit	4,0	4,1	22,1

Moränryggen används som betesmark och vegetationen består av gammal blandskog med tall och gran.

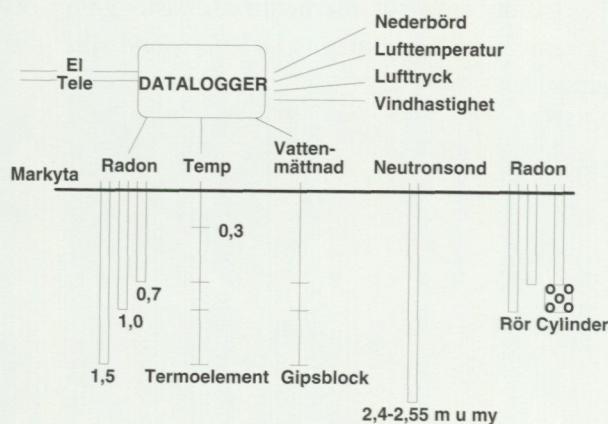
Lokalen har bestått av en basstation samt rör för neutronsondsloggning och emanometer-mätning. Inget grundvatten har iakttagits i neutronsondsröret som når berggrunden på 2,5 m djup.

# Kapitel 3.

## Mätmetoder

Radonhalten i jordluft varierar med tiden och det är därför viktigt att ha så stabila mätförutsättningar som möjligt. De olika instrumenten har till största delen varit fast installerade. Utöver radonhalten har ytterligare ett antal klimatparametrar samlats in dels i jorden på olika mätdjup dels i atmosfärluften, se *Figur 4*. Mätsignaler har registrerats motsvarande jordens radonhalt på tre nivåer, vattenmättnadsgrad på tre nivåer, jordtemperatur på fyra nivåer samt lufttryck, lufttemperatur och nederbörd (regn/naturligt smält snö).

Eftersom flera av de valda mätparametrar varierar relativt snabbt måste insamlingen av data kunna göras med korta tidsintervall. De fasta mätinstrumenten har därför anslutits till ett automatiskt datainsamlingssystem, datalogger, med valfria tidsintervall. De två mätstationerna har haft fast elinstallation och teleanslutning för överföring av mätdata i loggern till dator. Under de första ca tre månaderna, perioden november 1993 - ca januari 1994, har respektive datalogger registrerat medelvärdet av 15 stycken enminutersavläsningar. Återstående mätperiod, från februari 1994, glesades insamlingen ut till medelvärdet av 12 femminutersavläsningar d v s registrerade mätdata varje timma. Dessutom har kompletterande mätningar utförts manuellt med handburna instrument.



ningar d v s registrerade mätdata varje timma. Dessutom har kompletterande mätningar utförts manuellt med handburna instrument.

**Figur 4.** Instrumentering av basstationerna i Slaka och Börje.

### 3.1. RADON

#### Passiva mätare

Radonhalten har mätts med passiva mätare typ Alphameter 400 tillverkade av företaget Alphanuclear, Kanada. En kisel-detektor med ytan 400 mm<sup>2</sup> registrerar alfastrålning med större energi än 1 MeV. Uppmätta pulser av radongas överförs till datalogger och summeras successivt.

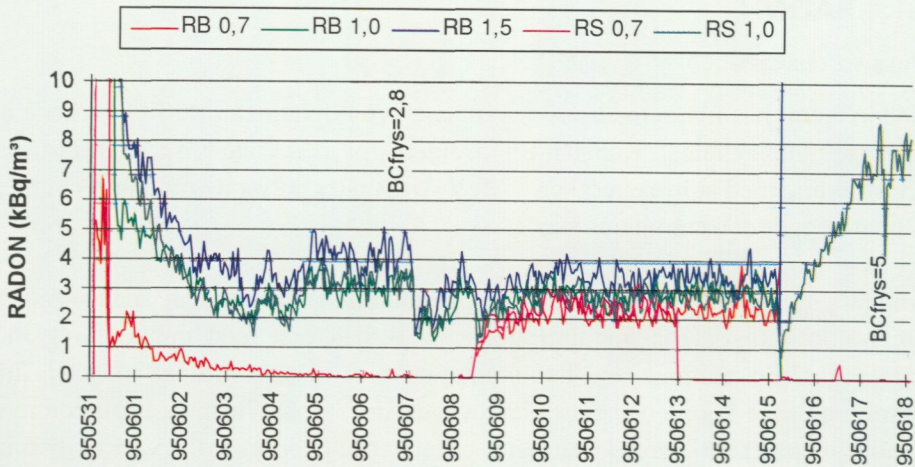
Antalet pulser per tidsenhet är ett mått på radonhalten. Radonmätarna har byggts om för att fungera på mätdjup större än 0,5 m och med uppkoppling mot datalogger. En gummikrage har monterats runt mätaren för att få en lufttät anslutning mot i jorden förinstallerade järnrör, Ø 68-76 mm. Luftströmning genom järnröret har därmed förhindrats. Mätaren har kontinuerligt varit uppvärmd med en värmekabel för att motverka fuktutfällning på elektroniken.

Alfapartiklar från bl a radondöttrar dämpas av en 64 mm luftspalt före detektorn. Eventuell påverkan av torongas, som också avger alfastrålning, motverkas med ett Gore-Tex filter. Det mesta av torongasen hinner därmed sönderfalla under diffusionen fram till detektorn eftersom halveringstiden är 55 s. Däremot påverkas inte radongasen nämnvärt av filtret då halveringstiden är 3,8 dygn.

#### Jämförande mätningar

Kalibrering av Alphameter-mätarna har skett genom mätningar före installation i SSI:s radonrum. För 10 mätare erhöles medelvärde 21,4 ± 1,2 (standardavvikelse = 1,1) pulser per timma och kBq/m<sup>3</sup>. Medelvärdet har använts vid omräkning från pulser till kB/m<sup>3</sup>.

I juni 1995 gjordes jämförande mätningar genom att tillfälligt flytta radonmätarna i Slaka från sina mätrör i jorden till ett relativt lufttätt utrymme, frysbox, där radonhalten kunde hållas kring 5 à 10 kBq/m<sup>3</sup> med hjälp av s k rödfyr (bränd alunskiffer). I enlighet med *Figur 5* konstateras att fyra av fem Alphameter-mätare i Slaka visade jämförbara mätvärden. Den femte, RB 0,7, fungerade tillfredsställande igen efter byte av batterier. En annan mätare, RS 0,7, har till och från haft kabelfel under de jämförande mätningarna. De kraftiga variationerna i radonhalt orsakas dels av vädring i samband med att frysboxen öppnats dels av att locket till frysboxen suttit olika tätt. Under inledningen av jämförelsetestet var det många kablar som klämdes under locket till frysboxen varför anslutningen blev relativt dålig. Senare delen av mätperioden i *Figur 5* var det bara en mätare inkopplad med tunna kablar varför lockets tätning blev betydligt bättre.



**Figur 5. Jämförande mätningar i SGI's frybox med radonmätarna från Slaka. Med BCfrys avses momentan emanometermätning med Bondar Clegg instrument.**

I Börje har de tre Alfameter-mätarna registrerat pulser under hela mätperioden men vid några tillfällen har mer eller mindre hastiga nivåförändringar ägt rum.

### Emanometermätningar

Som ett komplement till den automatiska mätningen med passiva mätare har manuella mätningar utförts i fasta mätrör vid basstationerna vid oregelbundna tillfällen. Mätrören har ytterdiametern 25 mm med åtta hål kring den nedre delen. De har varit installerade på djupen ca 0,7 respektive 1,0 m. Mätningar har utförts med emanometrar som suger radonhaltig jordluft till en mätkammare. Instrumentet har varit av två typer, halvledardetektor respektive Lucas-cell. Instrumentet med halvledardetektor, Markus 10, har tillverkats av Gammadata Mätteknik AB och instrumentet med Lucas-cell av Bondar Clegg (Re 279), Kanada. Med Lucaskammare kan man mäta alfastrålningen över tiden och på så sätt beräkna eventuell inblandning av torngas och radondöttrar.

Kalibrering av Markusinstrumenten har skett ca en gång per år i laboriemiljö med 80 % relativ fuktighet av Gammadata Mätteknik AB. Bondar Clegg instrumentets omräkningsfaktor har kontrollerats regelbundet genom jämförande mätningar mot Markusinstrument i jord med höga radonhalter.

Mätningar har också utförts med emanometrar anslutna till nedgrävda cylindrar, 1,0 m under markytan i Slaka respektive 0,7 m i Börje, och försedda med två smala

mättror upp till markytan. Cylindrarna av papp har täta ändar men sidorna är rikligt försedda med lufthål som täckts med fiberduk för att förhindra att jordpartiklar sugas in. Måtten på cylindern i Slaka är 85 mm och höjd 150 mm. Volymen är således 0,85 liter. Motsvarande mått för Börje är 90 mm och höjd 210 mm d v s en volym av 1,34 liter. Volymen kan jämföras med den volym som Markusinstrumentet suger, ca 0,9 liter, respektive Bondar Clegg instrumentet, ca 0,5 liter.

I Börje har två Markusinstrument använts parallellt. Dessutom har Gammadata utfört ett flertal mätningar med egna Markusinstrument under våren 1994 i projektets mättror, resultaten redovisas i Bilaga B 8.

### **3.2. NEDERBÖRD**

Nederbörden har mätts vid bägge mätstationerna med regnmätare som registrerar mätpulser motsvarande 1 mm regn. Mätarna är av typen Rain-o-matic från Pronamic, Danmark, med uppsamlingsytan  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  (5x10 cm). Enligt SMHIs anvisningar bör nederbördsräknare placeras 1,3 m över mark i vindskyddat läge. I Slaka gjordes kompromissen att utnyttja en närbelägen glänta i skogen och lyfta upp mätaren till ca 3 m över mark. Nederbördsräknarna har varit anslutna till respektive datalogger som successivt summerar mätpulserna.

Nederbördsuppgifter har också inhämtats från SMHIs närbelägna station i Malmslätt, Linköping. Nederbörden rapporteras per dygn (kl 7-7 vintertid). Från SMHI har också inhämtats uppgifter om maximalt snödjup respektive månad.

Skillnader mellan mätmetoderna märks framför allt under vinterhalvåret. De lokala mätarna kan inte registrera frusen nederbörd utan snö och is registreras med reduktion för avdunstning när den smält. De lokala mätarna har en bättre upplösning genom att nederbörden registreras varje timma.

### **3.3. VATTENMÄTTNADSGRAD**

Vatteninnehållet i jordens porluft är erfarenhetsmässigt en svår mätt parameter. Under projektplaneringen har för- och nackdelar med olika mättekniker värderats. Valet föll på s k gipsblock eftersom dessa kan användas oavsett väderförhållanden året runt med enkel hantering och till en låg kostnad. Tekniken med gipsblock är att en ström läggs över blocket, ca 22 mm och längd 35 mm. Fuktigheten i gipsblocket ger en mätbar spänning som är proportionell mot fuktigheten i kringliggande jord. Blocken har kalibrerats mot jordmaterial med kända vattenförhållanden. Standardutrustningen med manuellt mätinstrument har kompletterats med elektronik, utvecklad av SGI, för att passa ihop med dataloggern.

Gipsblocken har installerats fasttejpade på smala plaströr som tryckts ner försiktigt till botten i de förinstallerade järnrören, 68-76 mm, öppna nedåt mot jorden. För att förbättra kontakten mot jorden har extra jord hållts ner i järnröret.

Nackdelar med mätsystemet är att det är relativt trögt för vattenförändringar i jorden och att onoggrannheten kan bli besvärande stor. Som alternativ har tensiometrar diskuterats men nackdelen är att dessa måste frostskyddas. Även mätning med TDR-teknik (Time Domain Reflectometry; Herkelrath et al 1991) övervägdes men måste avskrivas av kostnadsskäl.

Som komplement till gipsblocken har manuella mätningar med neutronsond gjorts i fasta mätrör. I Slaka användes ett PVC-rör och i Börje ett järnrör. Neutronsonden, Mini Basc typ IPE 111 från Nucletronics, Danmark, innehåller en gammastrålningskälla och en neutronstrålningskälla. En del av den utsända strålningen i jorden återvänder till proben i jorden och ger signaler proportionella mot densitet och vattenhalt varefter även porositet, vattenkvot och vattenmättnadsgrad kan beräknas. Neutronsondsmätningarna har kalibrerats för Slaka dels mot vattenkvoten på prover in situ dels genom att välja en konstant som avviker från den aktuella sönderfallskonstanten för gammastrålningskällan så att utfallet av parametrarna våtdensitet, torrdensitet och porositet samtidigt blir inom allmänt accepterade intervall: 1600 à 2000 kg/m<sup>3</sup>, 1350 à 2025 kg/m<sup>3</sup> respektive 25-50 %.

Under hösten 1995 har Markus-emanometrarna kompletterats med en fuktmätare från Gammadata Mätteknik, som registrerar relativ fuktighet i den uppsugna jordluften.

Vid några tillfällen under hösten 1995 har manuella mätningar utförts i Slaka med en av Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) nyutvecklad fuktighetsgivare, "kapacitansmätare". Mätningarna gjordes i ett förinstallerat plaströr. En mätprob, som sänks ner i röret, alstrar en frekvens som är i proportion till den omgivande jordens fuktighet. Inom projektets tidsram har endast manuella mätningar kunnat genomföras. Färdigutvecklad ska mätproben kunna kopplas till en datalogger för kontinuerlig registrering. Mätningarna har delvis gjorts samtidigt med neutronsondsmätningar i ett annat rör på 1,4 m avstånd.

### **3.4. LUFTRYCK**

Luftrycket har registrerats vid respektive basstation. För ändamålet har absoluttryckgivare med Keller-membran använts. En omräkningsfaktor har utnyttjats efter kalibrering dels före installation mot en barometer (SGI) dels direkt efter

installation på mätplatserna mot en serie lufttrycksdata från SMHIs stationer i Malmslätt respektive Upplands flygflottilj. Mätarna har suttit inuti ett mätskåp på respektive station ca en meter över markytan.

### **3.5. TEMPERATUR**

Temperaturen har mätts med termoelement i jordluften, atmosfärluften (1 m över markytan) och i mätskåpen för bl a datalogger. Termoelementen består av sammanlödda kablar av koppar och konstantan. Noggrannheten är normalt bättre än 0,5 °C. Under en period, hösten 1995, har också en temperaturgivare suttit tillsammans med en radongivare-Alphameter i frysboxen för att studera eventuella samband mellan radonavgång och temperatur. Avsikten med att registrera temperaturen i mätskåpen har varit att ha kontroll över eventuella driftsproblem orsakade av frost eller temperaturchocker med kondensutfällning. Mätskåpen har varit isolerade och utrustade med värmeelement för att motverka frost.

### **3.6. VINDSTYRKA**

Vinduppgifter har hämtas från SMHIs mätstationer i Malmslätt (Linköping) på 5 km avstånd respektive Upplands flygflottilj, avstånd 6 km. Vinden registreras som medelvind under tio minuter var tredje timma (UTC).

Lokalt i Slaka har en vindmätare/anemometer av märket Halcomaster WM-23 varit monterad mot dataloggern under tiden 19950615 - 19950731.

### **3.7. URAN OCH RADIUM, LABORATORIEANALYSER**

För att bedöma graden av radioaktiv ojämvtikt har mängderna uran-238 och radium-226 analyserats i jordprov, som tagits på samma nivåer som mätningarna utförts, nämligen 0,7, 1,0 och 1,5 m djup. Vid Slaka gjordes dessutom analyser av prov från 2,5 m djup. Analyserna har utförts vid SGU och vid Lunds Universitet (alfaspektrometri). Proven har först delats upp i olika kornfraktioner, se *Tabell 1* och *2*, som analyserats var för sig med alfaspektrometri efter kemisk separation. Resultaten av bestämningarna visas för Slaka i *Tabell 1* och för Börje i *Tabell 2*. Tabellerna visar också aktivitetskvoten, Ra/U.

**Tabell I Aktiviteten för radium och uran samt Ra/U-aktiviteten vid fyra olika mätnivåer och för olika partikelstorlekar avseende isälvsmaterial i Slaka.**

Djup m	Partikelstorlek µm	Vikt %	Ra-226 Bq/kg	U-238 Bq/kg	U-238 ppm	Ra/U Aktivitetskvot
0,7	<63	6,8	492	271	22,0	1,82
0,7	63-125	3,7	98	45	3,7	2,18
0,7	125-250	8,6	59	24	2,0	2,46
0,7	250-500	11,5	51	36	2,9	1,42
0,7	500-1000	11,5	69	32	2,6	2,16
0,7	1000-2000	10,7	99	72	5,9	1,38
0,7	2000-4000	23,7	79	39	3,2	2,03
0,7	4000-5600	11,7	65	68	5,5	0,96
0,7	5600-8000	11,9	79	72	5,9	1,10
<b>0,7</b>	<b>&lt;8000</b>	<b>100</b>	<b>102</b>	<b>63</b>	<b>5,1</b>	<b>1,61</b>
1,0	<63	3,5	265	191	15,5	1,39
1,0	63-125	4,1	45	30	2,4	1,50
1,0	125-250	26,2	22	9	0,7	2,44
1,0	250-500	35,2	25	17	1,4	1,47
1,0	500-1000	23,8	64	56	4,6	1,14
1,0	1000-2000	6,2	215	194	15,8	1,11
1,0	2000-4000	1	617	717	58,3	0,86
<b>1,0</b>	<b>&lt;4000</b>	<b>100</b>	<b>60</b>	<b>49</b>	<b>4,0</b>	<b>1,24</b>
1,5	<63	2,9	276	153	12,4	1,80
1,5	63-125	2,9	57	39	3,2	1,46
1,5	125-250	17,2	32	17	1,4	1,88
1,5	250-500	42,4	31	14	1,1	2,21
1,5	500-1000	24,1	57	35	2,8	1,63
1,5	1000-2000	8,6	131	135	11,0	0,97
1,5	2000-4000	1,9	194	264	21,5	0,73
<b>1,5</b>	<b>&lt;4000</b>	<b>100</b>	<b>57</b>	<b>39</b>	<b>3,2</b>	<b>1,44</b>
2,5	<63	0,9	332	146	11,9	2,27
2,5	63-125	1,8	66	36	2,9	1,83
2,5	125-250	10	34	18	1,5	1,89
2,5	250-500	22,2	45	21	1,7	2,14
2,5	500-1000	24,3	68	39	3,2	1,74
2,5	1000-2000	26,9	94	58	4,7	1,62
2,5	2000-4000	9,8	116	80	6,5	1,45
2,5	4000-5600	1,8	148	114	9,3	1,30
2,5	5600-8000	2,2	164	165	13,5	0,99
<b>2,5</b>	<b>&lt;8000</b>	<b>100</b>	<b>77</b>	<b>47</b>	<b>3,8</b>	<b>1,64</b>

**Tabell 2 Aktiviteten för radium och uran samt Ra/U-aktiviteten vid fyra olika mätnivåer och för olika partikelstorlekar avseende morän i Börje.**

Djup m	Partikelstorlek µm	Vikt %	Ra-226 Bq/kg	U-238 Bq/kg	U-238 ppm	Ra/U Aktivitetskvot
0,7	<63	7	153	117	9,5	1,31
0,7	63-125	3,6	107	82	6,7	1,3
0,7	125-250	6,4	38	35	2,8	1,09
0,7	250-500	8,7	38	33	2,7	1,15
0,7	500-1000	10,7	35	28	2,3	1,25
0,7	1000-2000	13,6	37	36	2,9	1,03
0,7	2000-4000	17,2	37	37	3,0	1,00
0,7	4000-5600	18,3	35	38	3,1	0,92
0,7	5600-8000	14,7	34	43	3,5	0,79
<b>0,7</b>	<b>&lt;8000</b>	<b>100</b>	<b>46,8</b>	<b>43,8</b>	<b>3,6</b>	<b>1,07</b>
1,0	<63	15,4	111	73	5,9	1,52
1,0	63-125	9,6	52	40	3,3	1,3
1,0	125-250	12,5	40	25	2,0	1,60
1,0	250-500	9	41	59	4,8	0,69
1,0	500-1000	9,3	37	47	3,8	0,79
1,0	1000-2000	10	39	37	3,0	1,05
1,0	2000-4000	15,4	41	55	4,5	0,75
1,0	4000-5600	10,3	47	39	3,2	1,21
1,0	5600-8000	8,6	45	43	3,5	1,05
<b>1,0</b>	<b>&lt;8000</b>	<b>100</b>	<b>53,1</b>	<b>47,8</b>	<b>3,9</b>	<b>1,11</b>
1,5	<63	18,3	100	63	5,1	1,59
1,5	63-125	12,1	52	44	3,6	1,18
1,5	125-250	16,7	36	25	2,0	1,44
1,5	250-500	11,3	34	35	2,8	0,97
1,5	500-1000	9,5	40	35	2,8	1,14
1,5	1000-2000	10,1	37	38	3,1	0,97
1,5	2000-4000	9,8	38	40	3,3	0,95
1,5	4000-5600	5,7	39	47	3,8	0,83
1,5	5600-8000	5,4	38	42	3,4	0,90
<b>1,5</b>	<b>&lt;8000</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>41</b>	<b>3,3</b>	<b>1,22</b>

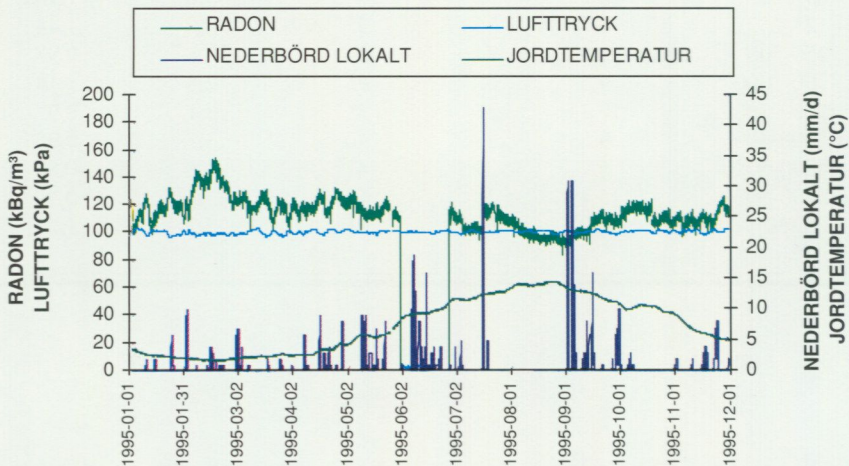
## Kapitel 4.

# Resultat

### 4.1. SLAKA

Radonhaltens variationer visas systematiskt i Bilagorna A 1-7 med en parameter i sänder. I *Figur 6* visas ett exempel på samredovisning av flera parametrar. Det ökar förståelsen för att det kan finnas flera orsaker till att radonhalten förändras. Möjligheterna att tekniskt redovisa flera parametrar samtidigt är begränsade, dessutom försvåras läsbarheten.

Under vårvintern har radonhalten legat nära årsmedelvärdet. Radonhaltsvariationerna har ofta haft ett samband med förändrat lufttryck, se avsnittet 4.1.4. Vid snösmältningen stiger radonhalten snabbt till årsmaximum, Bilaga A 2, för att sedan falla, i början relativt snabbt, under våren till relativt låga sommarvärden. Från årsminima i början av september stiger radonhalterna igen till följd av ökad



**Figur 6.** Exempel på redovisning (jan-nov 1995) av radonhalt och jordtemperatur 1,0 m under markytan jämte lufttryck och lokal nederbörd. Detaljerna framgår tydligare genom redovisning av radon jämte en övrig parameter i bilagda diagram.

grundvattenbildning. Radonhaltsvariationerna för mätdjupet 1,5 m är förhållandevis stora med otydliga årstidsvariationer.

Radonhalten påverkas av vatteninnehållet i jordens porer. Typiska resultat av radonhaltsmätningar visar att när andelen vatten i porutrymmet ökar så ökar också radonkoncentrationen, se exempelvis Slaka snösmältning mars 1994 och februari 1995 och kraftig nederbörd juli 1995. Eftersom jorden varit frusen i början av snösmältningen är den förhöjda radonhalten sannolikt också delvis orsakad av minskade möjligheter till radonavgång genom markytan, lockeffekt.

För satellitmätaren 1,0 m under markytan noteras kraftiga nedgångar i radonhalten under kortare perioder i januari och mars 1994. Det finns ett samband i tiden med övergång från minusgrader i atmosfärluften till plusgrader. Således har snötäcket smält under dessa perioder med ökat vatteninnehåll i jorden. Motsvarande nedgång i radonhalten saknas dock för övriga radonmätare och enligt den statistiska undersökningen, kapitel 5, är radonvärdena inte trovärdiga för denna mätare.

#### 4.1.1. Radon

##### *Slaka*

Karakteristiska värden för mätperioden (nov 1993-nov 1995), Bilaga A 1, är:

Mätdjup (m u my)	Basstation (kBq/m <sup>3</sup> )	Satellit, väst 10/20 m (kBq/m <sup>3</sup> )
0,7	100 ±30	70 ±20
1,0	120 ±35	90 ±25
1,5	120 ±35	-

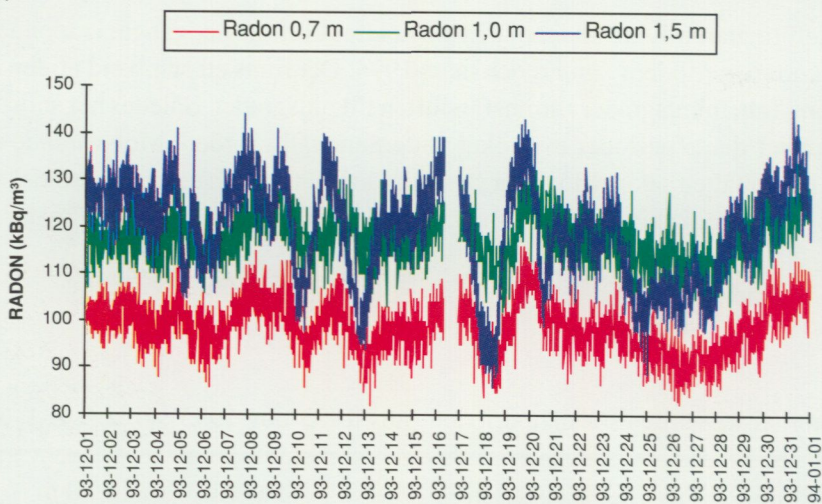
Nedan relateras ett antal händelser som medfört onormala radonhalter.

För basradonmätaren 0,7 m under markytan noteras en trend med fallande radonhalter under perioden 9404-9506. Efter batteribyte har radonhalterna återgått till normala ursprungsvärden.

För basradonmätaren 1,5 m under markytan noteras ett trendbrott efter att mätaren suttit monterad i frysbox, juni 1995. De lägre radonhalterna efter återinstallation beror sannolikt på att jordluft läckt ut mellan radonmätaren och ytterröret.

Markant högre radonhalter registrerades efter ett åskväder 940604. Halterna sjönk sedan olika snabbt för respektive mätare/mätdjup fram till ett nytt åsknedslag som resulterade i omfattande skador i utrustningen och ett längre avbrott. De förhöjda halterna under sommaren 1994 (efter 940604) bedöms vara felaktigt registrerade.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att radonhalterna varit relativt stabila sett över hela mätperioden, nov-93 - nov-95. Variationerna är upp till ca 30 %. Radonhalterna i det korta perspektivet, något dygn, varierar för passiva mätare med ca 10 %, se *Figur 7*. För det större mätdjupet, 1,5 m, är variationerna större, 25 %.



**Figur 7.** Korttidsvariationer av radonhalter registrerade varje minut och ritade som medelvärdet för varje kvart. Mätdjup 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan.

#### 4.1.2. Inverkan av nederbörd

Radonhalt och registrerad nederbörd samredovisas i Bilaga A 2. Radonhalten ökar i samband med häftiga regn. Porenna i jordens ytskikt vattenfylls och förhindrar radonavgång. Tydliga exempel återfinns för mätdjupen 0,7 och 1,0 vid riklig nederbörd i juli och september 1995, Bilaga A 2:3.

Nederbörden var under 1994 något lägre än normalt (490 mm jämfört med medelvärdet 516 mm för perioden 1961-90 enligt SMHI-Malmslätt) och under 1995 högre än normalt (561 mm). Fördelningen framgår av Bilaga A 2 där riklig nederbörd noteras för september 1994 och 1995 liksom våren-försommaren 1995. Särskilt torra månader noteras för april-maj, juli och november 1994 samt augusti, oktober och november 1995.

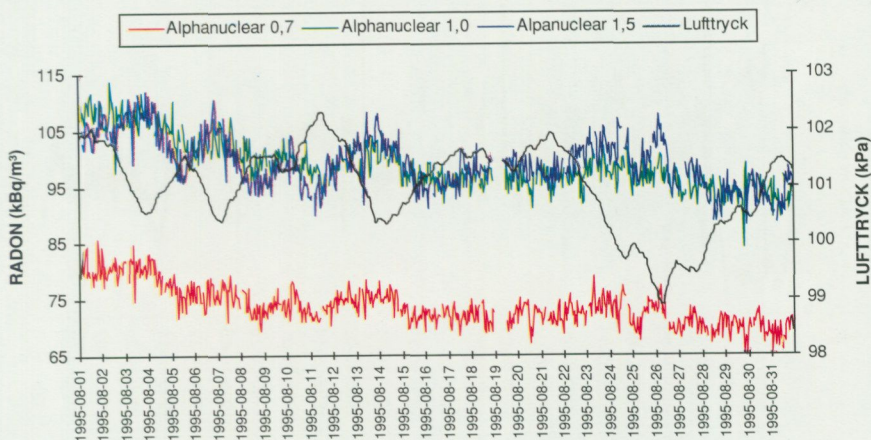
### 4.1.3. Inverkan av vattenmättnadsgrad

Radonhalter och vattenmättnadsgrad samredovisas i Bilaga A 3. Under perioden juni-augusti 1995 har regelbundna manuella mätningar med neutronsond utförts som jämförelse. Gipsblocken visar sig vara alltför tröga i aktuella jordar och för de undertryck som rått större delen av tiden. Risken för feltolkningar från gipsblocken bedöms vara så stor att resultaten inte används för tolkning av samband med radonhalten.

Baserat på neutronsonden och väderdata konstateras att vattenmättnadsgraden minskar från juni till augusti 1995 samtidigt som radonhalten i jordluften sjunker. I september 1995 blir det omvända förhållanden p g a nederbörd varvid vattenmättnadsgraden stiger liksom radonhalten. Mattsson fann god korrelation mellan vattenmättnadsgrad och radonhalt för 0,7 m respektive 1,0 m djup under våren 1994.

### 4.1.4. Inverkan av lufttryck

I Bilaga A 4 och *Figur 8* samredovisas lufttryck och radon. Radonhalt och lufttryck är omvänt korrelerade och finns beskrivet i flera artiklar. Högt lufttryck har således ett samband med låga radonhalter och tvärtom. Mer nyanserat beskrivs att radonhalten reagerar främst på lufttrycksförändringar. Man kan i Slakamaterialet särskilja att de flesta lufttryckstopparna sammanfaller med radonminima och tvärtom. I vissa fall har förändringar av jordens vatteninnehåll, t ex snösmältning, större betydelse för radonhalten. I Mattssons undersökning erhöles en statistiskt signifikant negativ korrelation för våren 1994 och alla tre mätnivåerna.



**Figur 8. Samvariation mellan radonhalt på mätdjupen 0,7, 1,0 respektive 1,5 m och lufttryck.**

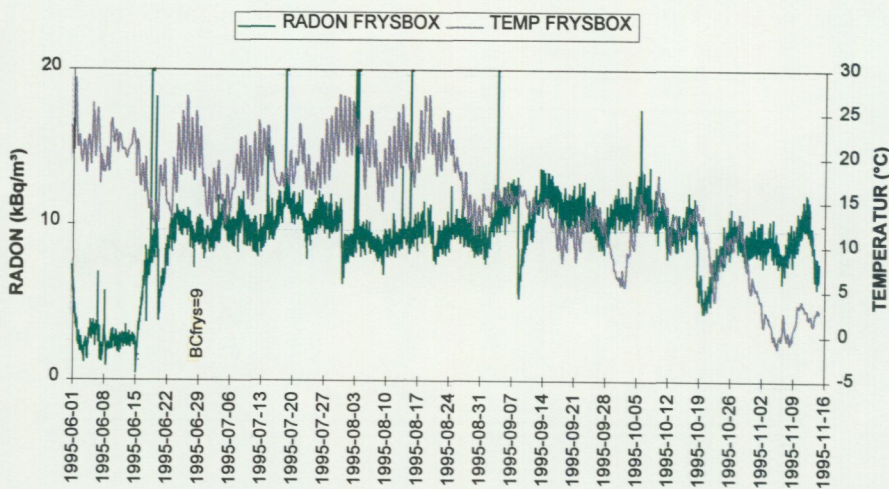
#### 4.1.5. Inverkan av temperatur

##### Jordtemperatur

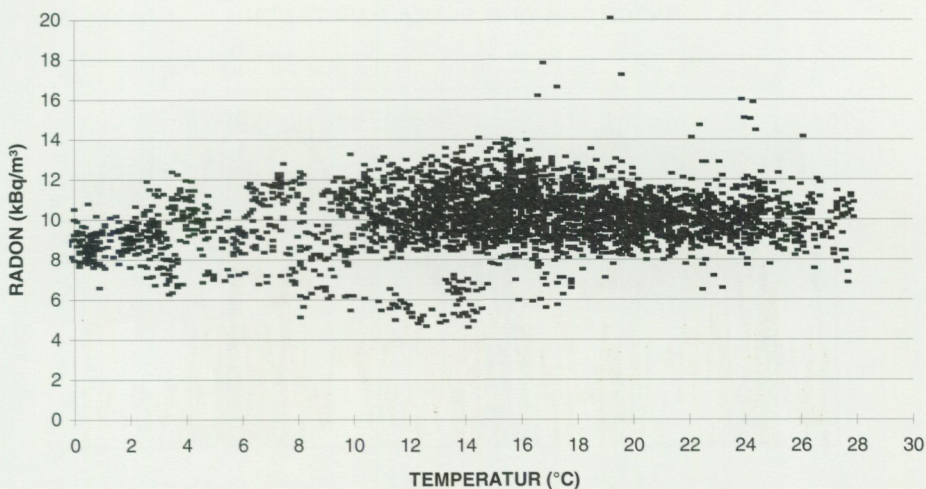
Jordtemperaturen är en av de parametrar som förväntas påverka radonhalten. Exempel på detta kan ses i *Bilaga A 5*. Enligt Ekvation 3 (Kapitel 6) är radonhalten i jordluft direkt proportionell mot temperaturen om övriga inverkanse parametrar är konstanta. I *Bilaga A 5* skulle således radonhalten vara som störst i augusti när jordtemperaturen kulminerar. Inverkan av höga temperaturer överskuggas dock av låg vattenmättnadsgrad och därmed ökad ventilation som sammantaget ger låga radonhalter. I sin statistiska undersökning fann Mattsson god negativ korrelation för mätdjupen 0,7 m och 1,0 m, men inte för 1,5 m.

I *Figur 9* redovisas fortsättningen på *Figur 5* (Avsnitt 3.1) med en radonmätare monterad tillsammans med en temperaturgivare.

*Figur 9* har också plottats som radonhalt - temperatur, *Figur 10*. Relativa fuktigheten i frysboxen har uppmätts till 81 % och 74,5 % vid två tillfällen, 950621 respektive 950628 med Gammadatas mätare. Enligt Åkerblom et al (1988) kan man förvänta att radonhalten ökar med 6,4 % vid en temperaturökning från 0 till +10 °C och 75 % vattenmättnadsgrad. Detta skulle bero på att emanationen förändras av temperaturen. Markkanen & Arvela (1992) fann emellertid ingen skillnad i radonemanation vid +1 °C respektive +20 °C och 5 % vattenhalt.



Figur 9. Jämförelse mellan radonhalt och temperatur i "frysbox". Med BCfrys avses momentan emanometermätning med Bondar Clegg instrument.



**Figur 10. Radonhalt plottad mot temperatur i "frysbox" under perioden 1995-06-23 – 1995-11-14.**

I *Figur 10* ökar radonhalten från 8,9 till 10,0 kB/m<sup>3</sup> (12,4 %) med linjär regression för temperaturintervallet 0 till +10 °C. Spridningen i radonhalt kring +10 °C är dock stor ( $r = 0,22$  för temperaturintervallet). Radonhalten ökar ytterligare med temperaturen till 15 à 16 °C varefter radonhalten avtar igen.

### *Lufttemperatur*

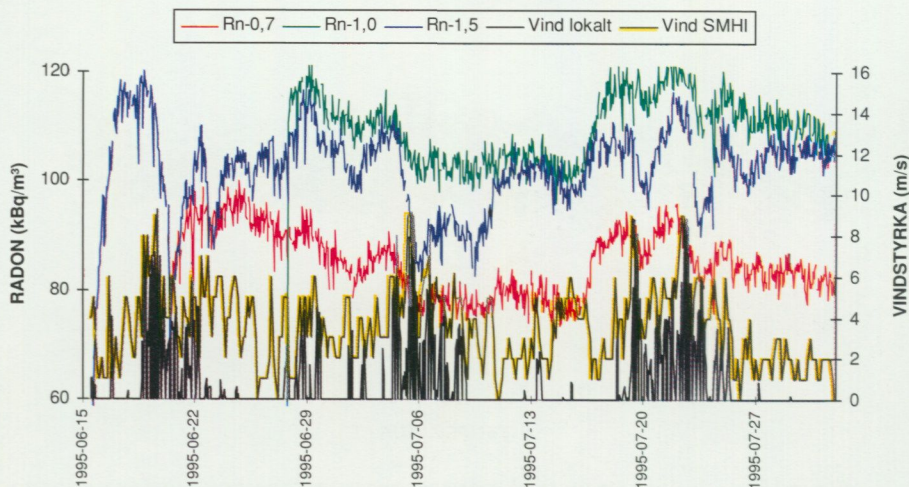
Lufttemperaturen redovisas tillsammans med markradonhalten på olika mätdjup i *Bilaga A 6*. Temperaturen har främst använts som hjälp för att tolka perioder med snösmältning och därmed ökad grundvattenbildning. Man kan tydligt se att då frosten släpper i början av mars 1994 respektive i början av februari 1995 ökar radonhalterna till en början för att därefter sjunka igen.

#### **4.1.6. Inverkan av vindstyrka**

Under den tid som en lokal vindmätare har varit monterad erhöles vindstyrkor som är jämförbara med uppgifter från SMHI-Malmslätt, *Figur 11*. Under övrig tid har endast uppgifter från SMHI-Malmslätt varit tillgängliga.

Det finns inga entydiga samband mellan hög vindstyrka och låga radonhalter i projektets mätserier, *Bilaga A 7*. Den högsta uppmätta vindstyrkan i Slaka, 16 m/s i mars 1994, sammanfaller visserligen med fallande radonhalter, *Bilaga A 7:1 och 3*, men också med en uppgång av lufttrycket. På samma sätt förhåller det sig i exempelvis juli 1995 som redovisas i *Figur 11*.

## RADON OCH VIND, SLAKA, BASSTATION



Figur 11. Vindstyrka vid SMHI-Malmslätt (medelvärde av tio enminutersavläsningar var tredje timma) respektive lokalt (kontinuerligt) jämte radonhalter på 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan.

### 4.2. BÖRJE

Resultaten redovisas i Bilaga B. Radonhalter redovisas tillsammans eller parallellt med en parameter i sänder. Resultaten för hela mätperioden redovisas i tvåårsdiagram för samtliga parametrar. Delresultat redovisas i års, månads- eller veckodiagram. För vissa parametrar, t ex lufttryck, är endast kortare perioder av intresse.

Mätdata har räknats om till medelvärden per dygn (alternativt summa mm per dygn för nederbörd) till tvåårsdiagrammen. I diagrammen för kortare perioder har mätdata per timme utnyttjats. Detta har till följd att resultaten kan synas olika, mellan tvåårsdiagram och månadsdiagram, där dygnsvariationen är stor t ex för nederbörd.

Ett åsknedslag i början av juni 1994 avbröt samtliga mätningar under 20 dagar. Vattenmättnadsmätningarna med gipsblocken anses trovärdiga fram till denna händelse, men har därefter inte fungerat tillfredsställande, varför resultaten efter avbrottet inte utnyttjats i analysen.

Järnrören för mätinstrumenten installerades med hjälp av borrbandvagn. På grund av moränens hårdhet var det nödvändigt att använda vattenspolning vid nedsättandet av rören. Det kan antagas att spolvattnet inte rann undan direkt utan fanns kvar

i anslutning till rören under viss tid, kanske ända fram till sommarens upptorkning 1994. Den första vinterns variationer i radonhalter tyder på detta. Vid installationen av järnrören utfördes tätning kring rören med den omkringliggande jorden. Kompletterande tätning med bentonit utfördes kring rören 8-9 september 1994 varefter radonvariationerna har varit lugnare, speciellt på 0,7 m. På mätdjupet 1,0 m har radonhalten fortsatt att variera på ett sätt som inte enkelt kan tolkas. Moräner innehåller per definition sten och block. I samband med nedsättandet av järnrören kan stenar och block ha rubbats, material spolats bort och hålrum ha bildats vilka har fungerat som brunnar för infiltrerande vatten. Mätstationen är omgiven av, som tidigare nämnts, gammal skog med gran och tall vilket innebär att det finns rötter av varierande grovlek kring mätrören. Rötterna kan fungera som makroporer och underlätta/styra vattentransporten nedåt. Hålrum/rötter finns sannolikt bl a i anslutning till neutronsondröret vilket påverkar mätresultaten (densitet) varför typiska moränvärden har antagits för porositeten i beräkningarna för de ytligare nivåerna.

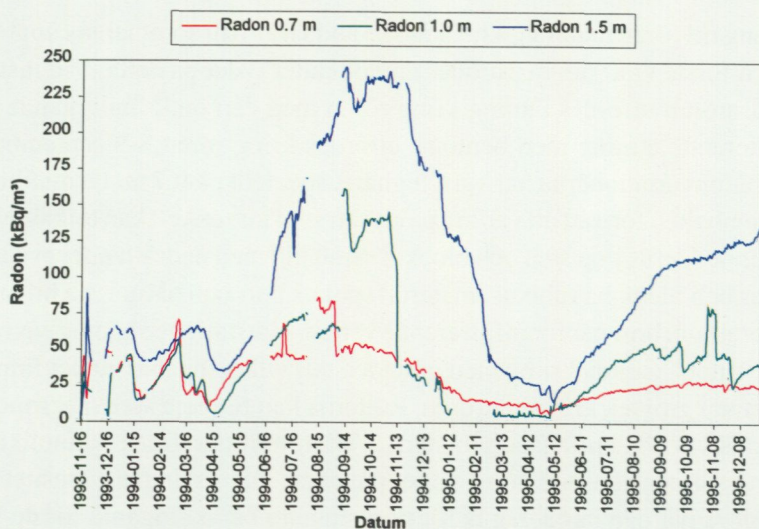
#### 4.2.1. Radon

##### *Passiva mätare*

Radonhalten i jordluften uppvisar en markant årstidsvariation med de största variationerna på 1,5 meters djup, (20 – 240 kBq/m<sup>3</sup>), och den minsta variationen på 0,7 meters djup, (10 – 75 kBq/m<sup>3</sup>). De lägsta halterna har uppmätts under våren och de högsta halterna från sensommaren till tidig vinter. Resultaten av uppmätta radonhalter presenteras i *Figur 12* och i Bilaga B.

De relativt låga och varierande radonhalter som uppmättes under vintern och tidig vår 1993 - 94 tolkas som hög vattenhalt i anslutning till rören vilket har minskat radongasens möjlighet att genom diffusion nå alfamätarna (se avsnittet 4.2). Vid Markusmätningarna under samma period erhöles i december 1993 värden ungefär i nivå med alfamätningarna för att fram till mars 1994 stiga kraftigt över alfamätningarna, Bilaga B 8:a.

I samband med markens tjälning under februari–mars 1994 steg radonhalten först på de två översta mätnivåerna och med fördröjning på 1,5 m. Vid tjällossningen i början av mars sjunker radonhalterna drastiskt, till nära noll på 0,7 och 1,0 meters nivå och återigen med fördröjning på 1,5 m till lägre nivå, Bilaga B 9:a-b. Under vintern 1995 registrerades varken tjälning eller stigande radonhalt men återigen sjönk radonhalterna till mycket låga nivåer under våren 1995. Vattenhalten i morän är som högst under senhösten/tidig vinter och våren och lägst under



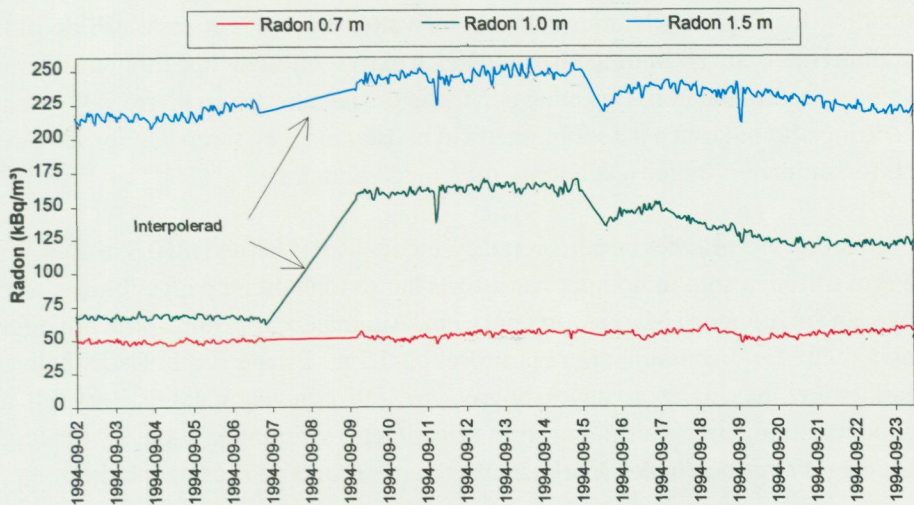
**Figur 12. Radonhalter på tre nivåer i Börje-morän november 1993 - december 1995. De hastiga förändringarna av radonhalten kommenteras i texten.**

sensommaren (Lundin, 1982). Om tjäle utbildas är tillförseln av nytt vatten normalt liten och grundvattennivån sjunker under den tjälade perioden fram till tjällossningen. Vid tjäle stiger "vattenhalten", i form av fruset vatten, genom kapillär transport av vatten *till* den tjälade marken medan jordlagret direkt under får minskande vattenhalt (t ex Harris, 1988; Lundin, 1989). Dessutom sker en omfördelning av vatten från finare till grövre porer. Om ingen tjäle utbildas kan nytt vatten tillföras till marken även under vintern och eftersom avdunstningen är liten förblir vattenhalten i moränen hög. I samband med tjällossning och/eller snösmältning blir vattenmättnaden hög i jorden närmast under markytan.

Bilaga B 10:a-d visar radonhalter och fyra övriga parametrar under 12 dagar i april 1995. Radonhalten på 1,0 m var nära noll under perioden, sannolikt p g a att vattenhalten var mycket hög i anslutning till mätinstrumentet. Från diagrammen kan utläsas att radonhaltens dygnsvariationer är mycket små, och något större på 1,5 m än på 0,7 m. 20-21 april registrerades lägre radonhalter, sannolikt beroende på tillskott av vatten till en jord nära vattenmättnad. Våren var kall och någon upptorkning av marken hade ännu inte skett. Från diagrammen kan dessutom utläsas att varken lufttrycks- eller temperaturförändringar har någon inverkan på radonhalten. Däremot påverkar lufttemperaturens dygnsförändringar jordtemperaturen med ca ett halvt dygns försening. På 1,5 m är förändringen i jordtemperatur liten. I Bilaga B 4:b visas radonhaltens variationer tillsammans med lufttryck under ett dygn i januari 1994. Radonhalten varierar mellan 38 och 48 kBq/m<sup>3</sup> på mätdjupen 0,7 m och 1,0 m och mellan 53 och 65 kBq/m<sup>3</sup> på 1,5 m.

De höga radonhalter som uppmättes under sensommaren och hösten 1994 tolkas som ett resultat av den mycket varma och torra sommaren med minskande vattenhalt i moränen. Enligt Markkanen & Arvela (1992) har morän den högsta emanationen vid ca 5 % vattenhalt och så låga vattenhalter kan ha förekommit i Börjemoränen under denna period. Höstregnen perkolerar mycket successivt till aktuella mätdjup och radonmätningarna påverkas, först på 0,7 m och därefter på djupare nivåer. Bilaga B 11:a-d och 12:a-b visar radonhalter och övriga parametrar under hela och delar av september 1995.

Under hösten 1994 syns hastiga upp- och nedgångar i radonhalterna på 0,7 m och 1,0 m, *Figur 13* och Bilaga B 1:a-b. Samma fenomen uppträdde under hösten 1995 men denna gång enbart på 1,0 m:s djup. I några fall uppträder de hastiga förändringarna i samband med strömavbrott eller tömning/omstart av dataloggern. I ett par fall finns ett tidsmässigt samband med kraftiga temperatursvängningar, t ex i november 1995, Bilaga B 14:a-b. Det finns emellertid också perioder med hastiga förändringar när inga samband kan ses. En förklaring kan vara att instrumenten/elektroniken (fukt-kondens-korrosion) periodvis inte har fungerat tillfredsställande. Misstanken har funnits att kortvariga spänningsförändringar på elnätet kan ha påverkat mätningarna. Det kan också finnas naturliga förklaringar som att makroporer och hålrum plötsligt har vattenfylts.



**Figur 13.** Markant uppgång av radonhalten på 1,0 meters djup och moderat uppgång på 1,5 meters djup. Tätning med bentonit utfördes kring mätrören 6 - 7 september 1994.

Vi har valt att presentera samtliga mätresultat från Alfamätningarna eftersom orsaken till de hastiga förändringarna i registrerade radonhalter inte har gått att entydigt förklara. Tekniska orsaker ligger närmast till hands, men eftersom Alfamätningarna har fortsatt på en till synes normal nivå efter en hastig förändring, är vi inte beredda att kassera samtliga eller delar av mätresultaten. Mätningarna har fortsatt t o m den 30 juni 1996 och under hela det första halvåret 1996 har de registrerade radonhalterna varit mycket stabila utan hastiga förändringar (data planeras bli publicerade i en kommande rapport. Värt att notera är också att inte i något fall har motsvarande hastiga förändringar uppträtt för de fem Alfamätarna i Slaka, vilket kan implicera att orsaken står att finna i speciella förhållanden vid Börjelokalen.

### *Emanometermätningar*

Under december 1993 - juni 1994 utfördes ett stort antal manuella mätningar med emanometerinstrumentet Markus 10 i de fast installerade rören på 0,7 m och 1,0 m. Mätningarna utfördes med olika exemplar av Markus 10 tillhörande SGU (två), SGI (ett) och ett från tillverkaren Gammadata. SGUs båda instrument kalibreras årligen av Gammadata. Instrumenten har justerats 10-20 % vid de kalibreringar som utförts. De olika Markusinstrumenten har uppvisat markerade skillnader i uppmätta radonhalter vid samma mättillfälle. Samtliga resultat presenteras i Bilaga B 8:a-b. Av bilagan framgår att de emanometermätta radonhalterna ligger högre eller mycket högre än alfamätningarna under hela vintern och våren, med undantag för några nollvärden när det var vatten i rören. En orsak till de olika resultaten kan vara att Markusinstrumentet är aktivt och suger upp luft jämfört med den passiva alfamätaren. En annan och trolig orsak kan vara en högre vattenmättnad kring alfamätarna p g a spolningen vid nedsättandet av rören. Under senvåren och försommaren ligger resultaten i nivå med varandra.

Sommaren 1995 grävdes en perforerad cylinder i hård papp ned till 0,7 m djup. Vid de fyra tillfällena som mätningar har utförts har radonhalten i pappcylindern varit högre än i mätningen i Markusröret på 0,7 m. Alfamätarnas resultat på 0,7 m ligger i nivå med Markusmätningarna i järnröret på 0,7 m, Bilaga B 8:b. Radonhalten i Markusröret på 1,0 m är något högre i tre fall och något lägre i ett fall än cylindermätningarna. Resultaten från Alphameter-mätningarna på 1,0 m ligger både något över och under Markusmätningarna i röret på samma mätdjup.

En del av radonatomerna sönderfaller på väg från porerna i jorden fram till hålrummet med det passiva mätinstrumentet, varför uppmätta radonhalter är underskattade. Ju större hålrummet är i jorden desto större är underskattningen av

radonhalten i jordluften. Vid här aktuella små hålrum är dock underskattningen av uppmätta radonhalter liten, Tanner (1991).

#### **4.2.2. Inverkan av nederbörd**

Nederbörd redovisas tillsammans med övriga parametrar i Bilaga B 3:a-b, 4:a och 6:b för 1993 - 1995. Nederbördsmätaren sitter öppet utan interceperande träd. Närmast mätstationen hindrar kringliggande träd och annan vegetation nederbörd från att nå marken. Av den registrerade nederbörden är det bara en liten del som infiltreras i marken och då främst under höst och vår. Hög avdunstning under sommaren innebär att endast längre och/eller kraftigare regnperioder kan förväntas ge ökad vattenmättnad på aktuella mätnivåer med viss fördröjning, om det inte finns öppna kanaler såsom makroporer och hålrum. Snömängderna har varit måttliga under aktuella vintrar och har inte registrerats lokalt.

Årsnederbörden för 1994 och 1995 avviker från varandra. Den lokalt registrerade nederbörden 1994 uppgår till 259 mm (SMHI-Uppsala flygplats 487 mm) och för 1995 registrerades 369 mm (SMHI 505 mm). Medelnederbörden för Uppsala enligt SMHI uppgår till 563 mm. Orsaken till att den lokala mätaren har registrerat mindre nederbörd än SMHI är främst att den lokala mätaren inte registrerar all snö och att dataloggern har haft driftsstörningar i juni och augusti 1994.

Huvuddelen av nederbörden har kommit under vår och höst båda åren men sommaren 1994 var torrare (och varmare) än följande sommar varvid marken kunde torka upp till djupare nivåer än 1995. Relativt kraftiga nederbördsperioder, Bilaga B 11:c, ger ingen, på 1,0 m eventuellt liten påverkan, på radonhalten i jordluft i september 1995.

#### **4.2.3. Inverkan av vattenmättnadsgrad**

Gipsblocken som användes för att mäta vattenmättnad i moränen visade sig tyvärr inte tillförlitliga eller var för tröga. Sannolikt fungerade gipsblocken i inledningen av mätperioden. Till i början av juni 1994 erhöles mycket samstämmiga resultat mellan de tre mätnivåerna med, 30 - 32 % vattenmättnad och med mycket små variationer, Bilaga B 3:a. Efter juni 1994 har erhållna mätdata uppvisat stora icke naturliga variationer varför dessa inte används i tolkningen tillsammans med övriga resultat. Sannolikt skadades elektroniken till gipsblocken i samband med åska i början av juni 1994. Neutronsondmätning har utförts vid fyra tillfällen. Den 6 september 1995 var vattenhalten 14 % på 0,7 m, 11 % på 1,0 m och 5 % på 1,5 m. Vattenmättnadsgraden var 24 %, 32 % och 19 % på respektive djup. I juni 1995 analyserades finfraktionernas vattenhalt i ett moränprov från 0,7 m djup med

resultatet 9 vikt-%.

Den 28 februari 1994 frös gipsblocket på 0,7 m och var fruset till den 10 mars, Bilaga B 9:a-b, se avsnitt 4.2.1.

Mattsson fann en delvis god negativ korrelation mellan vattenmättnadsgrad och radonhalt för alla tre mätnivåerna under våren 1994. Han bedömer dock korrelationen som fysikaliskt otillförlitlig.

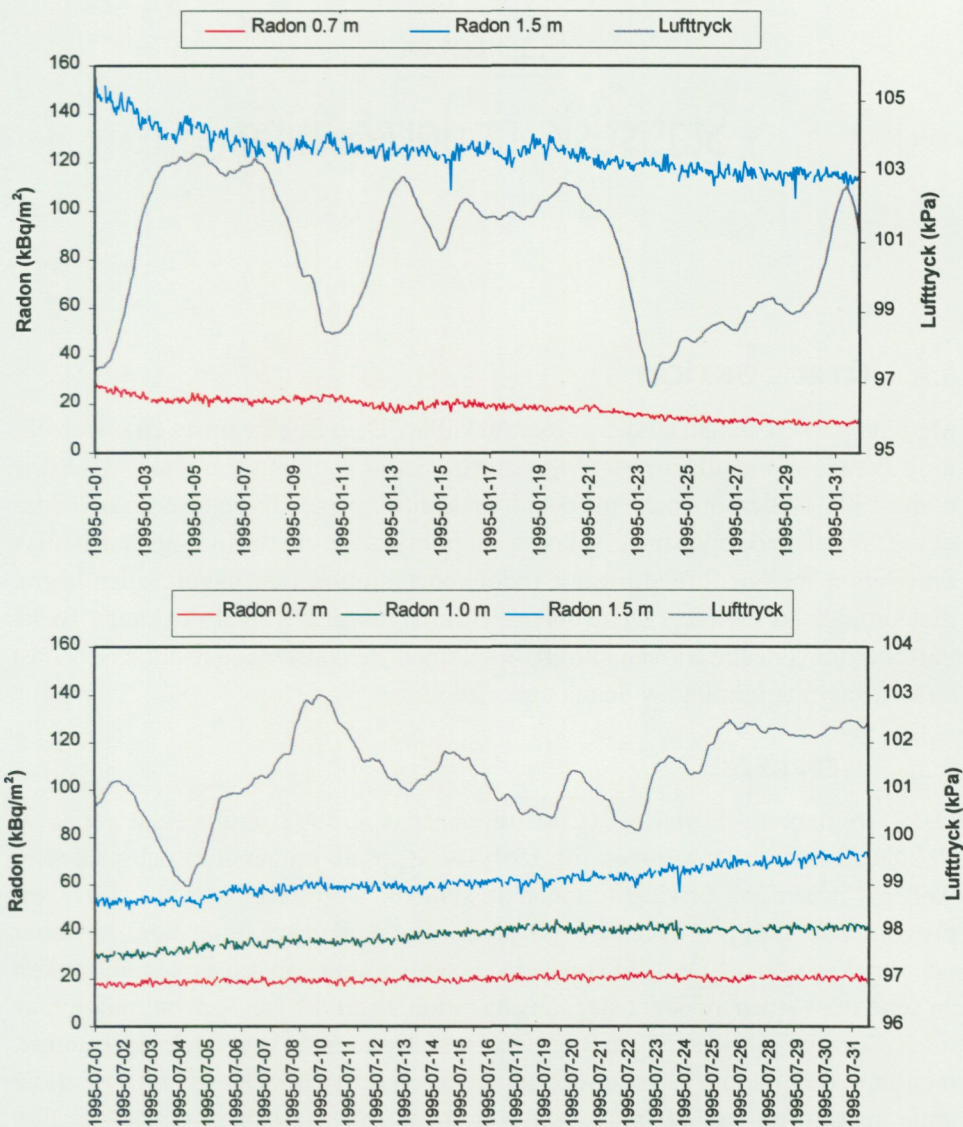
#### **4.2.4. Inverkan av lufttryck**

Luftrycket redovisas för 1993 – 1995 tillsammans med radon i Bilaga B 2:a och 2:b. Förändringar i lufttrycket kan förväntas påverka radonhalten i jordluften. I den kompakta Börjemoränen med en hög vattenmättnad större delen av året är reaktionen på lufttrycksförändringar mycket liten och inga tydliga samband har kunnat utläsas ur mätdata. I *Figur 14* presenteras exempel från januari och juli 1995 och i Bilaga B 10:b och B 11:c redovisas lufttryck och radonhalter för april och september 1995. I sin statistiska undersökning fann Mattsson ej heller någon korrelation med lufttrycket. I Bilaga B 4:b visas lufttryck och radon under ett dygn i januari 1994.

#### **4.2.5. Inverkan av temperatur**

Temperaturen har mätts på fyra nivåer i moränen och i luften en meter över markytan. Resultaten redovisas i Bilaga B 5-6 för 1993-1995. Sett över tvåårsperspektivet finns det en tydlig samvariation mellan uppmätta radonhalter och registrerade temperaturer i jord och i luft. Stigande temperaturer sammanfaller med stigande radonhalter med viss tidsförskjutning. Det finns också en tidsförskjutning mellan lufttemperaturer och jordtemperaturer som naturligt nog uppvisar en stor samvariation. Lägsta lufttemperaturer har uppmätts i slutet av januari och de lägsta jordtemperaturerna registreras ca en månad senare. Marken frös endast den första vintern på 0,3 m djup (under 10 dagar i februari-mars), se under radon.

När lufttemperaturen varierar kraftigt under dygnet, främst vår och höst, erhålls en pumpeffekt på jordtemperaturen, mest på 0,7 m och 1,0 m, i mindre mån på 1,5 m, Bilagorna B 10 d och 12 a. Jordtemperaturens variationer är mellan 1-2 grader när lufttemperaturen varierar mellan 15-20 grader sett över ett dygn. Jordtemperaturens dygnsvariationer synes inte påverka radonhalten i moränen annat än ytterst marginellt. Mattsson fann ej heller några statistiska samband med radonhalten.



Figur 14. Börje. Radonhalt på olika mätdjup och luftryck i januari och juli 1995.

#### 4.2.6. Inverkan av vindstyrka

Vindstyrkan har uppmätts av SMHI vid Upplands flygflottilj ca 6 km öster om Börje. Resultat för 1993 - 1995 presenteras i Bilaga B 7:a-b och för september 1995 i Bilaga B 11:b. Det kan konstateras att vindstyrkan inte har överstigit 16 m/s under någon mätperiod under de två åren. Någon påverkan på radonhalten i jordluften har inte iakttagits eller statistiskt påvisats av Mattsson.

# Kapitel 5.

## Statistisk undersökning

### 5.1. INTRODUKTION

Med hjälp av ett statistiskt datorprogram kallat "Dem Reg" gjordes en undersökning av radon samt alla meteorologiska parametrar uppmätta vid Slaka och Börje under 1994. Nederbörd och vind data från de intilliggande flygplatserna användes också. Syftet med denna undersökning var främst att se om det föreligger statistisk korrelation mellan förändringar i radonkoncentration och någon, eller några, meteorologiska faktorer. Detta för att i förlängningen fysikaliskt kunna förstå varför radonkoncentrationen varierar med tiden. Nedanstående resultat är endast en kort sammanfattning av denna undersökning.

### 5.2. "DEM REG"

Datorprogrammet "Dem Reg" (Christoffersson et al, 1992) är utvecklat av docent Roland Roberts (Institutionen för geofysik, Uppsala universitet) och professor Anders Christoffersson (Institutionen för statistik, Uppsala universitet). Det är ett program som möjliggör en statistisk jämförelse mellan två (eller flera) tidserier och som kan visa om dessa är korrelerade (samvarierar). En tidserie är helt enkelt en serie mätvärden av något slag, t ex av radon, lufttryck etc, som en funktion av tiden. Det speciella med "Dem Reg" är att undersökningen sker i frekvensrummet, men att man dessutom kan se om korrelationen är tidsstabil. Det vill säga, man kan välja att titta på just de frekvenser som är av intresse och se om korrelation föreligger just för dessa, och om den är stabil under en längre tidsperiod. Visar programmet att två tidserier korrelerar är korrelationen statistiskt säkerställd. En annan fördel med "Dem Reg" är det kan hitta korrelation även om den är förskjuten i tiden. Resultatet blir då en fasförskjutning mellan de undersökta tidserierna.

Det är viktigt att påpeka att korrelation är ett statistisk mått och inte ett bevis för fysikaliskt beroende mellan två parametrar. Korrelationen kan lika gärna bero på att de två parametrarna påverkas på ett gemensamt sätt av en tredje, okänd faktor. Att se om två storheter är statistiskt beroende kan dock vara en god hjälp för att hitta eventuella fysikaliska samband.

### 5.3. UTFÖRANDE

Till att börja med delades datat upp i två perioder, vår och höst. Detta berodde på att både i Slaka och i Börje var det mätavbrott under sommaren 1994 på grund av åsknedslag. Avbrotten ansågs vara för stora för att kunna "interpoleras bort", vilket annars hade möjliggjort en bättre kontroll på långtidsvariationer. Perioderna undersöktes sedan var för sig med avseende på trovärdigheten hos datat, samt möjlig korrelation mellan radon och respektive meteorologisk faktor.

De fyra tidsperioderna är:

Slaka: 1994-02-01 – 1994-05-31 och 1994-08-26 – 1994-11-30

Börje: 1994-01-01 – 1994-05-29 och 1994-07-01 – 1994-11-12

### 5.4. RESULTAT

#### 5.4.1. Slaka

I datat från vårperioden anses alla parametrar trovärdiga förutom satellitmätaren för radonkoncentration på 1,0 m djup. Denna period undersöktes därför främst med avseende på 0,7 m djup. För höstperioden är korrelation god mellan bas- och satellitradonmätarna på 1,0 m djup. Däremot betar sig mätarna för vattenmättnadsgrad underligt, framförallt på 1,0 m djup, och dessa mätvärden kan inte anses helt trovärdiga.

#### *Radon - nederbörd*

Ingen korrelation.

#### *Radon - vattenmättnadsgrad*

Resultatet är enbart baserat på data från vårperioden. Korrelationen är god mellan dessa parametrar på 0,7 m och 1,0 m djup, dock ej på 1,5 m djup. Den är bäst för korta periodtider (höga frekvenser) på omkring 24 h, men är också god för periodtider på 100 h (4,2 dygn). Korrelationen är negativ, dvs kurvan för vattenmättnadsgrad är fasförskjuten med 180° relativt radonkurvan (hög radonhalt  $\Leftrightarrow$  låg vattenmättnad). Amplitudförhållandet (kvoten mellan respektive parameters amplitud) tyder på ett icke linjärt förhållande mellan radon och vattenmättnadsgrad.

### ***Radon - lufttryck***

Det är mycket god korrelation mellan radon och lufttryck för alla tre undersökta djup. Den är tydligast framför allt för variationer på 24 - 48 h. Korrelationen är negativ, d v s högt lufttryck ger låg radonkoncentration och vice versa. Vid 0,7 m djup är fasförskjutningen ca 180°, medan den på 1,5 m djup är upp till 250°. Detta måste anses vara naturligt p g a trögheten i systemet. Amplitudförhållandet är konstant så sambandet mellan variationer i lufttryck och radonkoncentration är linjärt. Amplituden på förändringarna är ungefär 10 % av radonmedelvärdet, d v s ca 10 kBq/m<sup>3</sup>.

I Bilaga C:2, skärmutskrift från "Dem Reg", kan vi i fönster (A) se hur väl radonet (övre kurvan) samvarierar med lufttrycket (nedre kurvan). De mellersta kurvorna är en kurvanpassning. I det nedre fönstret (B) syns överst att korrelationen är god och stabil under hela tidsperioden. Nedanför detta ser vi en stabil fasförskjutning på ca 200°.

### ***Radon - jordtemperatur***

Korrelationen är god mellan dessa parametrar på 0,7 m och 1,0 m djup, dock ej på 1,5 m djup. Den är bäst för vårperioden men ganska tydlig även under hösten. Periodtiden är på 1 - 7 dygn. Amplitudförhållandet (kvoten mellan respektive parameters amplitud) är ostabilt vilket tyder på ett icke linjärt förhållande mellan radon och jordtemperatur. Precis som för lufttryck och vattenmättnadsgrad är korrelation negativ, fasförskjuten 180°.

I fönster (A) i Bilaga C:3, skärmutskrift från "Dem Reg", ser vi hur de två parametrarna verkar ha någon slags lågfrekvent samvariation. En längre mättid hade gjort det möjligt att få en bättre kontroll över dessa långsamma förändringar. I fönster (B) syns det att korrelationen är någorlunda stabil i tiden och att fasförskjutningen tydligt är 180°.

Det finns klara likheter mellan jordtemperatur och vattenmättnadsgrad.

### ***Radon - lufttemperatur***

Undersökt endast för höstperioden. Viss korrelation finns för variationer med periodtid på omkring 6 dygn, låga frekvenser. Jord- och lufttemperatur korrelerar väl för dessa variationer, så det gäller att vara försiktig med slutsatser.

### ***Radon - vindstyrka***

Ingen korrelation.

#### 5.4.2. Börje

I datat från vårperioden anses alla parametrar förutom vattenmättnadsgraden på 0,7 m djup vara tillförlitliga, med viss reservation för vattenmättnadsgraden även på 1,0 m och 1,5 m djup. För höstperioden råder viss tveksamhet angående radonvärdena på 0,7 m djup och 1,0 m djup. Detta beror främst på de oerhört snabba och stora hopp som radonmätarna indikerar, t ex 25 kBq/m<sup>3</sup> på 3 timmar. Hoppen gör att korrelationen mellan 0,7 m nivån och 1,0 m nivån, samt mellan 1,0 m nivån och 1,5 m nivån, delvis är dålig. Dessutom anses inte vattenmättnadsvärdena för höstperioden tillförlitliga. Med anledning av detta har endast vårperiodens data använts för nedanstående resultat.

##### *Radon - nederbörd*

Ingen korrelation.

##### *Radon - vattenmättnadsgrad*

Programmet visar på delvis god korrelation, framförallt för höga frekvenser men även för lägre. Amplitudförhållandet (kvoten mellan respektive parameters amplitud) är ostabilt vilket tyder på ett ickelinjärt förhållande mellan parametrarna. Fasförskjutningen är något ostabil men ligger mestadels på 180° för de välkorrelerade delarna. Det är tveksamt om resultatet är fysikaliskt trovärdigt.

##### *Radon - lufttryck*

Det går inte alls att se samma goda samvariation mellan radon och lufttryck här som i Slaka datat. Under en vecka i april är korrelationen god, men i övrigt ganska dålig. Just för veckan med god korrelation är fasförskjutningen 180° och amplitudförhållandet är stabilt, precis som i Slaka. Radonet har inte alls samma högfrekventa variationer i Börje som i Slaka.

##### *Radon - jordtemperatur*

Det är delvis mycket god korrelation mellan radon och jordtemperatur under våren i Börje. Den håller både för låga och höga frekvenser, och är bäst för jordtemperaturer på 0,3 m och 0,7 m djup. Viss korrelation föreligger även på 1,0 m djup, emedan den är dålig på 1,5 m djup.

I fönster (A) i Bilaga C:4, skärmutskrift från "Dem Reg", ser vi hur de två parametrarna verkar ha någon slags lågfrekvent samvariation. Under den första delen, fram till 5 mars, stiger radonet (översta kurvan) mot ett maximum, medan temperaturen (nedersta kurvan) faller mot ett minimum. Helt naturligt är fasförskjutningen 180°. I temperaturminimat är översta markskiktet fruset (-1,4 °C).

Detta orsakar troligen radontoppen p g a den lockeffekt som uppstår, vilken medför att radonet ej exhalerar ut i atmosfären utan stängs inne i marken. När temperaturen sedan stiger sjunker radonkoncentrationen, och de två parametrarna ligger sedan så gott som i fas med varandra. Amplitudförhållandet (kvoten mellan respektive parameters amplitud) är mycket ostabilt för hela mätperioden, vilket indicerar ett icke linjärt förhållande mellan radon och jordtemperatur.

***Radon - lufttemperatur***

Ingen korrelation.

***Radon - vindstyrka***

Ingen korrelation.

## Kapitel 6.

# Beräkningar

### **Alfaspektrometri**

Mätningarna med alfaspektrometri av U-238 och Ra-226 på jordprover som redovisas i Tabell 1 och 2 har gjorts på nio uppsiktade kornfraktioner mellan 63  $\mu\text{m}$  och 8000  $\mu\text{m}$ . Resultaten är därför inte direkt jämförbara med gammaspektrometermätningarna, som gjorts in situ på hela jordarten. Mätningarna vid Slaka visar dock ungefär samma resultat för båda mätmetoderna, vilket sannolikt beror på att material större än 8000  $\mu\text{m}$  i stort sett saknas på de tre mätnivåerna. Vid Börje erhöles avsevärt lägre resultat för alfamätningarna av jordproven jämfört med mätningarna med gammaspektrometer, vilket sannolikt beror på att det grövre materialet, som dominerar i moränen, bidrar avsevärt mycket mer till strålningen än det finare materialet.

För Slaka kan man se i Tabell 1 att fraktionen < 63  $\mu\text{m}$  har höga radium- och uranhalter som språngvis sjunker till en lägre nivå i fraktionen 63  $\mu\text{m}$  - 125  $\mu\text{m}$ . Detta förklaras av att Ra och U som frigjorts vid vittringen har adsorberats på framför allt lermineralen i den finaste fraktionen. Mellanfraktionerna silt och sand, som utgör huvuddelen av det vattensorterade sedimentet (50 %-90 %) består till största delen av kvarts- och fältspatkorn från vilka uran och radium bortvaskats och bortlakats. För fraktionerna grövre än 2000  $\mu\text{m}$  kan man se en markant förhöjning av såväl uran- som radiumhalterna för provtagningsdjupen 1,0 m, 1,5 m och 2,5 m men inte på provnivån 0,7 m. Orsaken till detta är, att de ursprungligen avlagrade kornen av alunskiffer har vittrat bort på nivån 0,7 m men ej på de djupare nivåerna. Även i Börje (Tabell 2) finns en anrikning av radium och uran till finfraktionen, dock i lägre grad än i Slaka. Morän är ett av inlandsisen nedkrossat bergartsmaterial där uranmineralen inte varit utsatta för någon vattensortering och mer betydande bortlakning av uran och radium.

Förhållandet mellan aktiviteterna för radium och uran anges av aktivitetskvoten Ra/U. Den är som regel >1 i vittrade jordar, vilket har sin grund i att radiumjonerna som frigörs vid vittringen har en starkare tendens att adsorberas på mineralpartik-

lar än uranyljonerna. På så sätt har ofta finfraktionen i en jordart en övervikt av radium över uran, eftersom denna fraktion innehåller lermineral som har negativ ytladdning och därför lätt adsorberar positiva metallkationer såsom  $Ra^{2+}$  men inte lika lätt negativa joner såsom uranyljonen. Om en sådan anrikning av radium på partikelytorna är stark, kan den ge en förhöjd radonemanation, eftersom en större andel radonatomer kommer att nå porluften jämfört med om sönderfallet skett från uranmineral inne i mineralkornet.

Ojämvikten mellan Ra/U är betydligt större i Slaka än i Börje, vilket framgår om man jämför Tabell 1 och Tabell 2. För Slaka föreligger den största ojämvikten i de finaste fraktionerna och kan uppgå till 2,46, medan de grövre fraktionerna mestadels uppvisar jämvikt, vilket är naturligt eftersom vittringen har påverkat dem minst. För Börje är det endast finfraktionen som uppvisar ett visst mått av ojämvikt, upp till 1,59, medan de grövre fraktionerna i stort sett uppvisar jämvikt mellan radium och uran. För både Slaka och Börje har en viss anrikning av radium från primära uranmineral till partikelytorna i framför allt finfraktionen har ägt rum. För Slaka är den så stor, att en förhöjd emanation sannolikt föreligger, medan den vid Börje är så låg, att emanationen ej nämvärt påverkas.

### Svensk praxis

I Sverige används normalt, med hänvisning till Andersson et al (1983), följande formel för beräkning av maximal radonhalt i jordluften:

$$C_{MAX} = A \cdot e \cdot \rho_s \cdot \frac{1-p}{p} \quad (\text{om } e < p) \quad / \text{Ekvation 1/ där}$$

$C_{MAX}$  = radonhalten i porvolymen vid luftomsättningen 0 oms/h, Bq/m<sup>3</sup>.

$A$  = specifika aktiviteten, Bq/kg. Antaget att 1 ppm U är ekvivalent med 12,3 Bq/kg Ra-226. Värdet från mätning med gammaspektrometer i grop används.

$e$  = emanationen  $d_v$  s kvoten avgivet radon/allt bildat radon, %. Antagna värden enligt text nedan.

$\rho_s$  = kompaktdensiteten, kg/m<sup>3</sup>. Antaget värde 2700 kg/m<sup>3</sup>.

$p$  = porositeten  $d_v$  s kvoten porvolymen/totala volymen, %. Värdet från neutronsondmätning används i Slaka resp litteraturvärden för Börje.

Emanationsfaktorn,  $e$ , kan med ledning av litteraturuppgifter väljas till 18 % för Slaka och 20 % för Börje (Markkanen & Arvela, 1992). I Slaka ligger radium

utfällt på partikelytorna i finfraktionen, se ovan under alfaspektrometri, varför ett högre värde, 30 %, antas. Emanationsfaktorn varierar med jordens fuktighet (Lindmark & Rosén, 1984; Grasty, 1995) vilket innebär att man egentligen får ett intervall (ej redovisat) för den beräknade radonhalten.

Mätresultaten av gammaspektrometermätning (handburen gammaspektrometer) har använts i *Tabell 3* och *4* för beräkning av maximal radonhalt enligt Ekvation 1 och med en beräknad procentsats för olika mätdjup (*Figur 15-16*; Nielson et al, 1990). Beräknade radonhalter på olika mätdjup har gjorts under antagande att endast diffusion förekommer. Om lufttransport tillkommer blir radonhalterna ännu lägre. Beräkningarna jämförs (*Tabell 3* och *4*) med erhållna mätresultat i Bilaga A 1 och B 1.

**Tabell 3. Slaka. Beräkning av radonhalt (Ekvation 1) vid olika mätdjup.**

Mät- djup (m)	Uran (ppm)	Porositet enligt neutronsond (%)	Beräknat radonhalts- maximum enligt Ekvation 1	% av radonhalts- maximum enligt Figur 15	Beräknad radonhalt vid mätdjupet (kBq/m <sup>3</sup> )	Utfall 1993-1995 Radonhalt, Alphameter (kBq/m <sup>3</sup> )
0,7	6,3	40 (38-46)	94	51	48 (38-52)	70-130, (50-90)*
1,0	5,9	47 (45-49)	66	64	42 (39-46)	85-155, (65-115)*
1,5	6,5	33 (30-36)	131	78	103 (90-118)	85-155
2,5	6,2	39 (37-41)	97	92	89 (82-97)	-

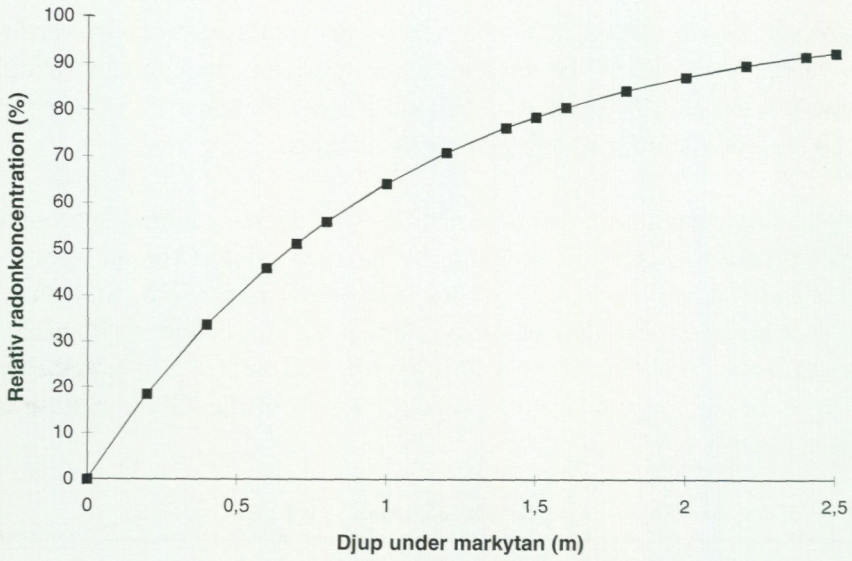
\*/satellit

De beräknade radonhalterna för Slaka är delvis lägre än mätt radonhalt med radonmätarna Alphameter.

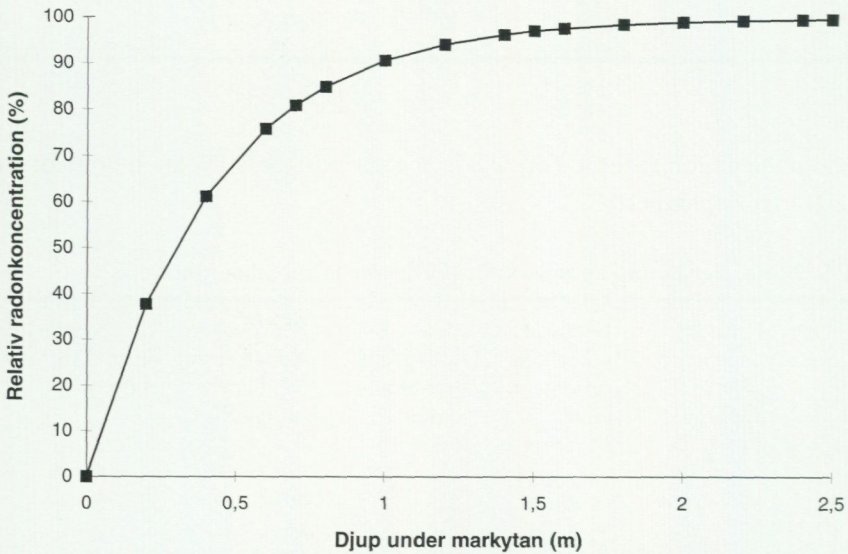
**Tabell 4. Börje. Beräkning av radonhalt (Ekvation 1) vid olika mätdjup.**

Mät- djup (m)	Uran (ppm)	Porositet, antagna tabell- värden (%)	Beräknat radonhalts- maximum enligt Ekvation 1	% av radonhalts- maximum enligt Figur 16	Beräknad radonhalt vid mätdjupet (kBq/m <sup>3</sup> )	Utfall 1993-1995 Radonhalt (kBq/m <sup>3</sup> )
0,7	6,0	40	60	81	49	10 -75
1,0	6,0	30	93	91	85	0 -150
1,5	6,0	23	133	97	129	20 -240

Beräknade radonhalter för Börje ligger inom intervallet för mätta halter.



**Figur 15. Slaka. Beräknad radonhalt på visst mätdjup i relation till maximal radonhalt på stora djup. Teoretisk beräkning med enbart diffusion.**



**Figur 16. Börje. Beräknad radonhalt på visst mätdjup i relation till maximal radonhalt på stora djup. Teoretisk beräkning med enbart diffusion.**

För Slaka, Bilaga A 1, framgår att de manuella mätningarna via cylindern ofta ger radonhalter som är högre än de via järnröret men lägre än alfamätarens samtidiga värden. Avvikelsen mellan samtidiga emanometervärden med samma slags markanslutning, Markus respektive Bondar Clegg, ligger inom 10 %. Den relativa radonhalten för basstationen i Slaka och mätdjupen 0,7 och 1,0 m har beräknats och redovisas i *Tabell 5*.

För Börje, Bilaga B8:a-b, är radonhalten mätt med emanometer oftast högre än radonhalten mätt med passiva alfamätare. Det är således en skillnad i mätresultaten för Slaka respektive Börje när man jämför relativ radonhalt mätt med olika instrument.

**Tabell 5. Slaka. Radonhalten registreras olika för skilda mätförhållanden.**

Instrument och markanslutning	Relativ radonhalt %
Alphameter, rör Ø 76 mm	100
Emanometer, cylinder	87
ROAC, mätdjup 0,7 m	75 (endast ett mätvärde)
Emanometer, rör 25 mm	60

## Kemski

Kemski et al (1992) har beräknat radonhalten med utgångspunkt från radioaktivitet, emanationsfaktor, densitet och effektiv porositet  $d$  v s samma parametrar som Ekvation 1 där porositeten har ersatts med effektiv porositet.

$$C_{MAX} = A \cdot e \cdot \rho / p_{eff} \quad \text{/Ekvation 2/ där}$$

$C_{MAX}$  = radonhalten i porvolymen vid luftomsättningen 0 oms/h, Bq/m<sup>3</sup>.

$A$  = specifika aktiviteten, Bq/kg.

$e$  = emanationen  $d$  v s kvoten avgivet radon/allt bildat radon, %.  
Antagna värden: 30 för Slaka och 20 för Börje.

$\rho$  = specifika densiteten, kg/m<sup>3</sup>. Antagna värden från neutronsond:  
Slaka 1700, Börje 1800.

$p_{eff}$  = effektiva porositeten, %. Antagna värden enligt Tabell 6 och 7  
(moränvärden efter Lundin, 1982).

Radonhaltsberäkningarna redovisas på motsvarande sätt som för "svensk praxis" i *Tabell 6* och *7*.

**Tabell 6. Slaka. Beräkning av radonhalt (Ekvation 2) vid olika mätdjup.**

Mät- djup (m)	Uran (ppm)	Antagen effektiv porositet (%)	Beräknat radonhalts- maximum enligt Ekvation 2	% av radonhalts- maximum enligt Figur 15	Beräknad radonhalt vid mätdjupet (kBq/m <sup>3</sup> )	Utfall 1993-1995 Radonhalt, Alphameter (kBq/m <sup>3</sup> )
0,7	6,3	30	132	51	67	70-130, (50-90)*
1,0	5,9	25	148	64	95	85-155, (65-115)*
1,5	6,5	22	185	78	145	85-155
2,5	6,2	20	194	92	179	-

\*/ satellit

**Tabell 7. Börje. Beräkning av radonhalt (Ekvation 2) vid olika mätdjup.**

Mät- djup (m)	Uran (ppm)	Antagen effektiv porositet (%)	Beräknat radonhalts- maximum enligt Ekvation 2	% av radonhalts- maximum enligt Figur 16	Beräknad radonhalt vid mätdjupet (kBq/m <sup>3</sup> )	Utfall 1993-1995 Radonhalt Alphameter (kBq/m <sup>3</sup> )
0,7	6,0	12	221	81	179	10 -75
1,0	6,0	5	531	91	483	0 -150
1,5	6,0	3	886	97	859	20 -240

En svaghet med denna metod är att man inte utan vidare kan använda standardvärden för olika jordar. Effektiva porositeten varierar med kornstorleken och är dessutom beroende av packningsgraden. De värden som använts för Slaka i *Tabell 6* är av samma storleksordning som Ekvation 1. För Börje och *Tabell 7* är den ansatta effektiva porositeten så låg att radonvärdena blir mycket höga och inte trovärdiga. Det finns således anledning att vara försiktig med tillämpningen av Ekvation 2.

### Washington & Rose

Från litteraturen (Washington & Rose, 1990) har ett samband utnyttjats som ger möjlighet att ta hänsyn till fördelningen gas/vätska, Ostwalds koefficient, i jordens porluft vid beräkning av markradonhalten:

$$C_{MAX} = \frac{A \cdot e}{[1/\rho - 1/\rho_s][S_r(K_T - 1) + 1]} \quad \text{/Ekvation 3/ där}$$

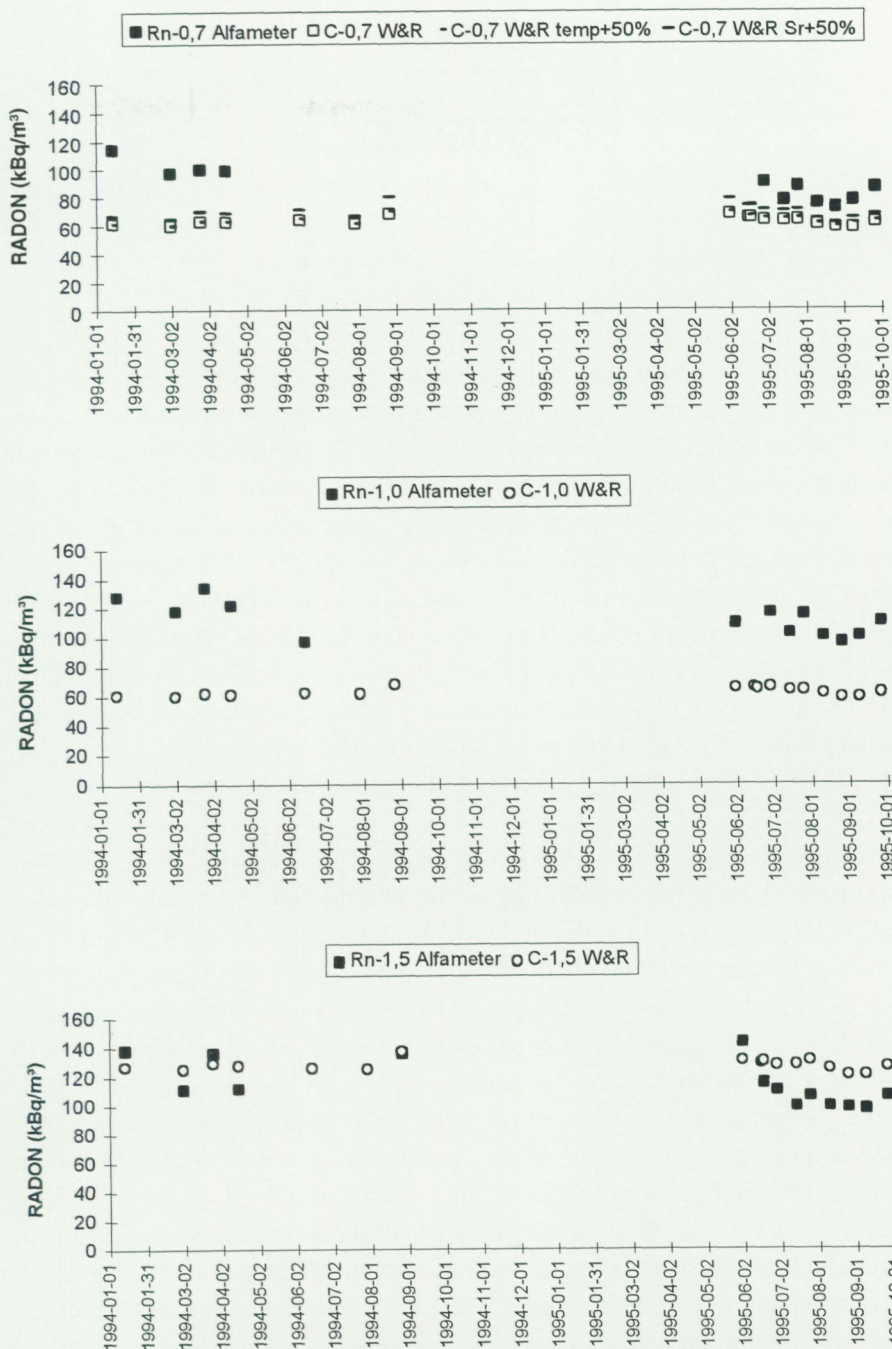
- $C_{MAX}$  = radonhalten i porvolymen vid luftomsättningen 0 oms/h, Bq/m<sup>3</sup>.  
 $A$  = specifika aktiviteten, Bq/kg.  
 $e$  = emanationen d v s kvoten avgivet radon/allt bildat radon, %.  
 Antagna värden: 30 för Slaka.  
 $\delta$  = skrymdensiteten, kg/m<sup>3</sup>. Se text nedan.  
 $\rho_s$  = kompaktens densiteten, kg/m<sup>3</sup>. Antaget värde 2700 kg/m<sup>3</sup>.  
 $S_r$  = vattenmättnadsgraden, %. Se text nedan.  
 $K_T$  = delningskoefficienten för radon,  $A_{vatten}/A_{gas}$ .  $K_T = 0,5011e^{-0,0321t}$   
 där  $t$  = jordtemperaturen, °C.

Den beräknade radonhalten påverkas av, utöver tidigare beskrivna parametrar i Ekvation 1, jordens temperatur och skrymdensitet.

Beräkningar har utförts för förhållandena i Slaka och redovisas i *Tabell 8* och *Figur 17*. Uppgifter om densitet och vattenmättnadsgrad baseras på neutronsondsmätningar. Mätt radonhalt (alfameter) är högre än den beräknade för mätdjupen 0,7 och 1,0 m. Orsaken kan vara att den representativa radiumhalten är högre än den uppmätta eller att den mätta radonhalten är för hög. Jämför radonhalter för olika mätare i *Tabell 5* (Kapitel 6). Den beräknade radonhalten är relativt okänslig för förändrad temperatur och påverkas i något högre grad för förändrad vattenmättnadsgrad. Detta illustreras i *Figur 17* där temperaturen har räknats upp med 50 % i en separat beräkning. Vattenmättnadsgraden redovisas också med 50 % förhöjning (och okorrigerad temperatur). Mattsson har i egna beräkningar visat att överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta (mars 1994) radonhalter är dålig. Vid variation av vattenmättnadsgraden från 1-99 % erhöles inte aktuella låga radonhalter i något fall.

**Tabell 8** Ingångsvärden för beräkning enligt Ekvation 3 med redovisning i Figur 17. Använda densitetsvärden är medelvärden för alla neutronsondmätningar. Beräknad radonhalt, C, är reducerad för mätdjupet i enlighet med Figur 15.

Datum	Mätdjup m u ny	Aktivitet Bq/kg	Emana- tion %	Skrym- densitet kg/m <sup>3</sup>	Kompakt- densitet Kg/m <sup>3</sup>	Vatten- mättnads- grad %	Tempe- ratur °C	Delnings- koeffi- cient	C <sub>max</sub> Bq/m <sup>3</sup>	C vid mätdjup Bq/m <sup>3</sup>	Radonhalt Alfamerer Bq/m <sup>3</sup>
1994-01-13	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,27	1,7	0,47	121	62	114
1994-03-01	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,24	0,4	0,49	118	60	97
1994-03-25	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,32	0,7	0,49	124	63	100
1994-04-15	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,28	3,6	0,45	123	63	99
1994-06-14	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,27	10,1	0,36	125	64	
1994-07-29	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,28		0,50	120	61	
1994-08-26	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,33	13,7	0,32	134	68	
1995-05-31	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,34	9,9	0,36	132	67	
1995-06-15	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,29	10,3	0,36	127	65	
1995-06-17	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,29	10,5	0,36	127	65	
1995-06-28	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,25	12,6	0,33	124	63	90
1995-07-14	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,24	13,1	0,33	123	63	77
1995-07-25	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,25	13,6	0,32	124	63	87
1995-08-10	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,17	14,5	0,31	117	60	75
1995-08-25	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,13	15,3	0,31	114	58	72
1995-09-08	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,18	13,1	0,33	113	58	77
1995-09-26	0,7	6,3	0,3	1680	2700	0,22	11,1	0,35	121	62	86
1994-01-13	1	5,9	0,3	1580	2700	0,24	2,5	0,46	95	61	128
1994-03-01	1	5,9	0,3	1580	2700	0,23	1,3	0,48	94	60	118
1994-03-25	1	5,9	0,3	1580	2700	0,28	1,3	0,48	97	62	134
1994-04-15	1	5,9	0,3	1580	2700	0,24	3,5	0,45	95	61	122
1994-06-14	1	5,9	0,3	1580	2700	0,23	9,1	0,37	97	62	97
1994-07-29	1	5,9	0,3	1580	2700	0,27		0,50	96	61	
1994-08-26	1	5,9	0,3	1580	2700	0,32	13,3	0,33	106	68	
1995-05-31	1	5,9	0,3	1580	2700	0,29	8,3	0,38	101	65	109
1995-06-15	1	5,9	0,3	1580	2700	0,29	9,6	0,37	102	65	
1995-06-17	1	5,9	0,3	1580	2700	0,27	9,8	0,37	100	64	
1995-06-28	1	5,9	0,3	1580	2700	0,29	11,4	0,35	102	65	116
1995-07-14	1	5,9	0,3	1580	2700	0,24	12,2	0,34	98	63	102
1995-07-25	1	5,9	0,3	1580	2700	0,24	13,1	0,33	99	63	115
1995-08-10	1	5,9	0,3	1580	2700	0,18	14,2	0,32	95	61	100
1995-08-25	1	5,9	0,3	1580	2700	0,13	14,5	0,31	91	58	96
1995-09-08	1	5,9	0,3	1580	2700	0,17	13	0,33	91	58	100
1995-09-26	1	5,9	0,3	1580	2700	0,21	11,4	0,35	96	61	110
1994-01-13	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,21	3,2	0,45	162	127	138
1994-03-01	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,20	1,9	0,47	160	125	111
1994-03-25	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,25	1,8	0,47	165	129	136
1994-04-15	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,22	3,2	0,45	164	128	112
1994-06-14	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,18	7,8	0,39	161	126	
1994-07-29	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,21		0,50	160	125	
1994-08-26	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,28	12,4	0,34	176	137	136
1995-05-31	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,24	6,7	0,40	167	131	143
1995-06-15	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,21	8,6	0,38	165	128	
1995-06-17	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,22	8,8	0,38	166	130	115
1995-06-28	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,19	9,7	0,37	163	127	110
1995-07-14	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,19	10,7	0,36	164	128	99
1995-07-25	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,22	11,8	0,34	167	130	106
1995-08-10	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,16	12,9	0,33	160	125	99
1995-08-25	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,10	13	0,33	154	120	98
1995-09-08	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,17	12,3	0,34	154	120	97
1995-09-26	1,5	6,5	0,3	1860	2700	0,18	11,2	0,35	162	126	106



Figur 17. Jämförelse mellan mätt (Alfameter) och beräknad (Washington & Rose, "W&R") radonhalt för mätdjupen 0,7, 1,0 respektive 1,5 m. För mätdjupet 0,7 m redovisas också beräknad radonhalt med 50 % förhöjd temperatur respektive 50 % förhöjd vattenmättnadsgrad (S<sub>v</sub>).

## Kapitel 7.

# Diskussion

Undersökningarna visar att radonhaltsmätning vid enstaka tillfällen kan ge väsentligt olika resultat. Variationerna är både jordartsberoende och påverkade av andra faktorer i närmiljön. Vid jämförelse mellan sand (Slaka) och morän (Börje), är variationerna störst i morän. Möjligen kan man generaliserat påstå att de minsta variationerna är typiska för permeabla jordar, sand och grus, och de största variationerna för finkorniga jordar. Taipale & Winqvist (1985) fann emellertid variationer i isälvsmaterial som var av samma stolek och fördelning över året som i Börjemoränen, se vidare nedan. Variationerna tycks således till stor del bero på den specifika geologin vid varje lokal. Den finkornigaste jordarten, lera, uppträder extremt enligt tidigare erfarenhet (Lindmark & Rosén, 1984) genom att jorden antingen är tät (mycket låg mätbar radonhalt) vid relativt vattenmättade förhållanden eller mycket permeabel p g a torrsprickor (maximal radonhalt).

Säsongsvariationerna är kopplade till meteorologiska förändringar. Dessa följer en årsrytm men kan för det enskilda året avvika väsentligt från det meteorologiska normalåret. Väsentligt är att skilja ut de förhållanden som har störst påverkan på radonhalten. Jordens vatteninnehåll är en sådan parameter. Det har visat sig vara svårt att få fram data genom mätningar direkt i jorden varför man tills vidare är hänvisad till översiktliga bedömningar genom att observera nederbörden och till bedömningar av jorden in situ eventuellt kompletterat med laboratoriebestämningar på jordprov. Nya instrument för mätning av jordfuktighet har lanserats senaste tiden och troligen kommer det att finnas praktiskt enkla och tillförlitliga mätmetoder tillgängliga inom en snar framtid. Man måste dock vara observant på att all utrustning för fuktighetsmätning måste kalibreras för varje geologisk lokal. Jordtemperaturen har främst en indirekt påverkan på radonhalten genom att temperaturen påverkar upptorkningen (Woith & Pekdeger, 1992). Lufttrycket har betydelse för radonhalten och främst då i grovkorniga jordar. Vindens påverkan på radonhalten kan vara betydelsefull, främst i jordar med hög permeabilitet och på vindutsatta ställen. Typiska sådana ställen är ryggformade isälvsavlagringar (Hubbard, 1994 och Ball, 1994).

Enligt uppgift (muntlig kommunikation med G Åkerblom) från ett indiskt forskarlag, som mäter med Alphameter, kan man få bort lufttrycksberoende radonhaltsvariationer genom att täcka luftspaltsöppningen före detektorn med tunn polyetylenfilm. Radon kan fortfarande diffundera in i luftspalten men andelen radonatomer som når halvledardetektorn är inte beroende av ändringar i luftkoncentrationen. Uppgiften nådde projektet så sent att det inte har funnits möjlighet att göra egna bekräftande mätningar.

De uppmätta radonhalterna har jämförts med beräknade radonhalter. För Slaka är den beräknade halten i underkant av mätta halter eller på 1,0 m djup klart lägre. Det kan finnas flera förklaringar till skillnaden. De uppmätta radonhalterna avviker en del beroende på mätmetod. Alfa-mätningarna för Slaka ligger högre än övriga metoder. Emanationsfaktorn har bedömts med ledning av litteraturuppgifter och hänsyn har ej tagits till att man vid varierande vattenmättnadsgrad får olika emanationsvärden. En annan förklaring till skillnaden mellan mätt och beräknad radonhalt kan vara att alunskifferinblandningen i jorden är ojämnt fördelad. Gammaspakrometermätningar, som ligger till grund för radonhaltsberäkningarna, gjordes i en provgrop ca 10 m från den slutliga mätplatsen för radonmätningar. Vid kompletterande grävningar intill provplatsen kunde konstateras att det finns variationer i jordlagerföljden, bland annat varierar steninnehållet påtagligt. Variationerna framgår kanske bäst av Fotobilaga 1 där jordlagerföljden i ett närliggande grustag kan studeras.

Radonhalterna på 1,5 m djup i Slaka har större variationer över korta tidsperioder (några dygn) än ytligare mätdjup. En förklaring till detta fenomen bedöms kunna vara att lufttrycksskillnader slår igenom stötvis på större djup medan de ytligare jordlagren vädras kontinuerligt (diffusion) så att radonhalten där hålls förhållandevis stabil.

Radonhaltens temperaturberoende diskuteras med utgångspunkt från två aspekter dels temperaturens påverkan på fördelningskoefficienten mellan luft och vatten dels temperaturens påverkan på emanationskoefficienten. Något tydligt samband har inte kunnat påvisas i utförda mätningar eftersom radonhalten påverkas mer av andra förändringar.

I moränen i Börje har den uppmätta radonhalten varierat kraftigt över åren. Orsaken bedöms vara variationerna i markens vattenhalt, som främst bygger på bedömningar i brist på tillförlitliga mätningar. Någon påverkan av lufttryck och vindstyrka har inte iakttagits. Inte heller har direkt påverkan av lufttemperaturen iakttagits. Däremot finns det ett samband med jordtemperaturen vilket även

Mattsson har visat. Vid låga temperaturer från höst till vår är avdunstningen liten och nederbörden kan bidra till markvattenhalten. Höga sommartemperaturer innebär att vattenhalten i jorden minskar. Dessutom påverkar jordtemperaturen fördelningskoefficienten mellan radon och vatten. Enligt Washington & Rose (1990) är  $C_{Rn}$  i vatten/ $C_{Rn}$  i luft vid 0 °C 0,525 och vid 10 °C 0,226. Även enligt Tanner (1978) är fördelningen mellan luft och vatten temperaturberoende. Detta innebär att radonhalten i jordluft sjunker med sjunkande temperatur. I mätdata går det dock inte att utläsa några sådana samband utan de överskuggas sannolikt av förändringar i vattenhalten i marken. Vid tjalning av marken stiger radonhalten kraftigt i de ytligare marklagren (orsaken är under utredning och kommer att presenteras separat). Ett snötäcke förhindrar inte radonavgång från markytan men en isbark som kan bildas vid töväder minskar exhalationen av radon.

Emanationen av radon till jordens porer är beroende av vattenmättnaden. I medeltal avgår 30 % av allt bildat radon från ett mineralkorn till den vatten- och/eller luftfyllda poren. Resterande del stannar i mineralkornet eller bäddas in i angränsande korn. Radonatomerna får så mycket energi vid sönderfallet att de kan förflytta sig 880 gånger längre i luft än i vatten, Sun & Furbish (1995). Vid ökande vattenhalter bromsas radonatomerna av vattnet så att en allt större del stannar i jordluften. Samtidigt koncentreras radonatomerna till en mindre jordluftvolym varvid radonkoncentrationen ökar 2-3 gånger (Åkerblom et al, 1988). Vid vattenmättnad eller nära vattenmättnad mäts ofta betydligt lägre radonhalter än när jorden är torrare vilket för passiva mätare kan bero på att radonet till viss del hinner sönderfalla under den långsamma diffusionstransporten fram till detektorn. För mätare som suger till sig luft fås i extrema fall 0-värden då ingen jordluft nått fram till mätkammaren eller kraftigt förhöjda värden då mätaren kommit i kontakt med luftfickor i jorden där radonatomerna finns koncentrerade.

Vattenmättnaden har betydelse för gammaspektrometermätningar. Gammastrålningen från Bi-214 ökar med stigande vattenhalter i marken därför att en allt mindre mängd radongas kan ventileras bort, Grasty (1995). Gammastrålningen dämpas samtidigt av vattnet upp till en viss nivå. Enligt Sun & Furbish är emanationen vid 30-40 % vattenmättnad lika stor som vid full vattenmättnad. Dessutom anger de att den tunna vattenfilm som då finns på alla partikelytor är tillräckligt tjock för att stoppa alfapartiklarna. Att alfapartiklarna stoppas ska förmodligen nyanseras så att de bromsas mer eller mindre effektivt. Adsorptivt bundet vatten finns också vid lägre vattenmättnad, speciellt i finkorniga jordar som leror. Även vid låga vattenhalter är mineralkornen i en jordart omgivna av en film av adsorptivt bundet vatten. Ju mindre partiklarna är desto tjockare är skiktet med det adsorptivt bundna vattnet (vätejoner som binds till den negativa partikelytan).

Dessutom är tjockleken temperaturberoende. Leror med sin stora partikelyta och små porer har en stor andel adsorptivt bundet vatten medan sand och grus endast har tunna vattenskikt. Detta innebär att radonatomer, som avgår från ett mineral-korn, har lättare för att nå jordluften i grövre jordar medan de fördröjs av vattenfilmen och har därmed svårare att nå jordluft eller angränsande mineral-korn i de finkornigare jordarterna.

Skillnaden i uppmätt radonhalt mellan olika mätmetoder är olika för Slaka respektive Börje. En förklaring kan vara att emanometrarna, som suger luft, registrerar hög radonhalt när jorden håller hög fuktighet och lägre radonhalt när jorden är relativt torr. Möjligt är också att de passiva alfamätarna har en tendens att registrera för låg radonhalt vid hög jordfuktighet genom att en del av radonet hinner sönderfalla innan det når detektorn. I det senare fallet kan jordarten ha en avgörande betydelse genom att endast en mindre del av radonet hinner sönderfalla i grövre jordar som sand och grus (Slaka) och en större del i tätare jordar som morän (Börje).

En förklaring till att en betydande del av radonatomerna ändå når det luftfyllda porutrymmet är att radium sitter utfällt på partikelytorna främst i finfraktionerna, vilket har visats av Ek, J & Ek, B-M (1996) och i denna undersökning. I Slaka är ojämvikten mellan uran och radium av sådan storleksordning, att en förhöjd emanation sannolikt föreligger. Ojämvikten varierar mellan olika skikt och lager i en markprofil beroende på ingående kornstorlekar och vattnets rörelser. Därav följer att även emanationen från de olika skikten varierar, vilken dock diffusionen utjämnar.

Resultaten av de mätningar av emanationen som utförts på små störda jordprov i laboratorier kan inte direkt överföras till naturliga förhållanden med annan packningsgrad, porositet, makroporer etc.

Morän innehåller alla kornstorlekar från ler till block med varierande fördelning. Ofta är de inte massformiga i djupled utan innehåller skikt och bankar av sorterat material. Vattentransporten är större horisontellt än vertikalt i många fall. Moräner som överlagras varandra kan vara bildade under olika tidsperioder och ha helt olika bergartsinnehåll, kornstorleksfördelning och kompaktion etc. Det är inte heller ovanligt med morän på isälvs-material liksom att morän inkorporeras i sedimenten som i Slaka. Taipale & Winqvist (1985) undersökte radonvariationerna i ett isälvs-material på olika djup under ett år. De erhöll mycket olika resultat mellan olika närbelägna mätstationer. Vid fyra mätstationer med mätdjup mellan 0,8-1,5 m varierade radonhalten ungefär mellan 25-50 kBq/m<sup>3</sup> under året.

Vid en femte mätstation med mätdjupet 2,5 m varierade radonhalten mellan 50-240 kB/m<sup>3</sup> under året. Orsaken stod att finna i att de hade gått igenom ett lerlager med en meters mäktighet och sannolikt kommit ned i ostört isälvsmaterial. De första fyra mätningarna skedde sannolikt i svallmaterial. Lerlagret bidrog till de förhöjda radonhalterna genom att förhindra diffusion. Vid alla typer av radonundersökningar är det viktigt att kunna tolka den lokala geologin.

Beräkningarna av radonhalt (Kapitel 6) kan vara ett värdefullt stöd till direkta radonmätningar. Emellertid är avvikelserna mellan beräknad och mätt radonhalt i vissa fall stor. Erfarenheterna av de olika beräkningsmetoderna är olika men gemensamt är att man måste ha tillgång till tillförlitliga såväl ingångsdata vid beräkningarna som mätdata av radonhalt. De data som har använts är inte invändningsfria. För Slaka diskuteras olika radonhalter erhållna med olika instrument. Radiumhalten i Slaka varierar förmodligen beroende på heterogen fördelning av alunskiffer och de värden som har använts är inte nödvändigtvis representativa. Beräkningsmetoden "Svensk praxis" ger jämförelsevis det bästa utfallet. Mätta radonhalter i Slaka ligger generellt högre. Beräkningsmetoden "Kemski" ger väsentligt högre radonhalter än "Svensk praxis" och är känslig för vilken effektiv porositet som används. Metoden "Washington & Rose" bör användas med försiktighet. Beräkningsexempel och känslighetsanalyser tyder på att formeln behöver korrigeras, kanske med en jordartsberoende parameter.

# Referenser

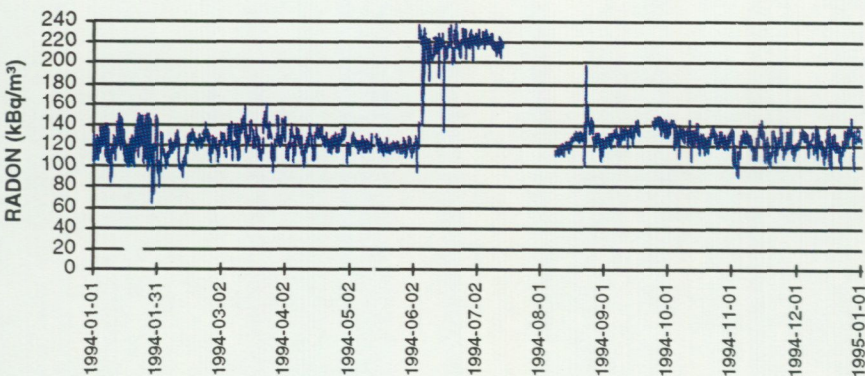
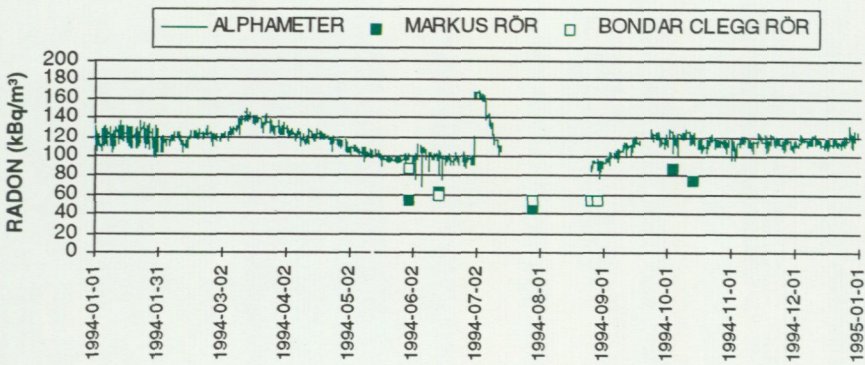
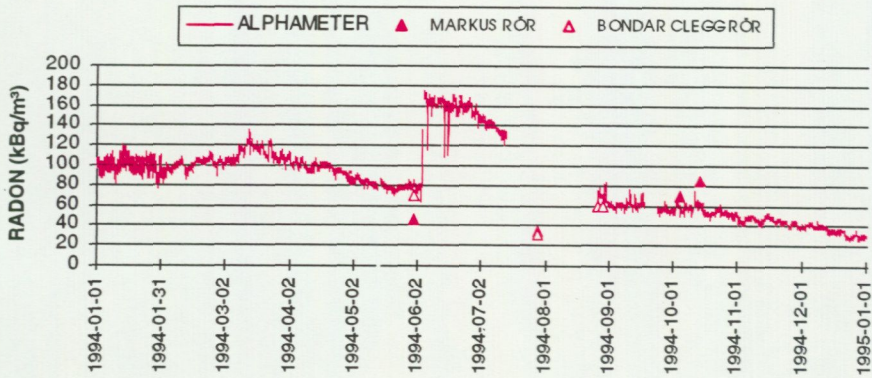
- Adam R H, 1995:** Spatial and temporal variations of soil gas  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  at two sites in New Jersey. International Radon Symposium IV - 4.1.
- Andersson P, Clavensjö B, Åkerblom G, 1983:** Radon i bostäder - Markens inverkan på radonhalt och gammastrålning inomhus. Statens råd för byggnadsforskning. Rapport R9:1983
- Ball T K, Cameron D G, Colman T B, Roberts P D, 1991:** Behaviour of radon in the geological environment: a review. Quarterly Journal of Engineering Geology, 24, 169-182.
- Ball T K, 1994:** Radon Potential Mapping in the U.K. Second international workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping. Czech Geological Survey, Prague 1994.
- Christoffersson A, Roberts R, Eriksson U, 1992:** The relationship between manufacturing and various BTS series in Sweden illuminated by frequency and complex demodulate methods. Working paper from Department of statistics, university of Uppsala.
- Damkjær A, Korsbech U, 1985:** Measurement of the emanation of radon-222 from danish soils. The Science of The Total Environment, 45 (1985) 343-350.
- Ek J, Ek B-M, 1996:** Radium and Uranium Concentrations in two Eskers with Enhanced Radon Emission. Environment International (in press).
- Fukui M, 1987:** Soil water effects on concentration profiles and variations of  $^{222}\text{Rn}$  in a vadose zone. Health Physics Vol. 53, No. 2 (August), pp. 181-186.
- Grasty R L, 1995:** Radon emanation and soil moisture effects on airborne gamma-ray measurements. Paper submitted to Geophysics, November 1995.

- Harris S A, 1988:** Observations on the redistribution of moisture in the active layer and permafrost. Proc. V Int. Conf. on permafrost, Trondheim, Vol 1.
- Herkelrath W N, Hamburg S P, Murphy F, 1991:** Automatic, Real-Time Monitoring of Soil Moisture in a Remote Field Area With Time Domain Reflectometry. Water Resources Research. Vol 27, No 5, Pp 857-864.
- Holkko J, Liukkonen S, 1992:** Radon diffusion in Finnish glacial till soil. *in* Proc. Natural Radiation Environment V, Salzburg, Austria. Radiation Protection Dosimetry, Vol 45, Nos 1-4.
- Hubbard L, 1994:** Time-variations in soil gas according to soil types. Second international workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping. Czech Geological Survey, Prague 1994.
- Kemski J, Plate B, Schneiders H, Siehl A, Stamm R, Werner T, Wiegand J, 1992:** Geological factors controlling radon potential. *in* Radon et Gaz rares dans les sciences de la terre et de l'environnement. Actes du Colloque Int. sur la Géochimie des Gaz. Mém. Expl. Cartes Géologiques et Minières de la Belgique. No 32.
- Klusman R W, Jaacks J A, 1987:** Environmental influences upon mercury, radon and helium concentrations in soil gases at a site near Denver. Colorado: Journal of Geochemical Exploration, v. 27. p. 259-280.
- Kraner H W, Schroeder G L, Evans R D, 1964:** Measurements of the Effects of Atmospheric Variables on Radon-222 Flux and Soil-Gas Concentrations. The Natural Radiation Environment. pp. 191-214.
- Lindmark A, Rosén B, 1984:** Radon i jord Exhalation, årstidsvariationer, permeabilitet. Statens geotekniska institut. Rapport No 24. Linköping. ISSN 0348-0755.
- Lundin, L, 1982:** Mark- och grundvatten i moränmark och marktypens betydelse för avrinningen. UNGI Rapport Nr 56.
- Lundin L-C, 1989:** Water and heat flows in frozen soils. Acta Universitatis Upsaliensis 186. Doctorial dissertation.
- Markkanen M, Arvela H, 1992:** Radon emanation from soil. *in* Proc. Natural Radiation Environment V, Salzburg, Austria. Radiation Protection Dosimetry, Vol 45, Nos 1-4.
- Mattsson H, 1995:** Statistical Investigation of Time Variations of Radon and Possible Correlation with Meteorological Factors. Inst For Solid Earth Physics, University of Uppsala. Prel Report.

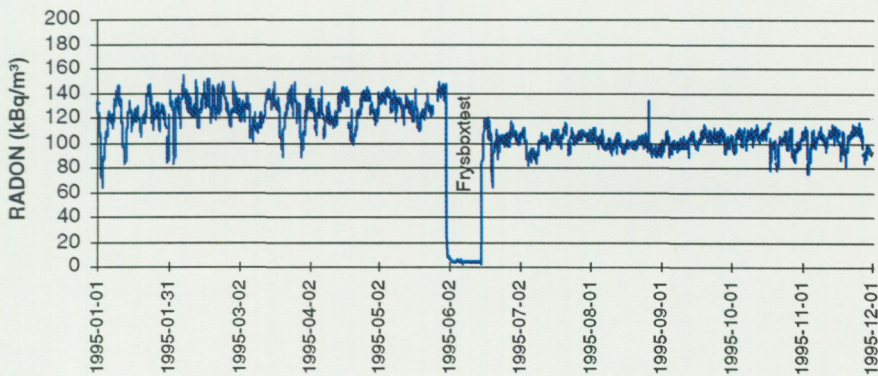
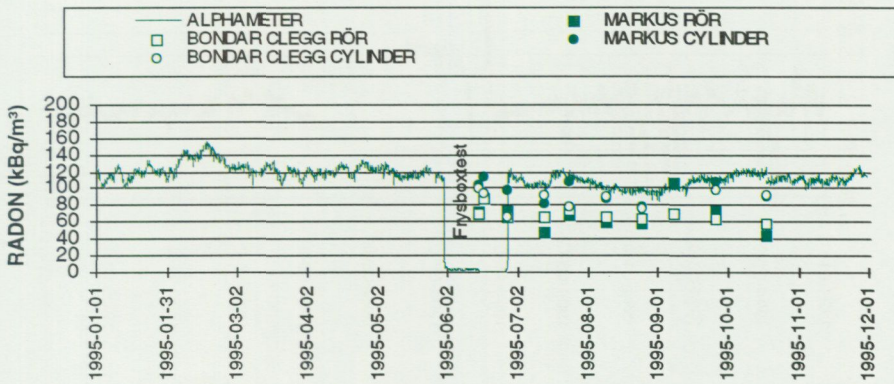
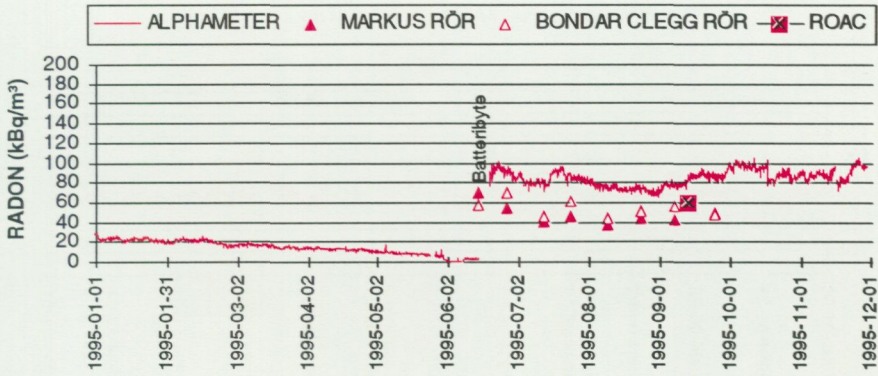
- Nielson D L, Linpei C, Ward S H, 1990:** Gamma-ray spectrometry and radon emanometry i environmental geophysics. Geotechnical and Environmental Geophysics No 5.
- Schery S D, Petschek AG, 1983:** Exhalation of radon and thoron: The question of thermal gradients in soil. Earth and Planetary Science Letters. v. 64. p. 56-60.
- Schumann R R, Douglas E O, Bolinder S A, 1992:** Effects of weather and soil characteristics on temporal variations in soil-gas radon concentrations. Geological Survey of America. Special Paper 271.
- Schumann R R, 1993:** The radon emanation coefficient: An important tool for geologic radon potential estimations, *in* The 1993 Int. Radon Conf, Sept. 20-22, 1993, Denver, Colorado.
- Sun H, Furbish D J, 1995:** Moisture content effect on radon emanation in porous media. Journal of Contaminant Hydrology 18 (1995) 239-255.
- Tanner A B, 1978:** Radon Migration in the Ground. A review. The Natural Radiation Env. III, vol 1, Houston, Texas.
- Tanner A B, 1991:** Error in Measuring Radon in Soil Gas by Means of Passive Detectors. Nucl. Geophys. Vol 5, No 1/2, pp. 25-30. Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E.
- Taipale T T, Winqvist K, 1985:** Seasonal variations in soil gas radon concentrations. Science of Total Environment. Vol. 45. Nr. Oct, pp. 121-126.
- Washington J W, Rose A W, 1990:** Regional and temporal relations of radon in soil gas to soil temperature and moisture. Geophysical research letters, Vol 17, No 6 P 829-832.
- Woith H, Pekdeger A, 1992:** Radon in soil gas: A contribution to the joint German-Turkish earthquake prediction research project. *in* Radon et Gaz rares dans les sciences de la terre et de l'environnement. Actes du Colloque Int. sur la Géochimie des Gaz. Mém. Expl. Cartes Géologiques et Minières de la Belgique. No 32.
- Åkerblom G, Pettersson B, Rosén B, 1988:** Radon i bostäder - Markradon. Statens råd för byggnadsforskning. Rapport R85:1988, reviderad utgåva 1990.



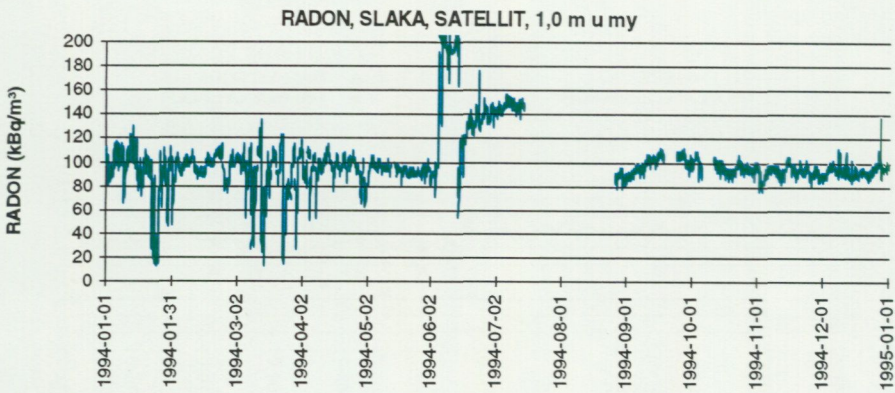
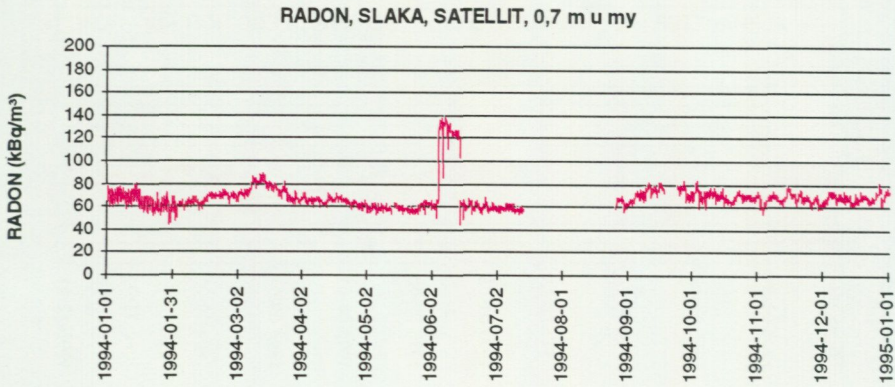
## Bilaga A - Slaka



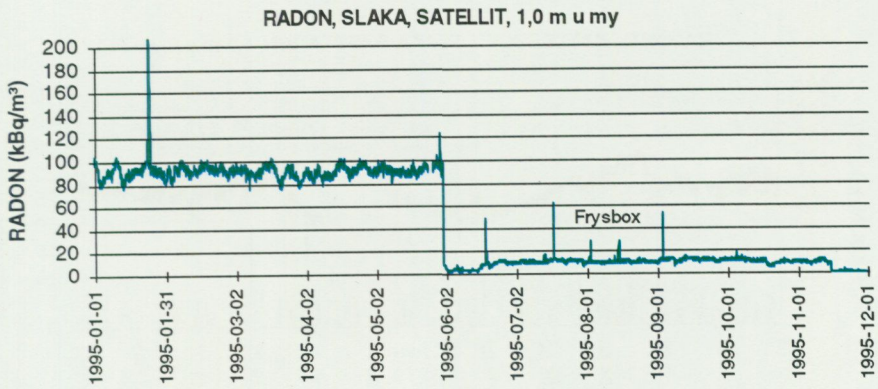
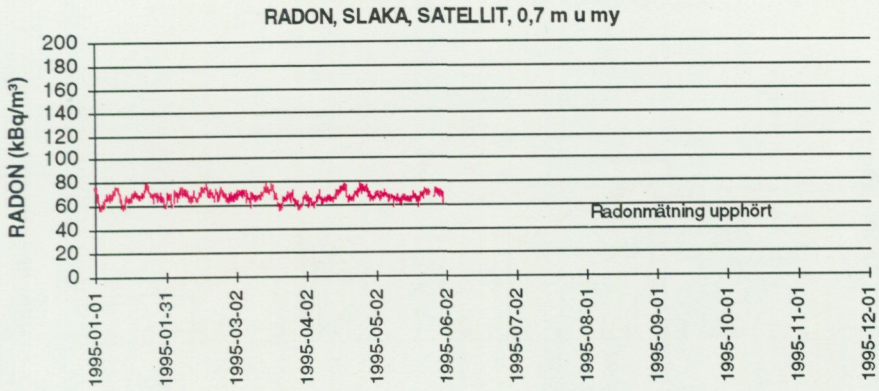
Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan. Slaka basstation 1994. Under sommaren erhöjls felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag. Radonhalten 0,7 m u my sjunker p g a batterifel.



Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan. Slaka basstation 1995.

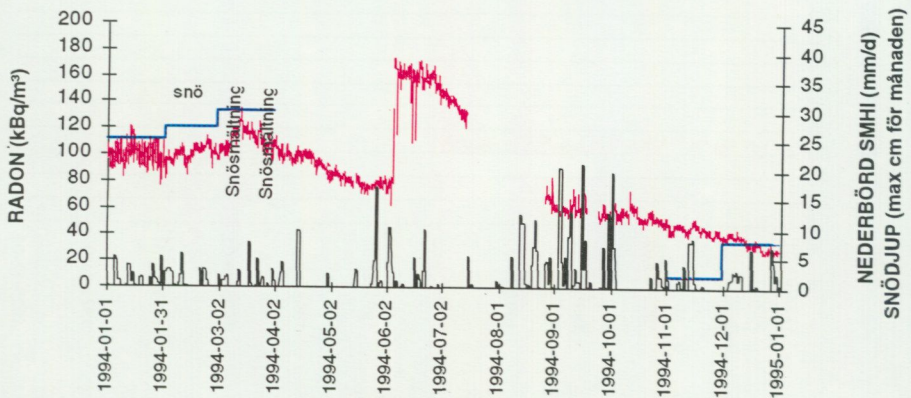


**Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan. Slaka satellit 1994. Under sommaren erhöjls felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag.**

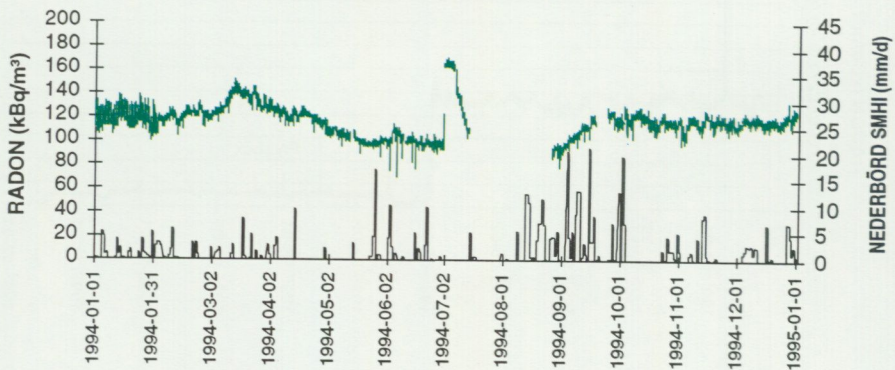


**Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan. Slaka satellit 1995.**

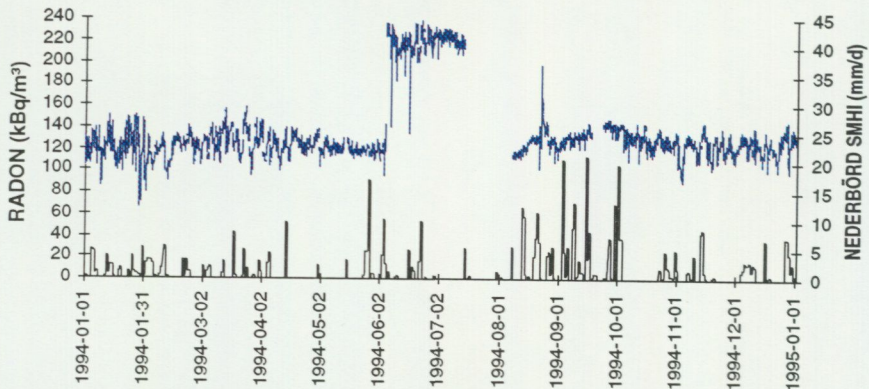
## RADON OCH NEDERBÖRD, SLAKA, BASSTATION, 0,7 m u my



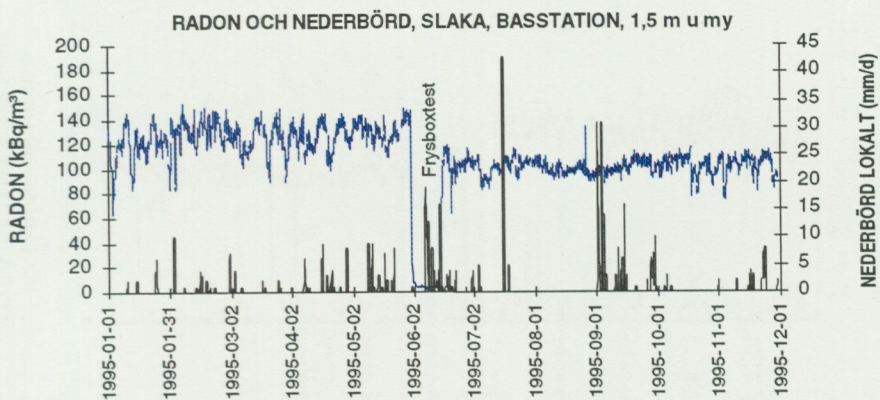
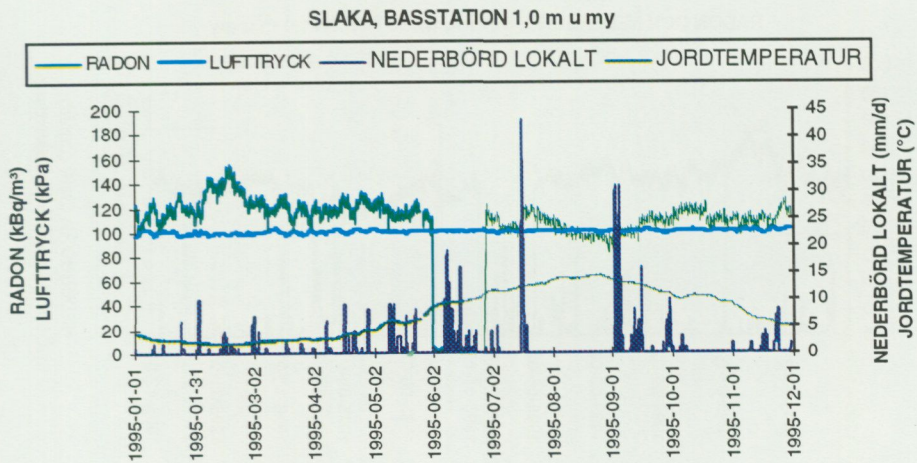
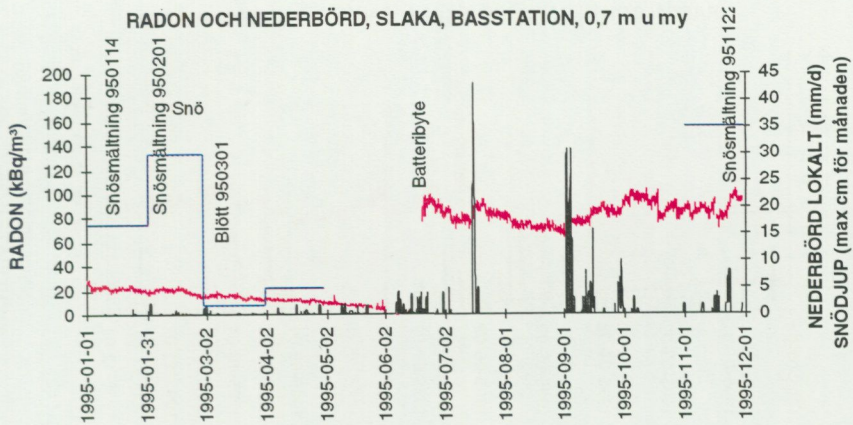
## RADON OCH NEDERBÖRD, SLAKA, BASSTATION, 1,0 m u my



## RADON OCH NEDERBÖRD, SLAKA, BASSTATION, 1,5 m u my

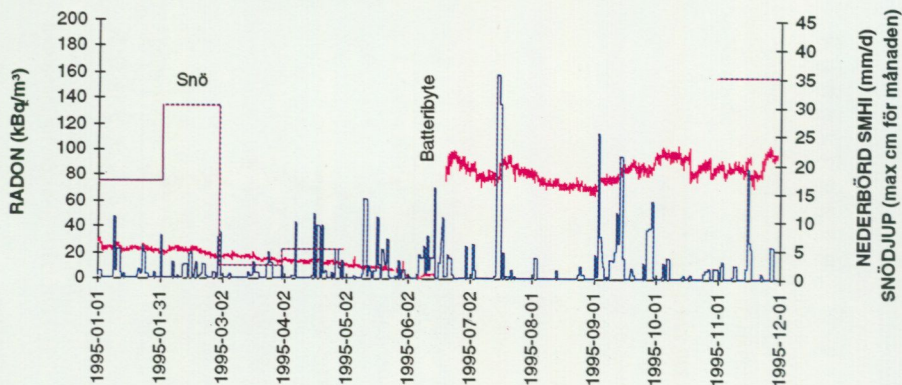


Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte nederbörd SMHI-Malmslätt. Månadens maximala snötäcke vid SMHI-Malmslätt har lagts in i det översta diagrammet. Slaka basstation 1994. Under sommaren erhöles felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag. Radonhalten 0,7 m u my sjunker p g a batterifel.

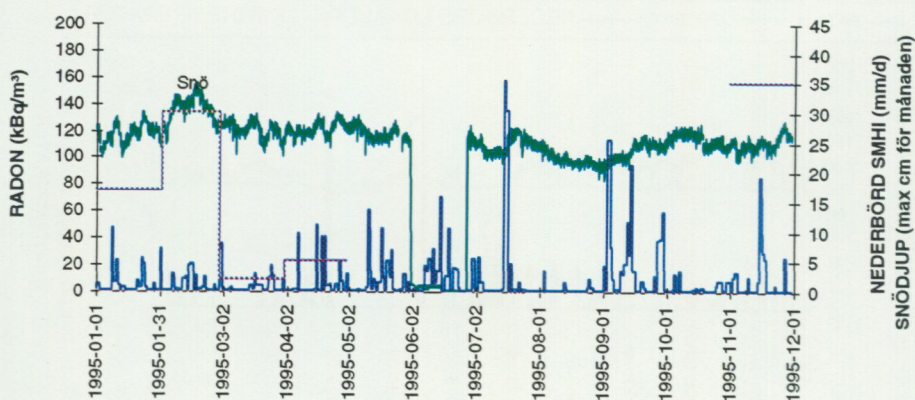


Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte nederbörd lokalt. Månadens maximala snötäcke vid SMHI-Malmslätt har lagts in i det översta diagrammet. Slaka basstation 1995.

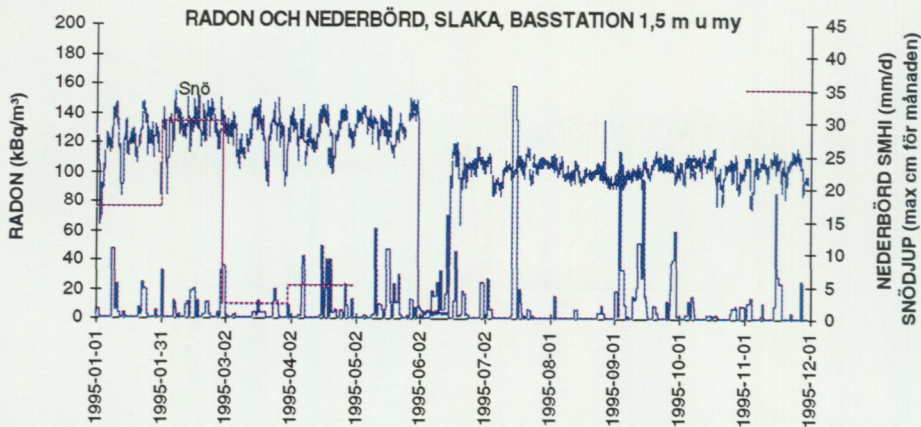
## RADON OCH NEDERBÖRD, SLÅKA, BASSTATION 0,7 m u my



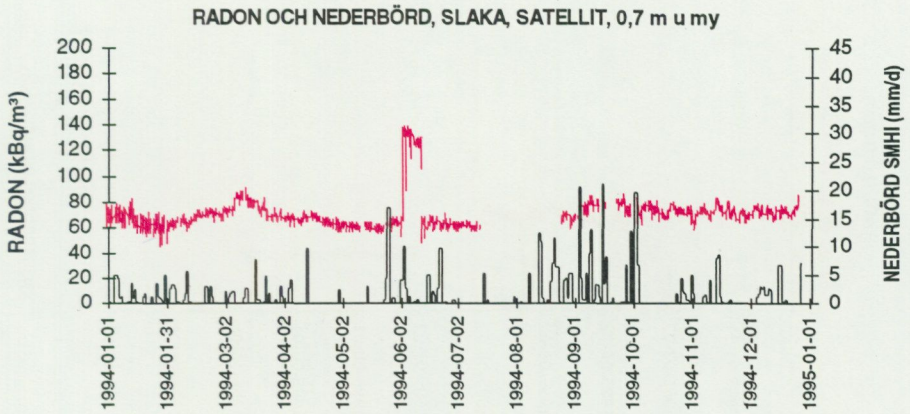
## RADON OCH NEDERBÖRD, SLÅKA, BASSTATION 1,0 m u my



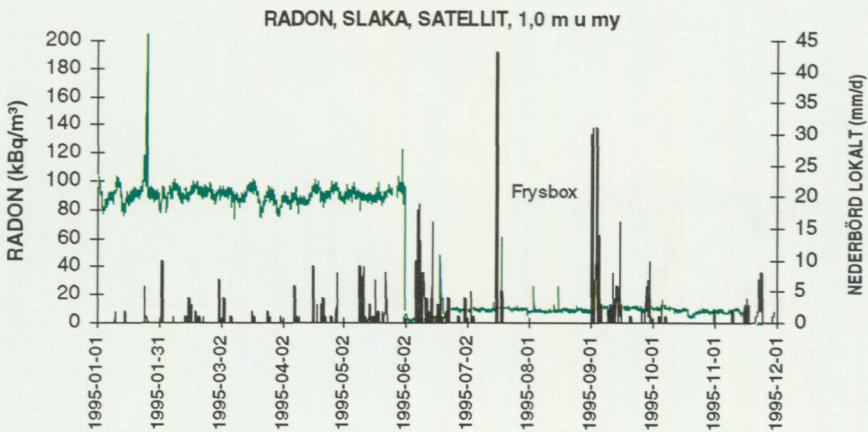
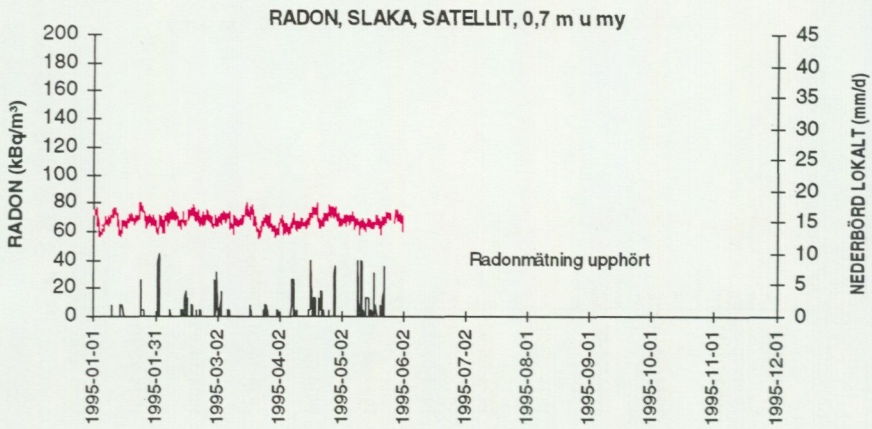
## RADON OCH NEDERBÖRD, SLÅKA, BASSTATION 1,5 m u my



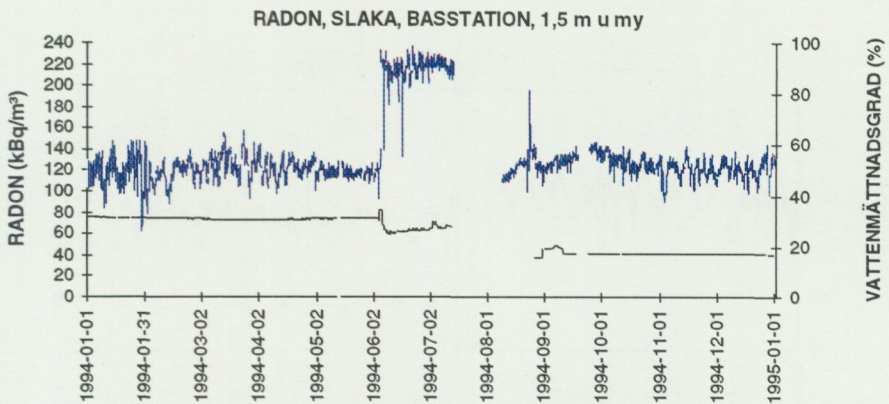
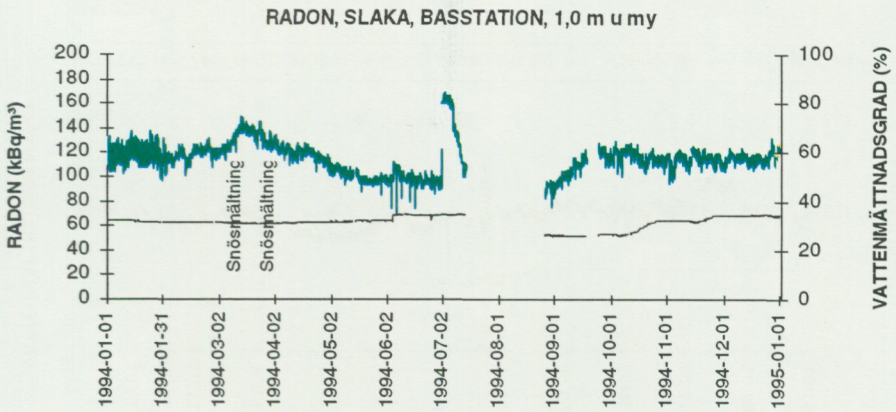
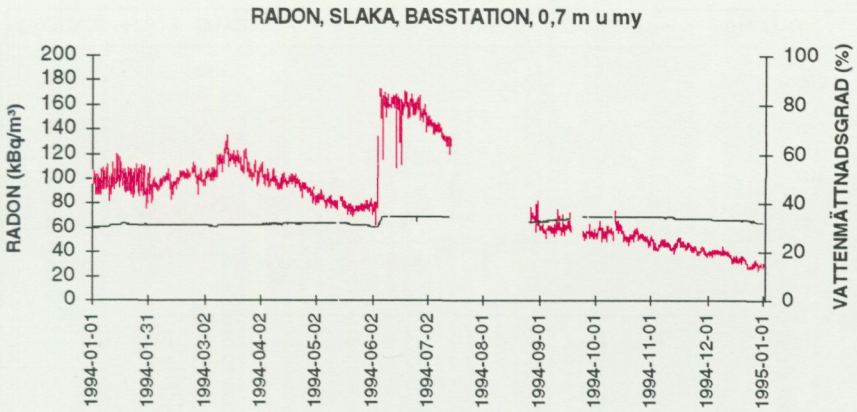
Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte nederbörd och månads maximala snötäcke vid SMHI-Malmslätt. Slåka basstation 1995.



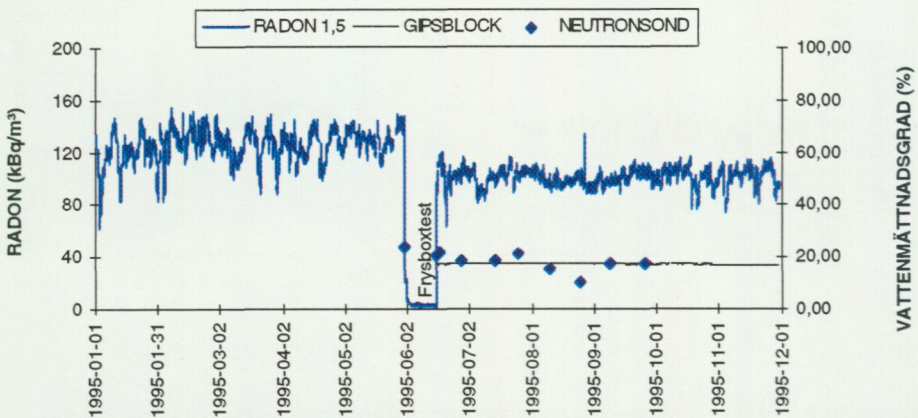
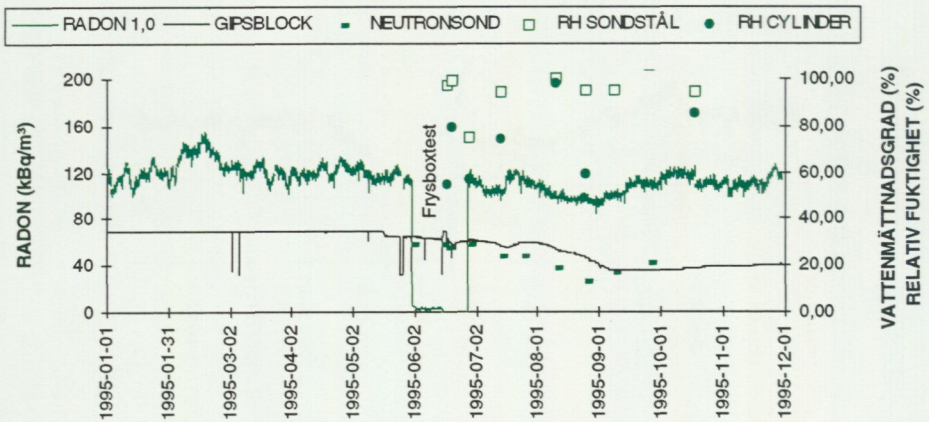
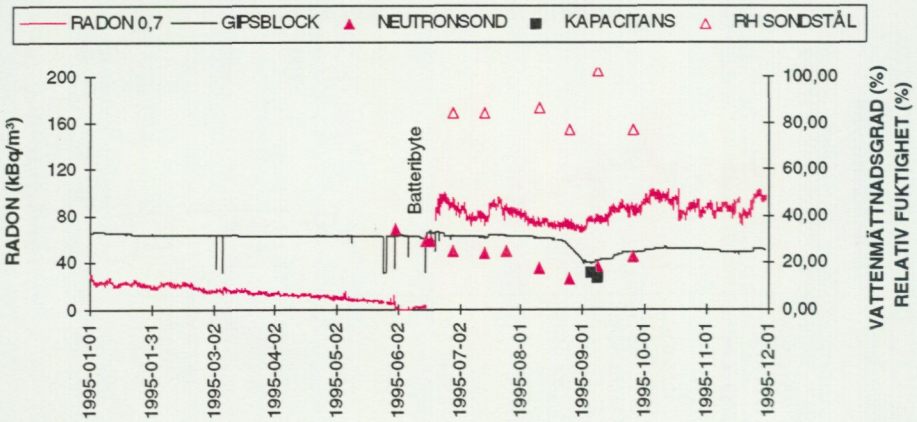
Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan jämte nederbörd SMHI-Malmslätt. Slaka satellit 1994. Under sommaren erhöjls felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag.



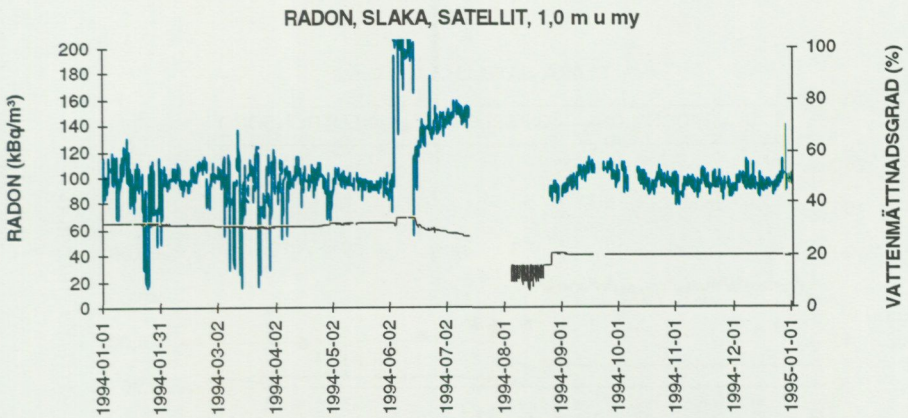
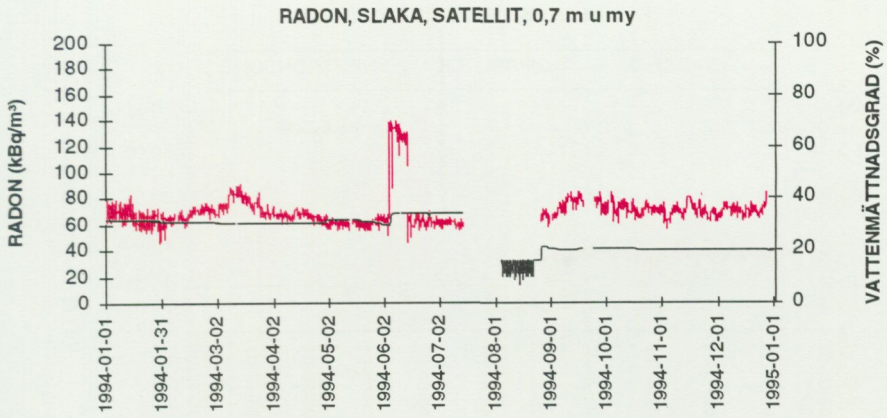
**Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan jänte nederbörd lokalt.  
Slaka satellit 1995.**



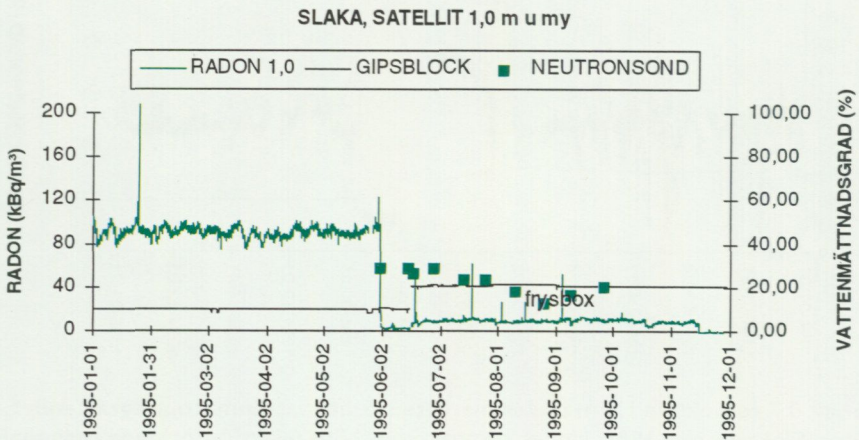
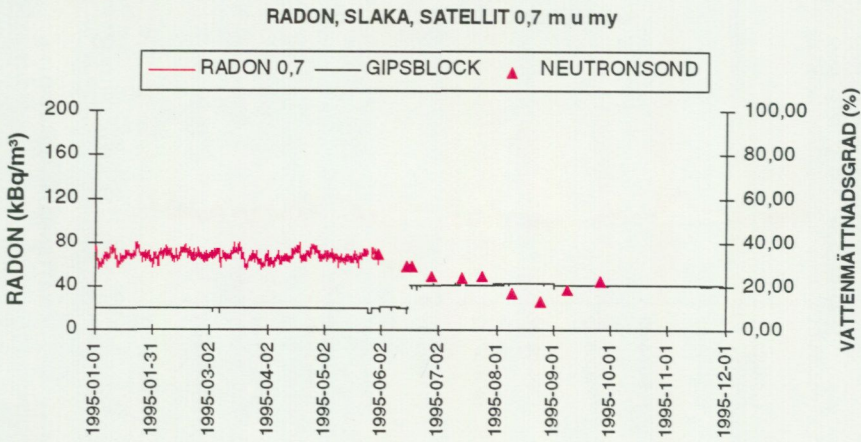
Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte vattenmättnadsgrad enligt gipsblock. Slaka basstation 1994. Under sommaren erhöles felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag. Radonhalten 0,7



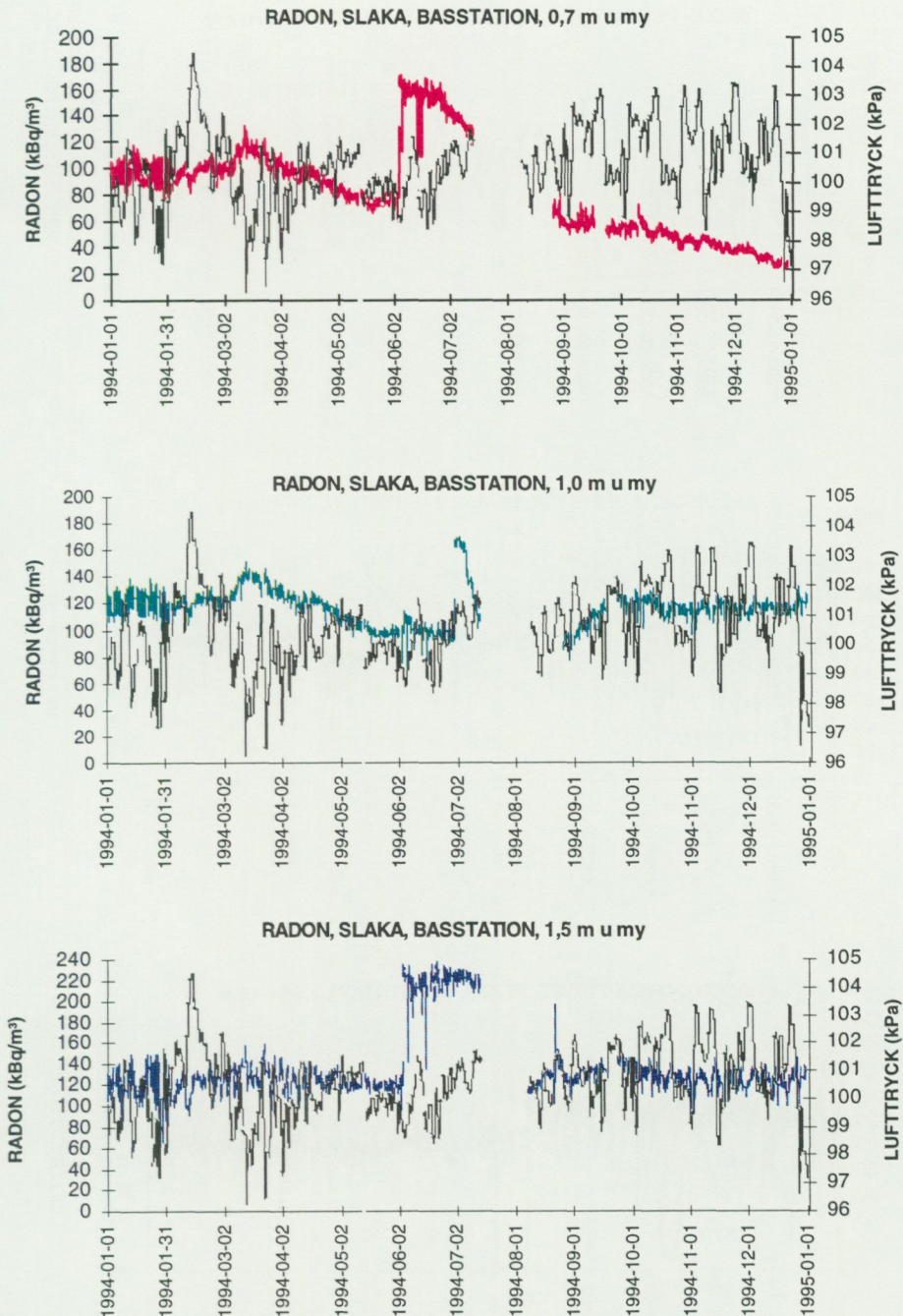
Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte vattenmättnadsgrad enligt gipsblock respektive neutronsond samt relativ fuktighet registrerad av emanometer (Markus 10). Slaka basstation 1995.



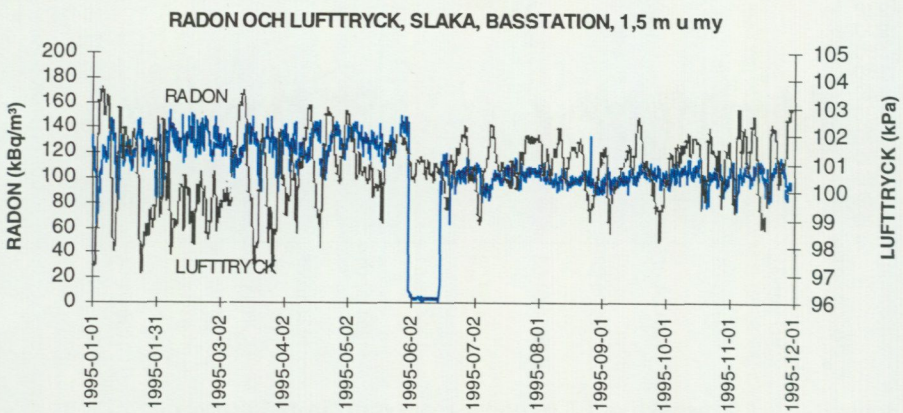
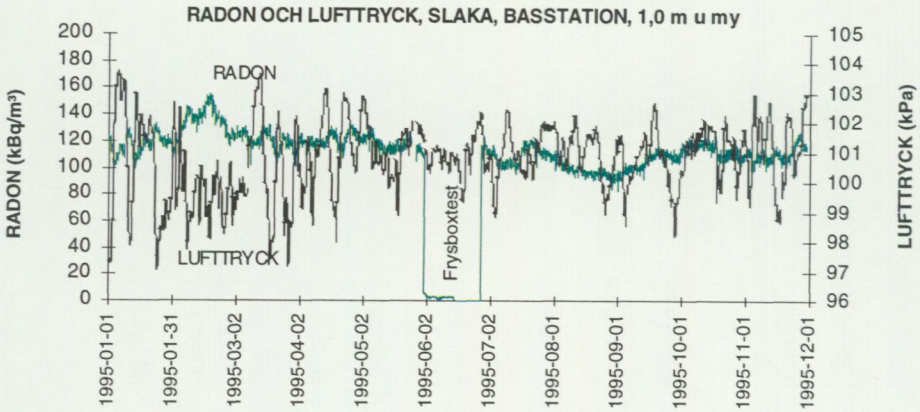
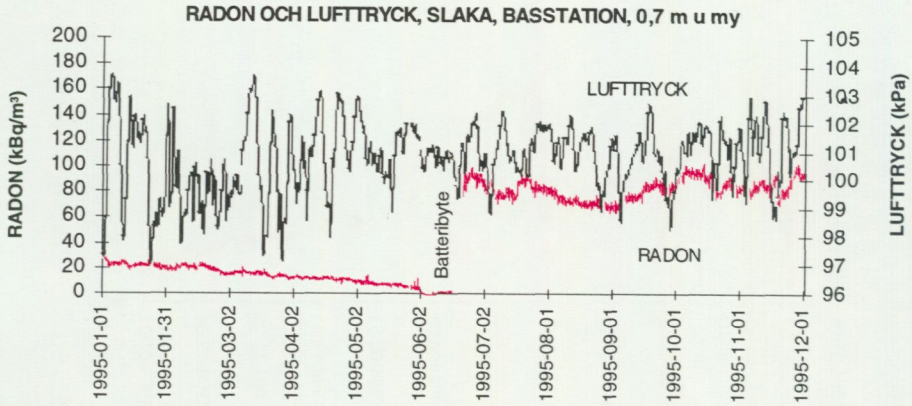
Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan jämfört vattenmättnadsgrad enligt gipsblock. Slaka satellit 1994. Under sommaren erhöjs felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag.



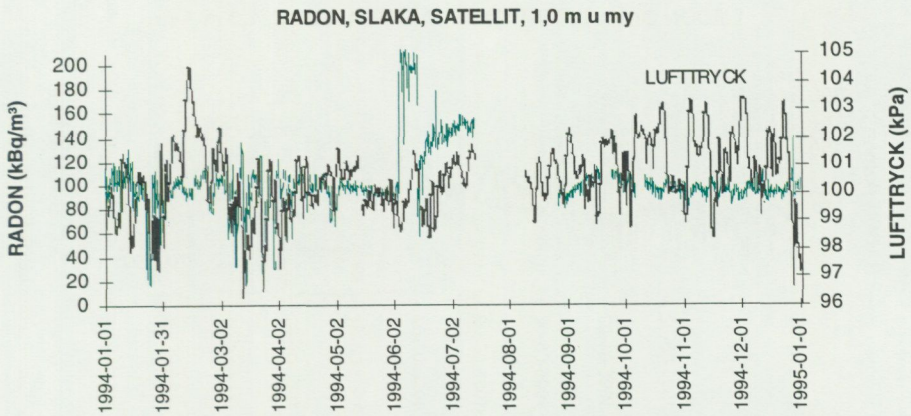
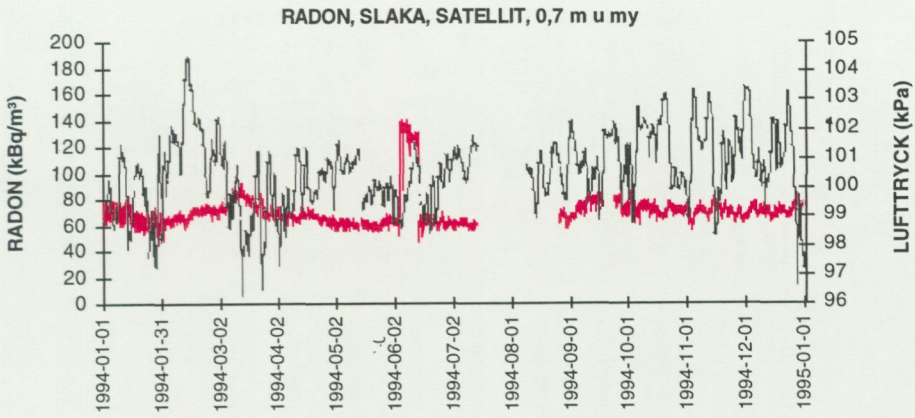
Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan jämte vattenmättnadsgrad enligt gipsblock respektive neutronsond. Från juni mäts radonhalten i en referenskammar (frysbox) i stället för 1,5 m u my. Slaka satellit 1995.



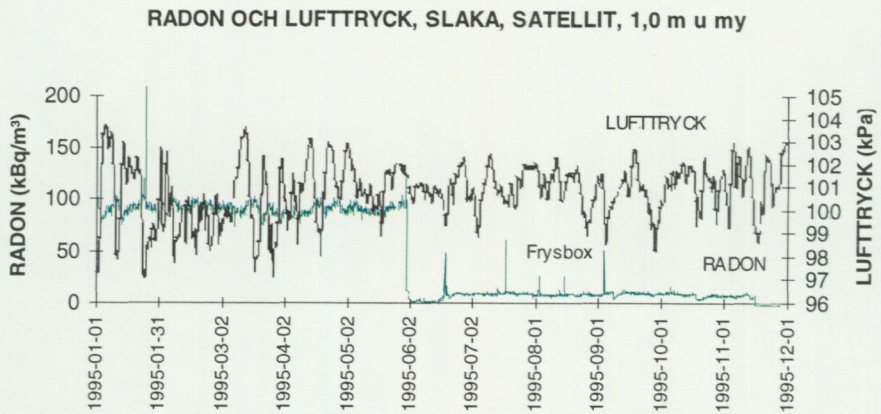
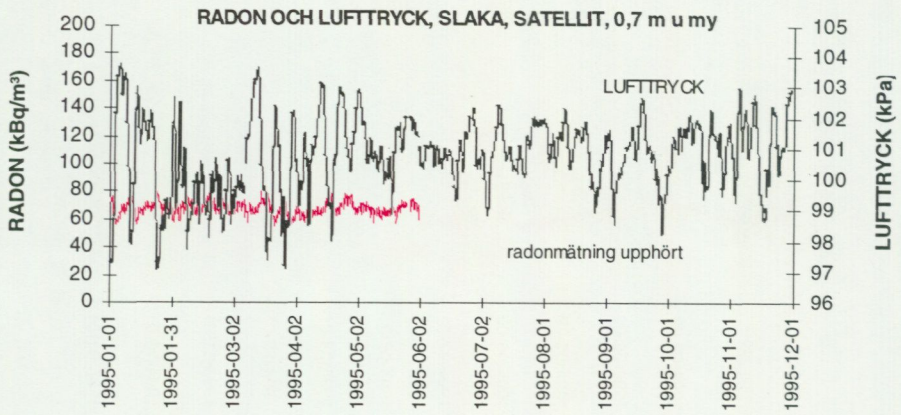
**Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte luftryck. Slaka basstation 1994. Under sommaren erhöjls felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag. Radonhalten 0,7 m u my sjunker p g a batterifel.**



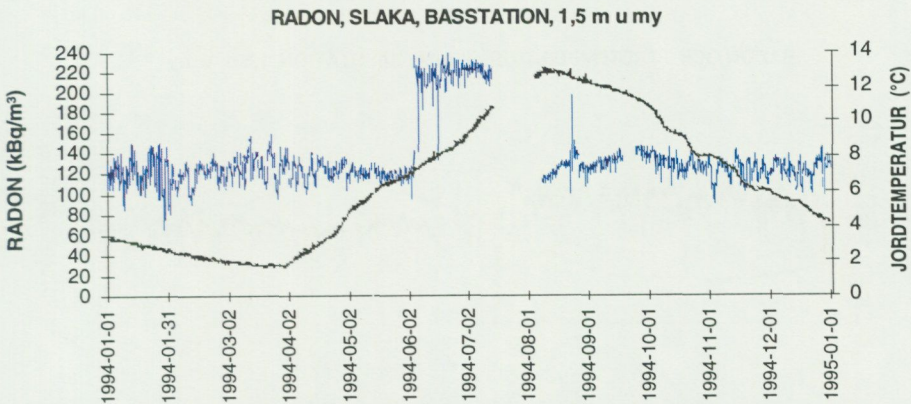
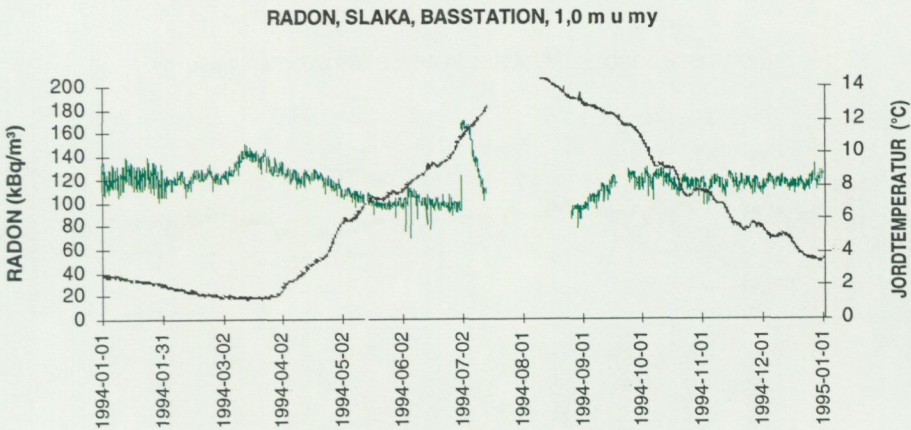
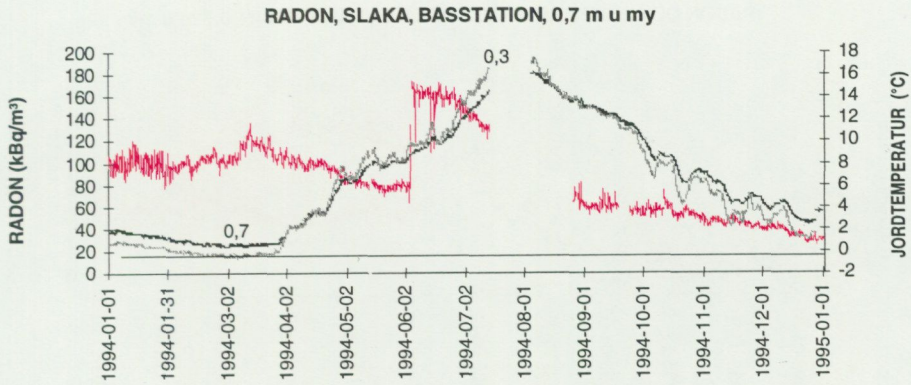
Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte luftryck.  
Slaka basstation 1995.



**Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan jämte lufttryck. Slaka satellit 1994. Under sommaren erhöjls felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag.**

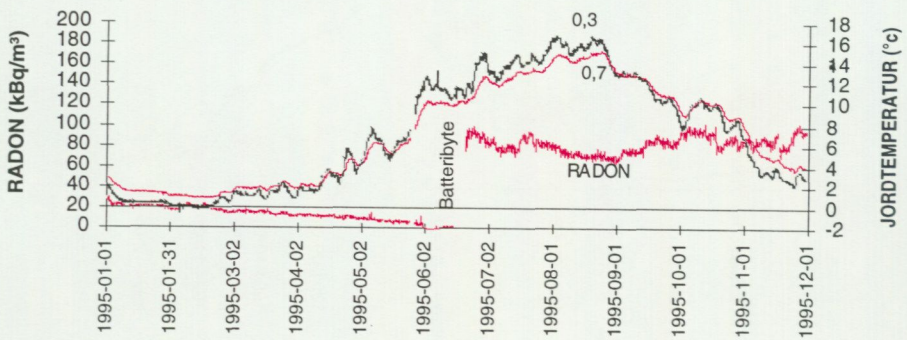


**Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan jämte lufttryck. Från juni mäts radonhalten i en referenskammare (frysbox) i stället för 1,5 m u my. Slaka satellit 1995.**

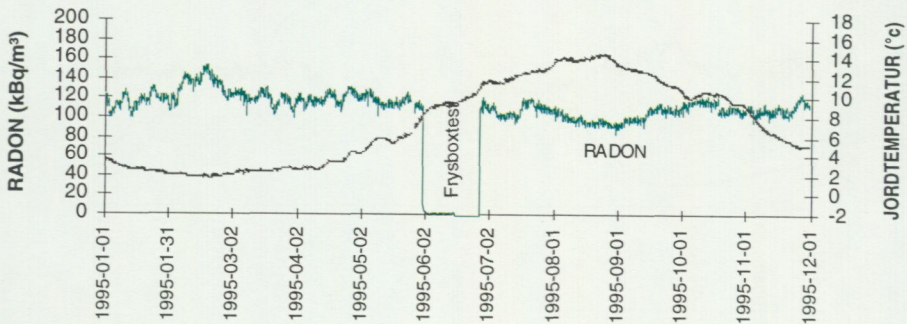


Radonhalt och jordtemperatur på 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan. Slaka basstation 1995. Under sommaren erhöles felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag. Radonhalten 0,7 m u my sjunker p g a batterifel.

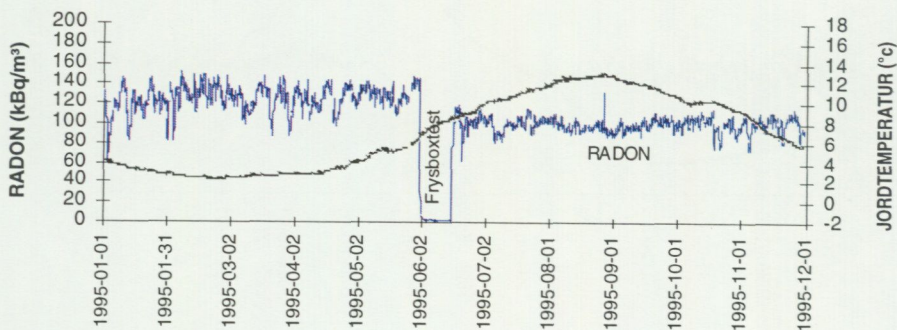
## RADON OCH JORDTEMPERATUR, SLAKA, BASSTATION, 0,7 m u my



## RADON OCH JORDTEMPERATUR, SLAKA, BASSTATION, 1,0 m u my

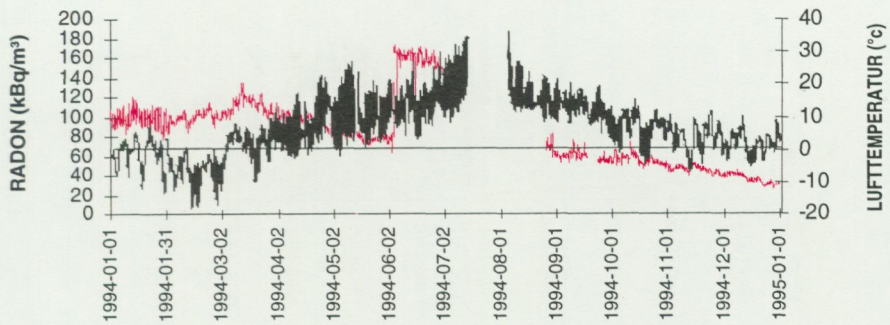


## RADON OCH JORDTEMPERATUR, SLAKA, BASSTATION, 1,5 m u my

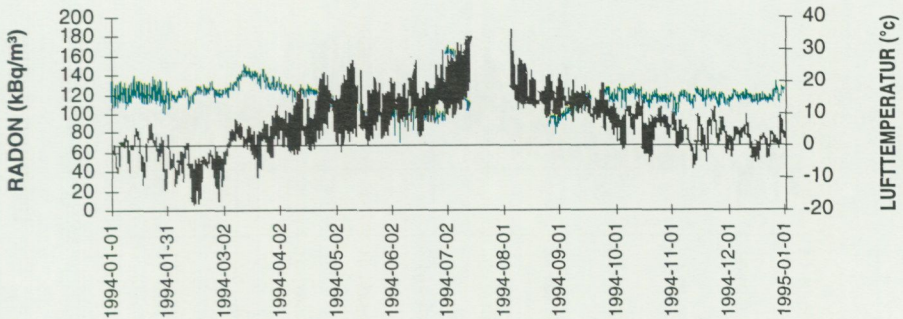


Radonhalt och jordtemperatur på 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan. Slaka basstation 1995.

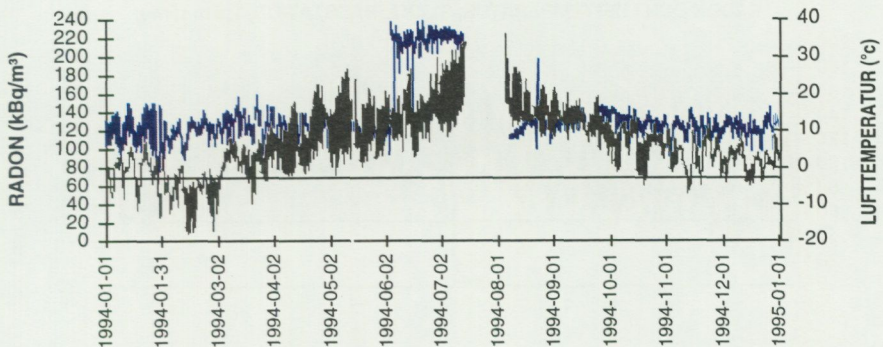
## RADON OCH LUFTTEMPERATUR, SLAKA, BASSTATION, 0,7 m u my



## RADON, SLAKA, BASSTATION, 1,0 m u my

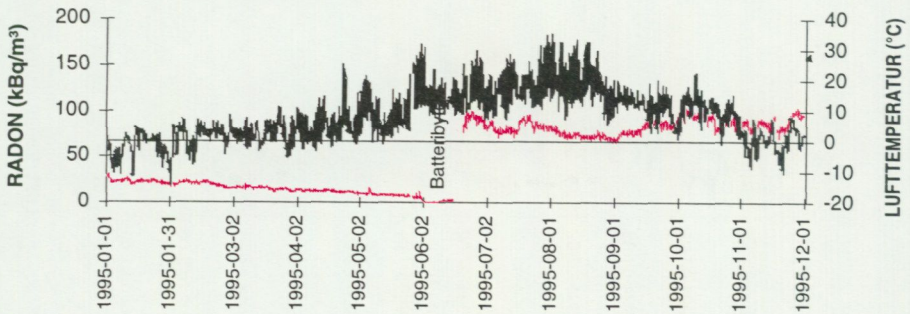


## RADON, SLAKA, BASSTATION, 1,5 m u my

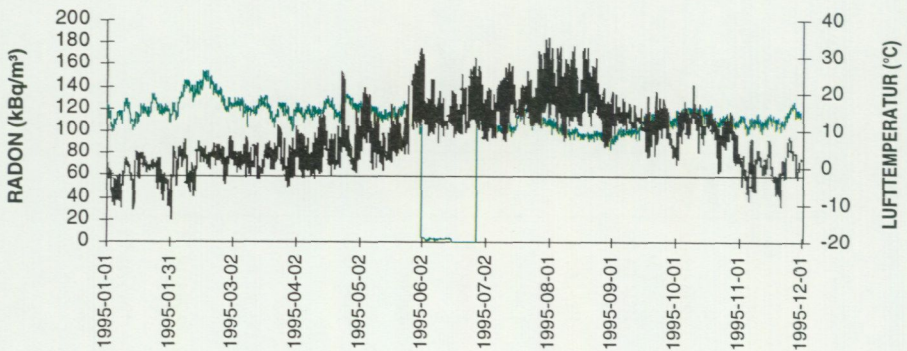


Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte temperatur i atmosfärs-luften. Slaka basstation 1994. Under sommaren erhöles felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag. Radonhalten 0,7 m u my sjunker p g a batterifel.

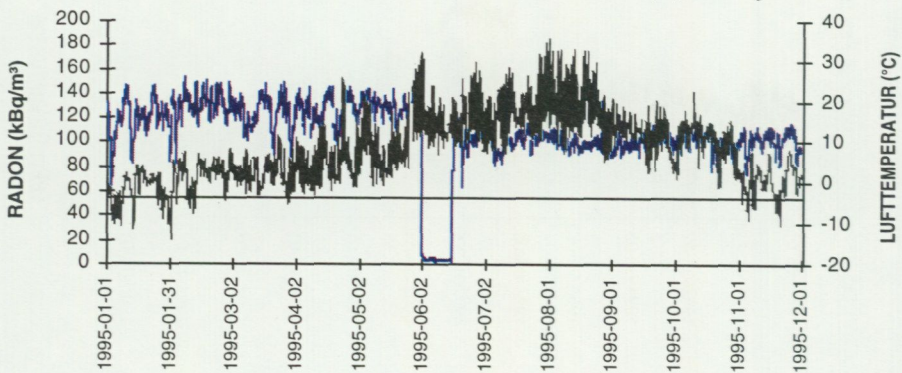
## RADON OCH LUFTTEMPERATUR, SLAKA, BASSTATION, 0,7 m u my



## RADON OCH LUFTTEMPERATUR, SLAKA, BASSTATION, 1,0 m u my

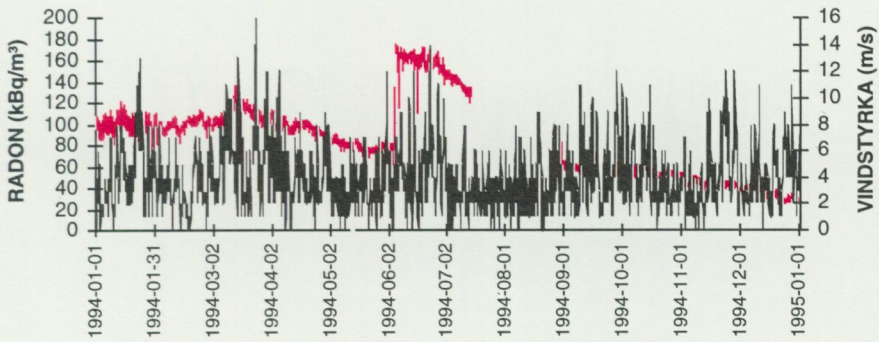


## RADON OCH LUFTTEMPERATUR, SLAKA, BASSTATION, 1,5 m u my

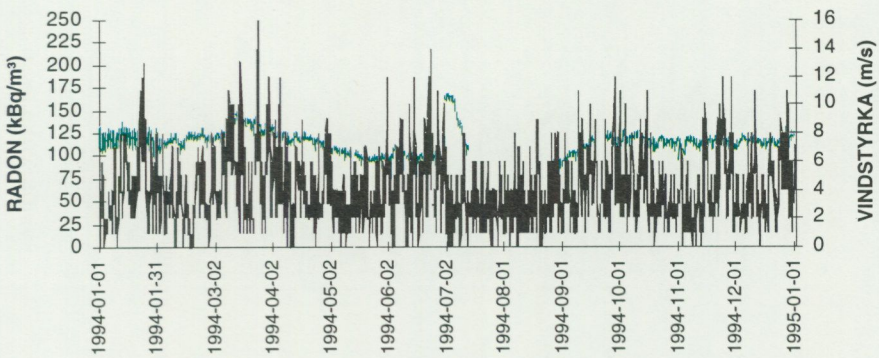


Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte temperatur i atmosfärluften. Slaka basstation 1995.

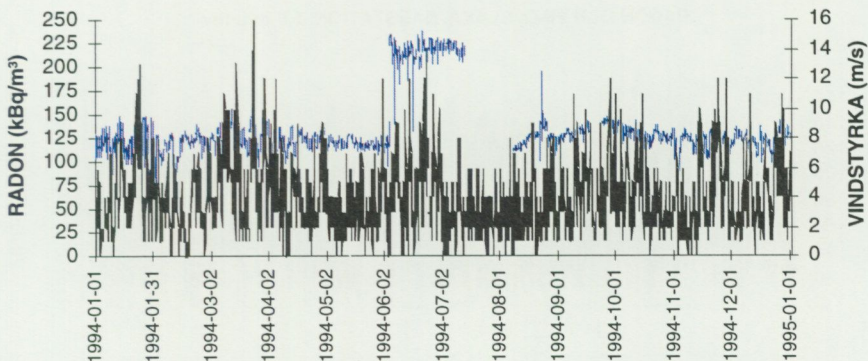
RADON, SLAKA, BASSTATION, 0,7 m u my



RADON, SLAKA, BASSTATION, 1,0 m u my

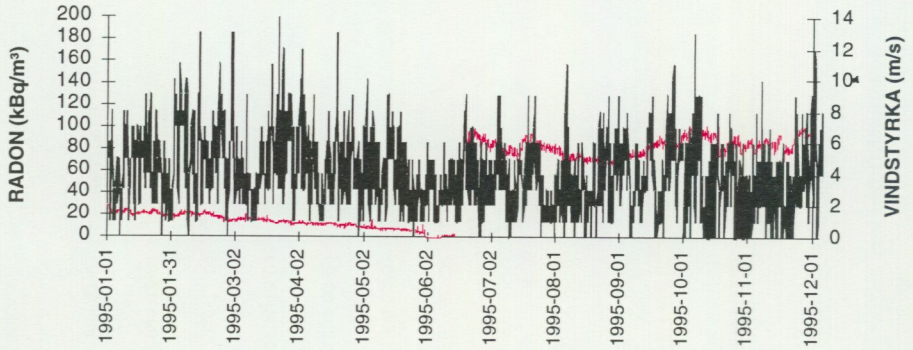


RADON, SLAKA, BASSTATION, 1,5 m u my

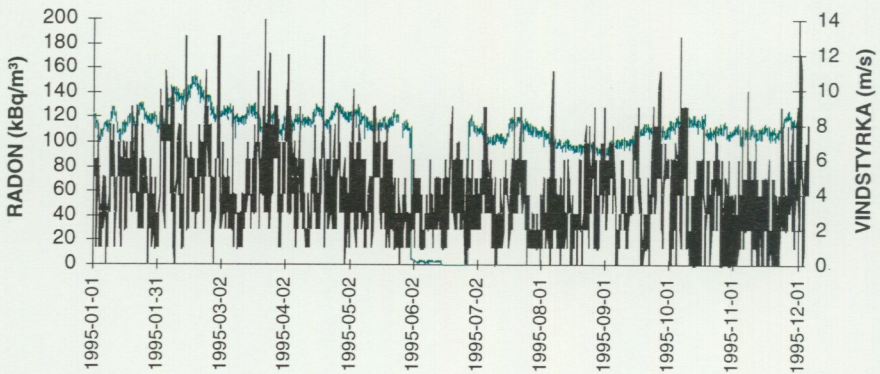


Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte vindhastighet enligt SMHI-Malmslätt. Slaka basstation 1994. Under sommaren erhöles felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag. Radonhalten 0,7 m u my sjunker p g a batterifel.

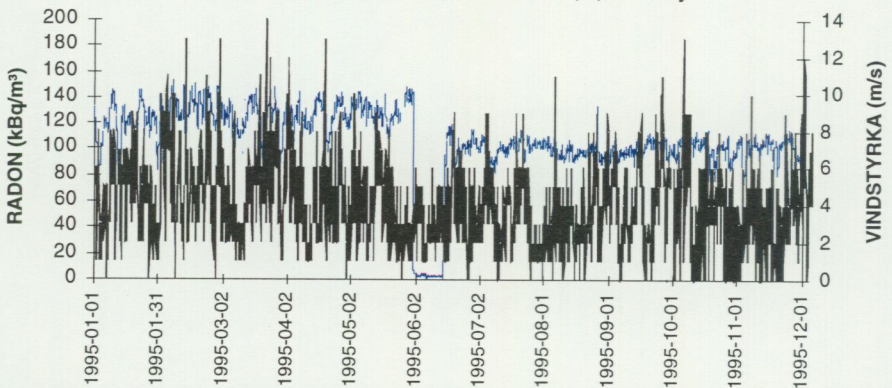
RADON OCH VIND, SLAKA, BASSTATION, 0,7 m u my



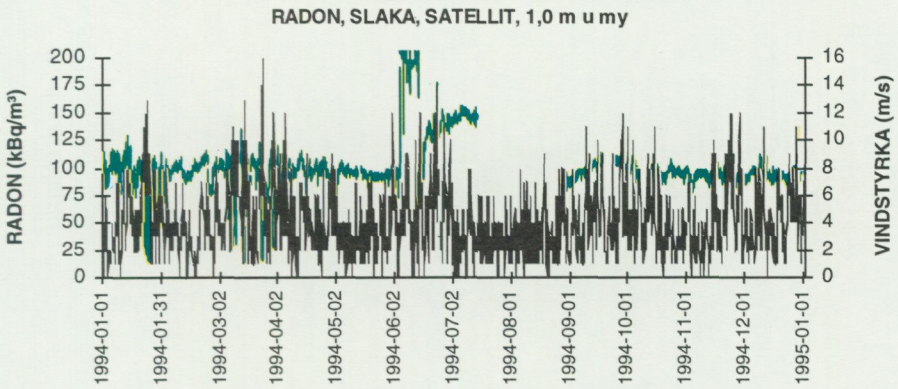
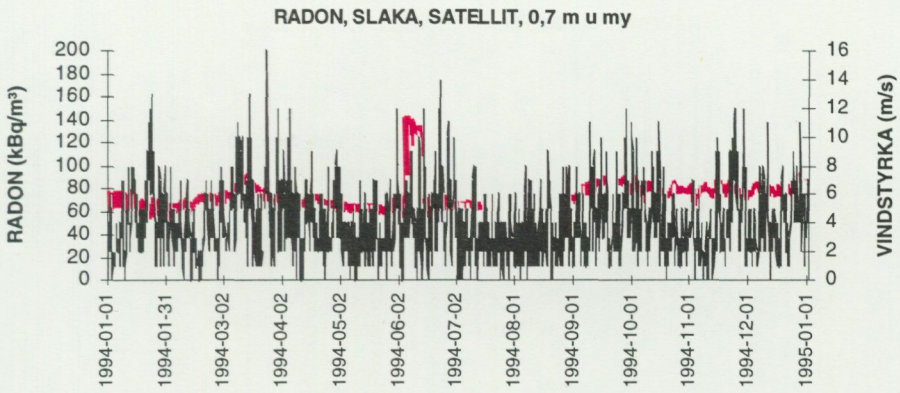
RADON OCH VIND, SLAKA, BASSTATION, 1,0 m u my



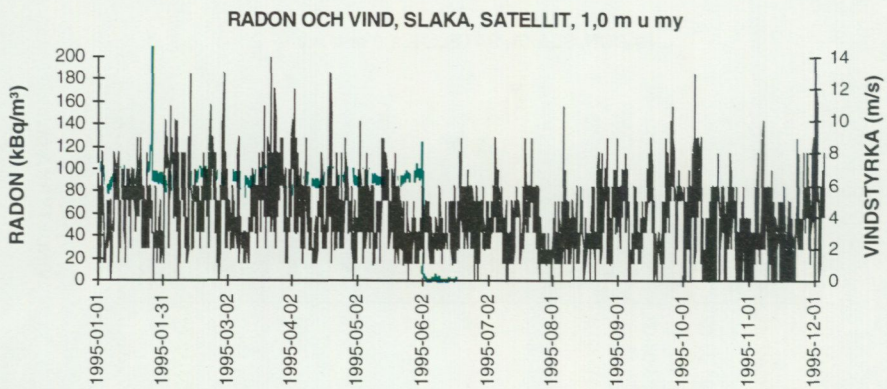
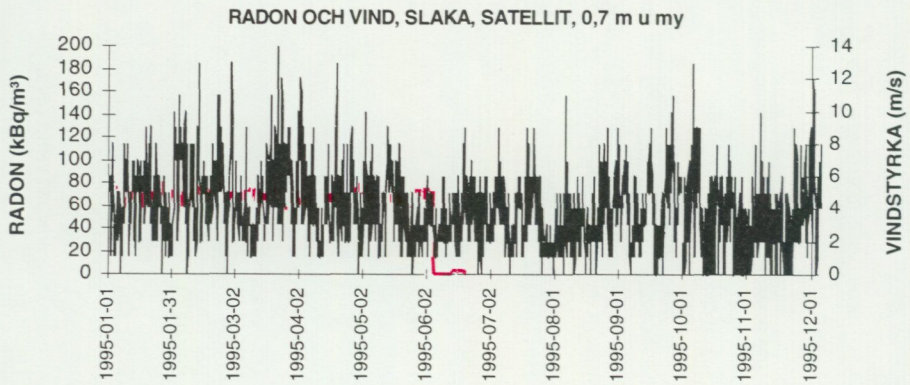
RADON OCH VIND, SLAKA, BASSTATION, 1,5 m u my



Radonhalt 0,7, 1,0 respektive 1,5 m under markytan jämte vindstyrka vid SMHI-Malmslätt. Slaka basstation 1995.



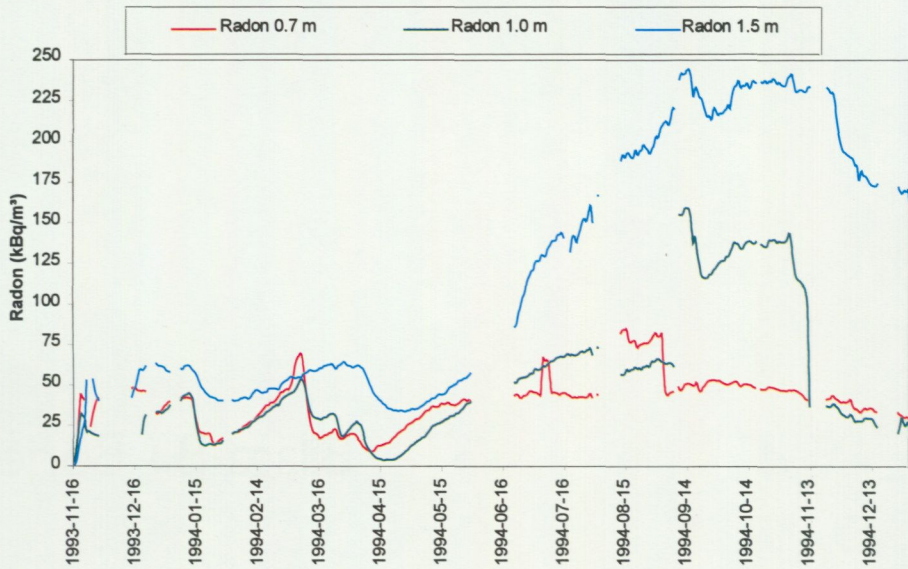
**Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan jämte vindhastighet enligt SMHI-Malmsslätt. Slaka satellit 1994. Under sommaren erhöles felaktiga förhöjda radonhalter sedan mätsystemet skadats i samband med blixtnedslag.**



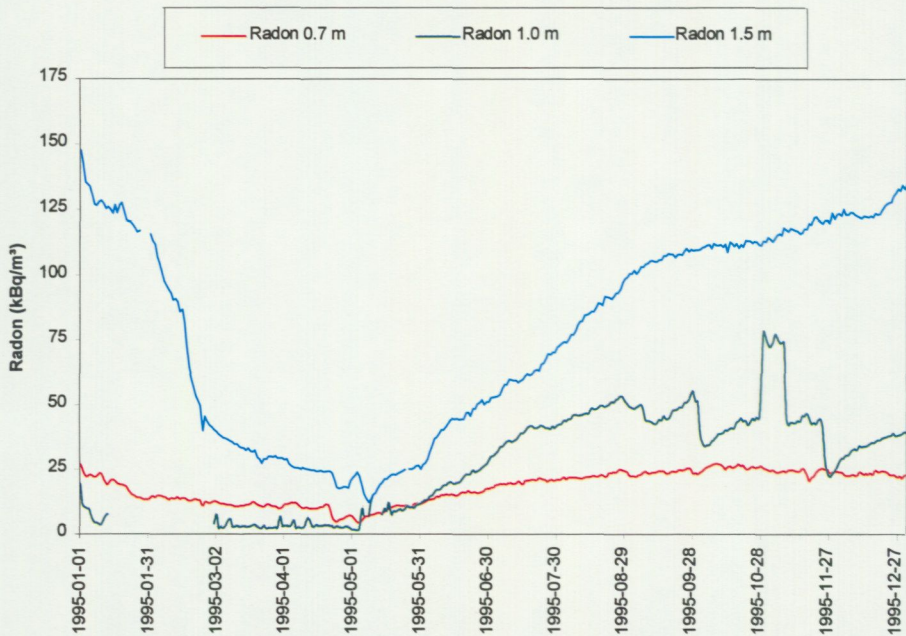
Radonhalt 0,7 respektive 1,0 m under markytan jämte vindstyrka vid SMHI-Malm-slätt. Slaka satellit. 1995.

## Bilaga B - Börje

## I a. Börje – radon november 1993 – december 1994



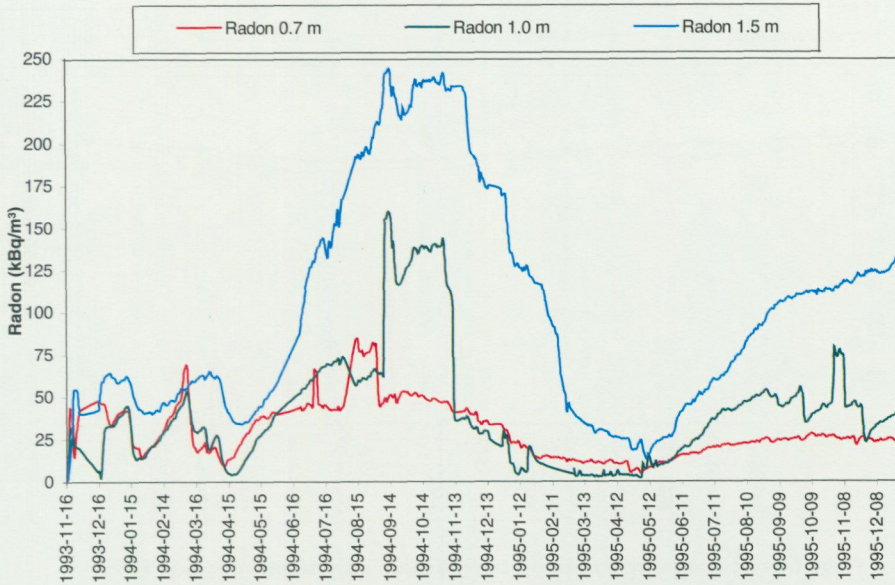
## I b. Börje – radon januari – december 1995



Bilaga B. I a och I b. Radonhalter på tre mätdjup för åren 1993 - 1994 och 1995.

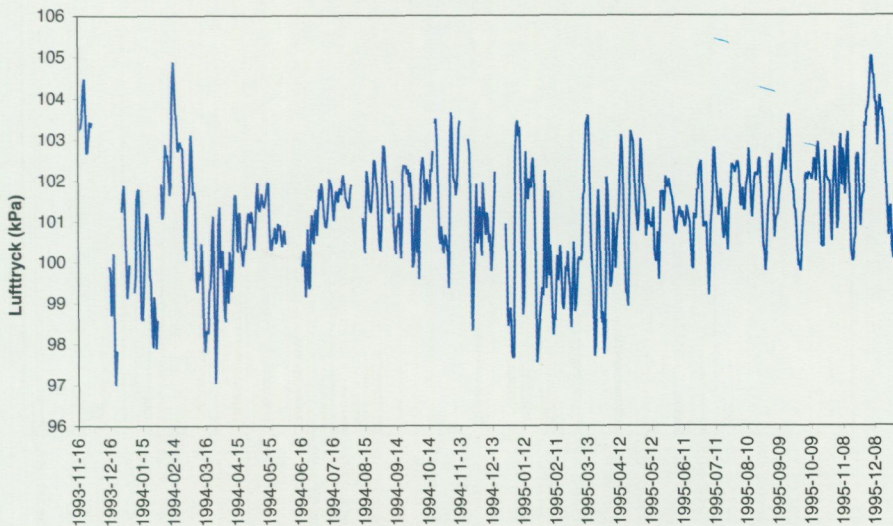
Orsaken till de hastiga förändringarna i radonhalter på 0,7 m och 1,0 m diskuteras i texten. Mätvärdena är inte interpolerade för avbrott, jämför med 2a - 2b.

## 2 a. Börje - radon november 1993 - december 1995



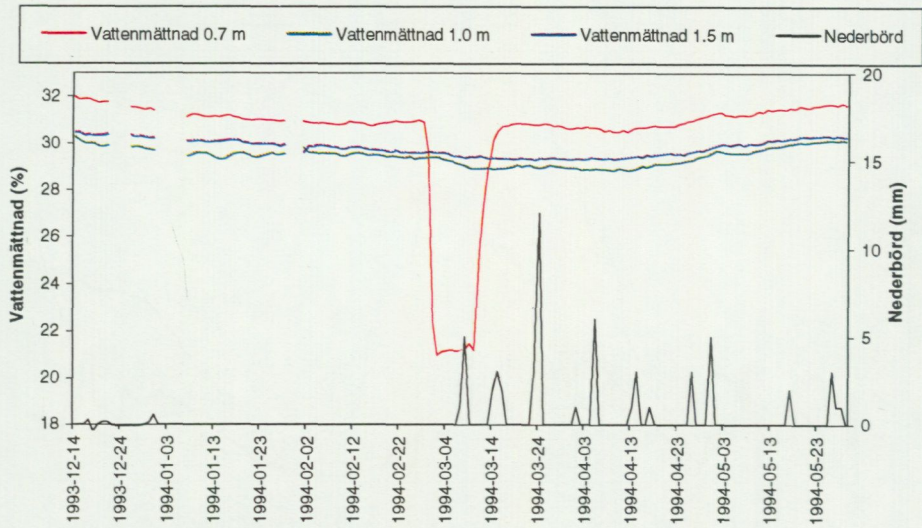
- 2 a. Radonhalter på tre mätdjup i morän 1993 - 1995. Mätvärdena är interpolerade för avbrotten i mätningarna, jämför med 1 a. Orsaken till de hastiga förändringarna i radonhalter på 0,7 m och 1,0 m diskuteras i texten.

## 2 b. Börje - lufttryck 1993 - 1995



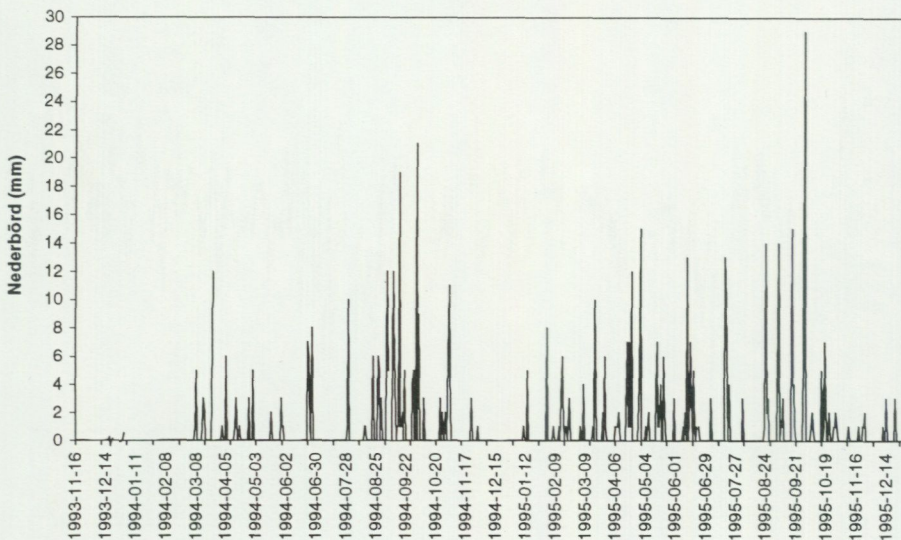
## 2 b. Börje - lufttryck 1993 - 1995.

## 3 a. Börje – vattenmättnad och nederbörd dec 1993 – juni 1994



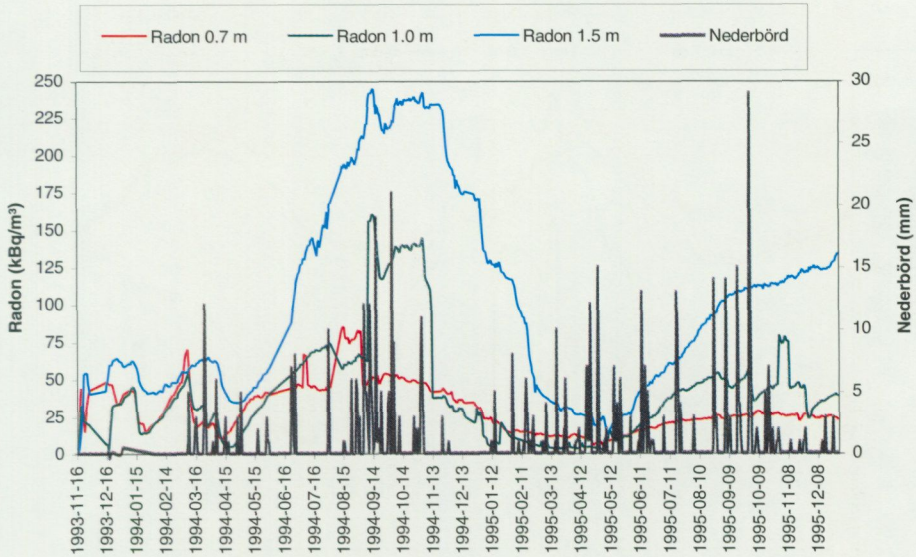
- 3 a. Registrerad vattenmättnad på tre mätdjup och nederbörd dec 1993 - maj 1994. Åska, som orsakade avbrott i mätningarna i början av juni 1994, skadade gipsblocken och erhållna mätvärden är inte trovärdiga efter denna händelse. början av mars 1994

## 3 b. Börje – nederbörd 1993 – 1995



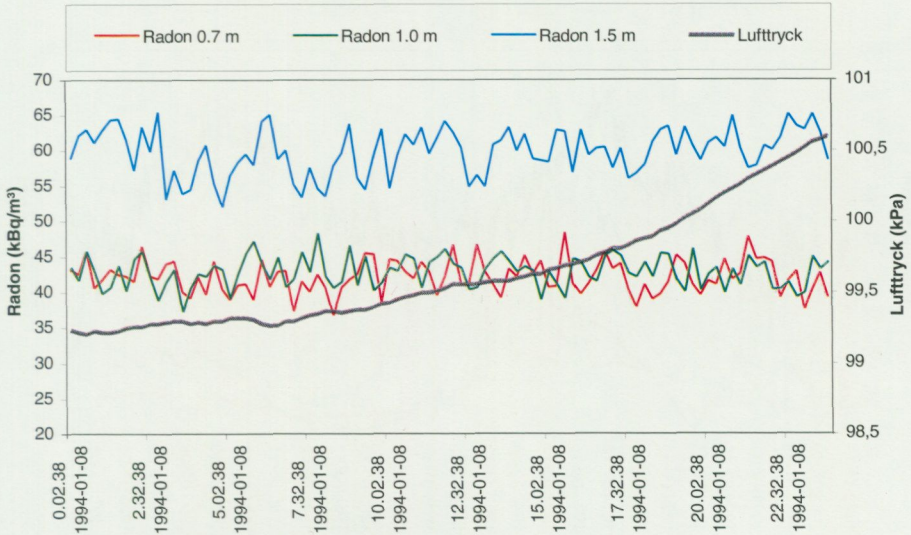
Bilaga B. 3 b. Nederbörd 1993 - 1995. Endast smält nederbörd har registrerats.

## 4 a. Börje - radon och nederbörd 1993 - 1995



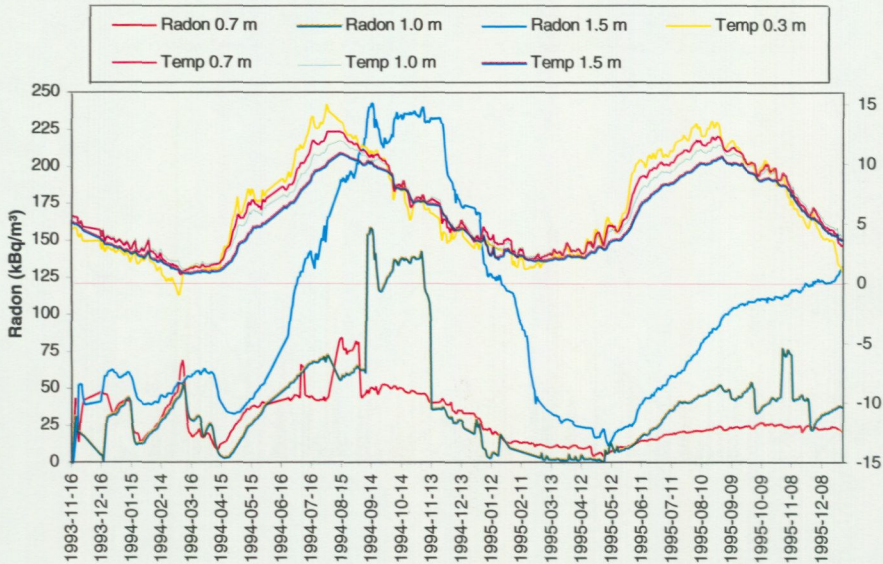
4a. Radonhalter på tre mätdjup och nederbörd 1993 - 1995. Orsaken till de hastigförändringarna i radonhalter diskuteras i texten.

## 4 b. Börje - radon och lufttryck 8 januari 1994



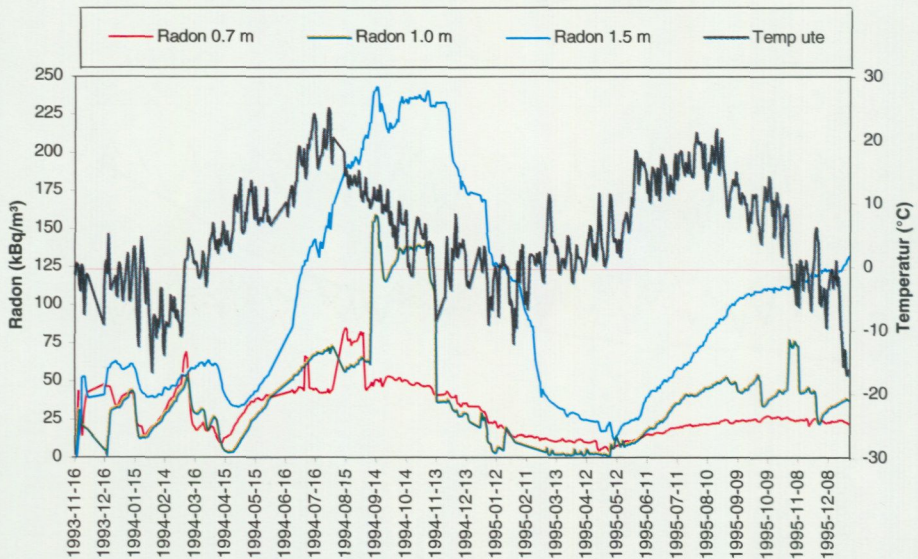
4 b. Radonhalter på tre mätdjup och lufttryck under ett dygn. Mätningar 4 gånger per timme.

## 5 a. Börje – radon och jordtemperatur 1993 – 1995

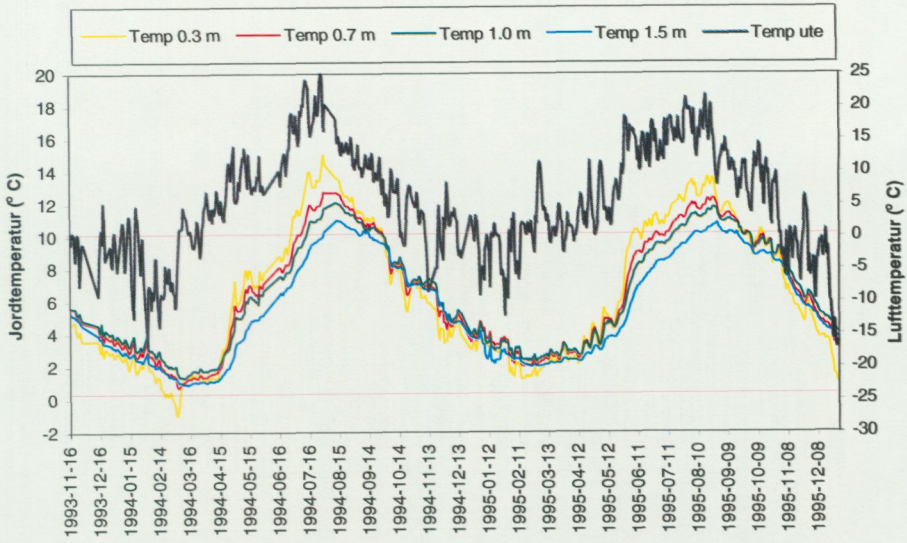


- 5 a. Radonhalter på tre mätdjup och jordtemperatur på fyra mätdjup 1993 - 1995. Orsaken till de hastiga förändringarna i radonhalter på 0,7 m och 1,0 m diskuteras i texten.

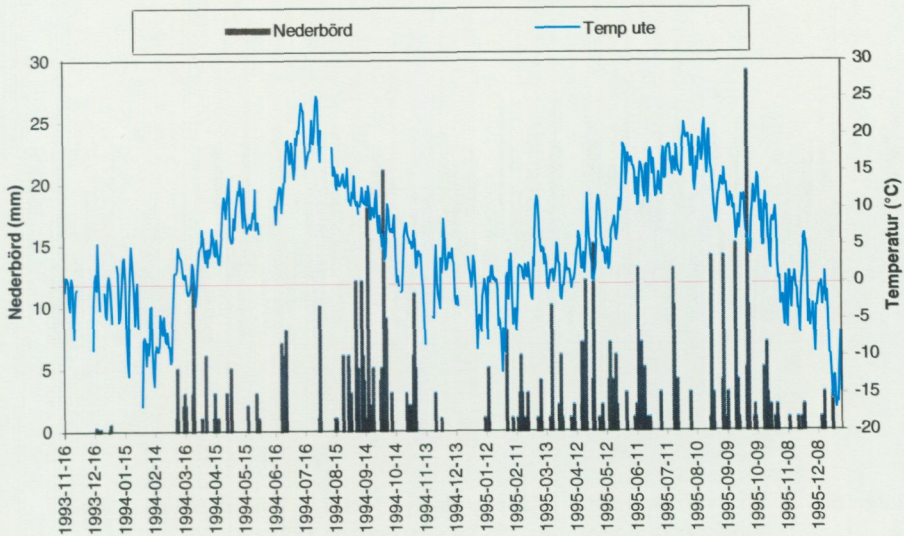
## 5 b. Börje - radon och lufttemperatur 1993 - 1995



- 5 b. Radonhalter på tre mätdjup och lufttemperatur 1993 - 1995. Orsaken till de hastiga förändringarna i radonhalter på 0,7 m och 1,0 m diskuteras i texten.

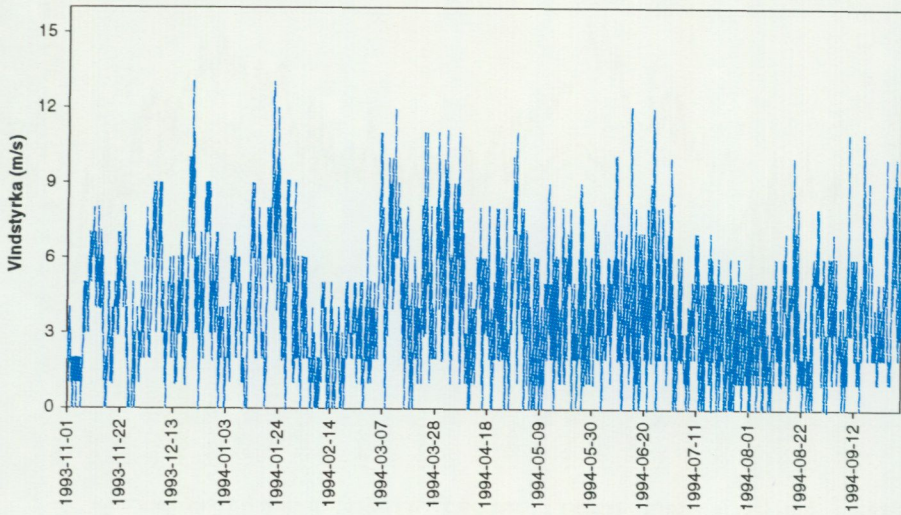


**Bilaga B. 6 a. Börje - temperatur i jord på fyra mätdjup och lufttemperatur 1993 - 1995.**

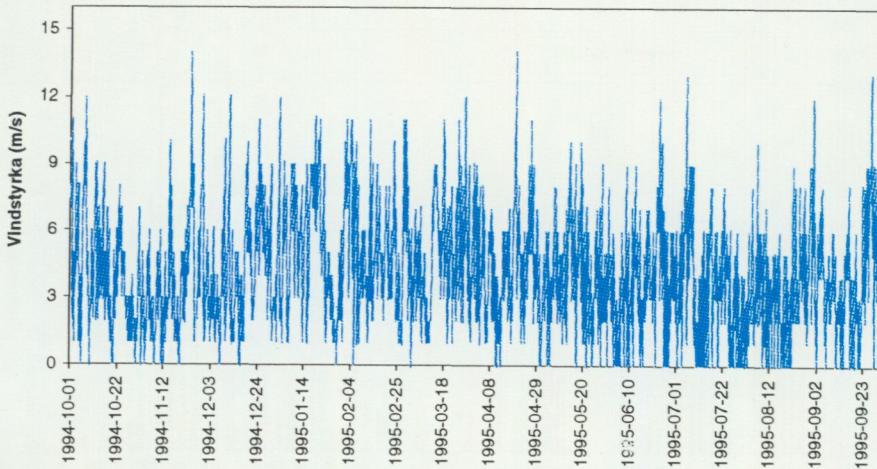


**Bilaga B. 6 b. Börje - nederbörd och lufttemperatur 1993 - 1995.**

## 7 a. Upplands flygflottilj, vindstyrka november 1993 - september 1994



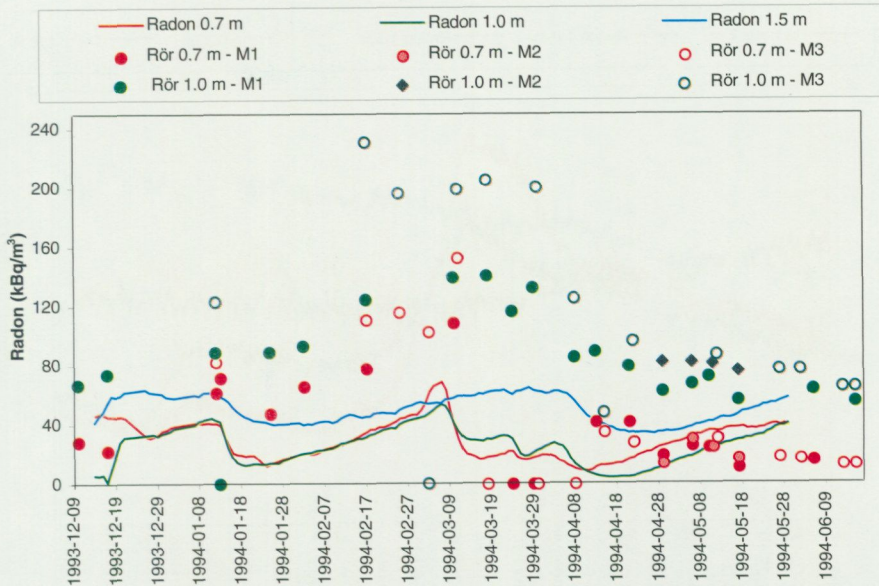
## 7 b. Upplands flygflottilj, vindstyrka oktober 1994 - september 1995

**Bilaga B. 7. Vindstyrka mätt vid Upplands flygflottilj, 6 km öster om Börje.**

7 a. Vindstyrka november 1993 - september 1994.

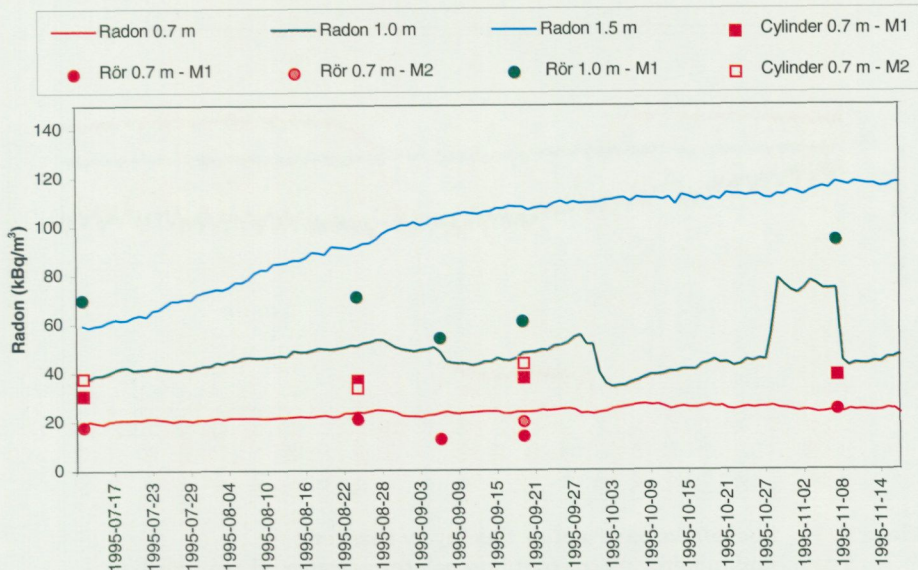
7 b. Vindstyrka oktober 1994 - september 1995.

## 8 a. Börje – radonmätningar december 1993 – juni 1994



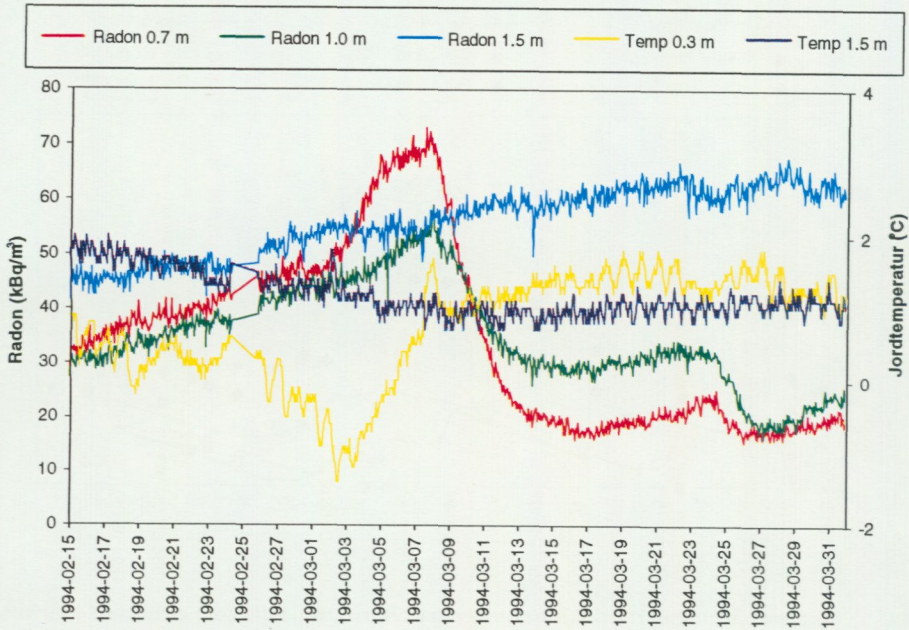
8a. Radonmätningar med Alphameter på tre mätdjup (linjer) och med Markus-10 på två mätdjup. M1, M2 och M3 betecknar olika Markus-10 instrument.

## 8 b. Börje – radonmätningar juni – nov 1995

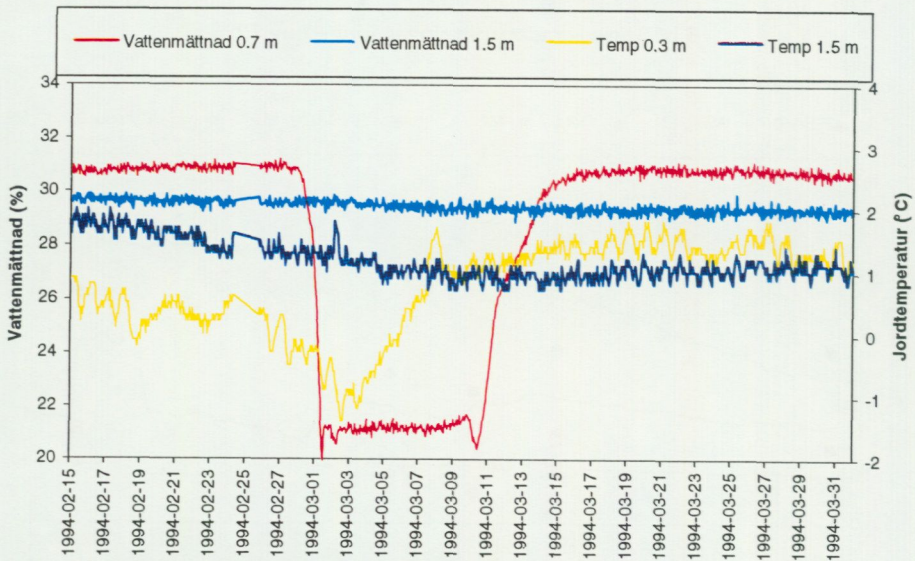


8 b. Radonmätningar med Alphameter på tre mätdjup (linjer) och med Markus-10 på två mätdjup i rör och på ett mätdjup i en nedgrävd cylinder. M1 och M2 betecknar olika Markus-10 instrument.

## 9 a. Börje – radon och jordtemperatur februari – mars 1994



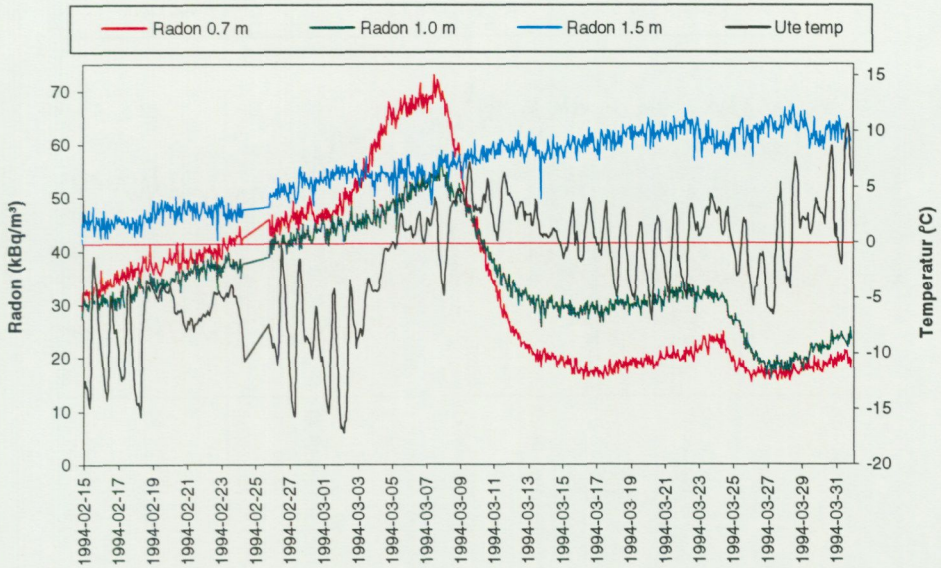
## 9 b. Börje – vattenmättnad och jordtemperatur februari – mars 1994

**Bilaga B. 9. Lockeffekt på grund av tjälning av marken.**

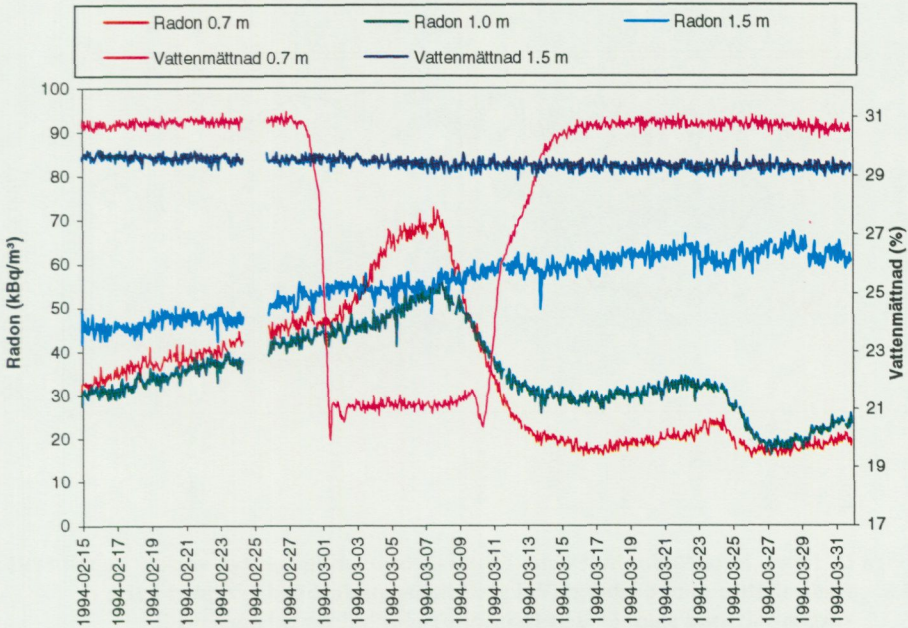
9 a. Radonhalter på tre mätdjup och temperatur på två mätdjup 15 februari – 31 mars 1994.

9 b. I samband med tjälningen av marken frös gipsblocket på 0.7 m i mars 1994.

## 9 c. Börje – radon och lufttemperatur februari – mars 1994

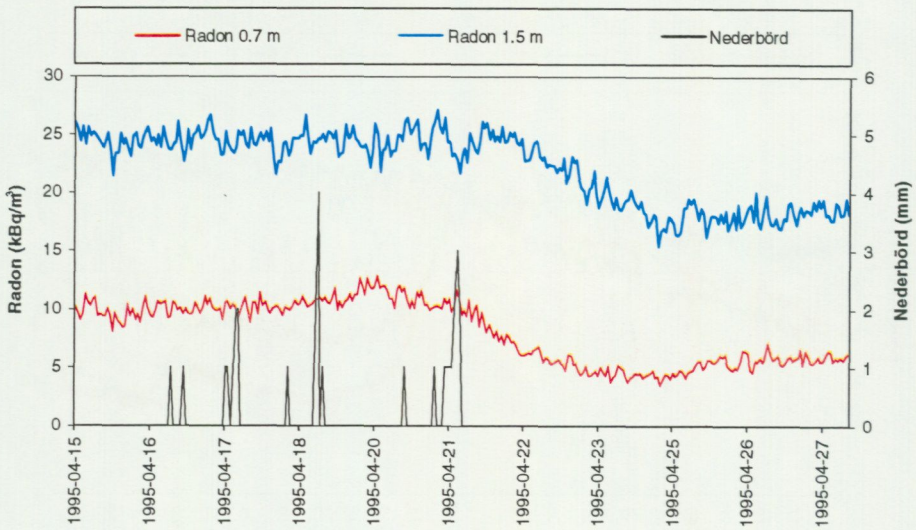


## 9 d. Börje – radon och vattenmättnad februari – mars 1994

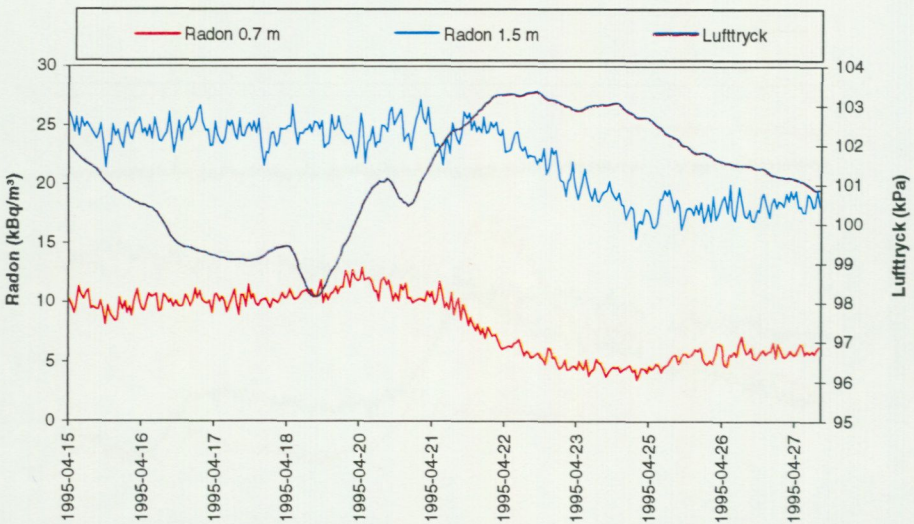


Bilaga B. 9 c. Radonhalter och lufttemperatur. 9 d. Radonhalter och vattenmättnad.

## 10 a. Börje – radon och nederbörd 15 – 27 april 1995



## 10 b. Börje – radon och lufttryck 15 – 27 april 1995

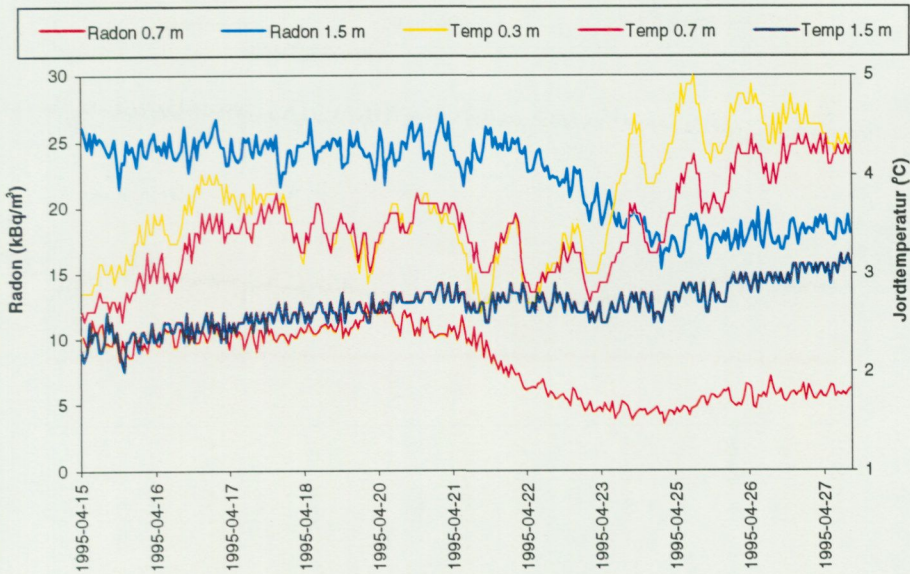


Bilaga B. 10 a - 10 b. Radonhalt och klimatfaktorer under en två veckor i april 1995.

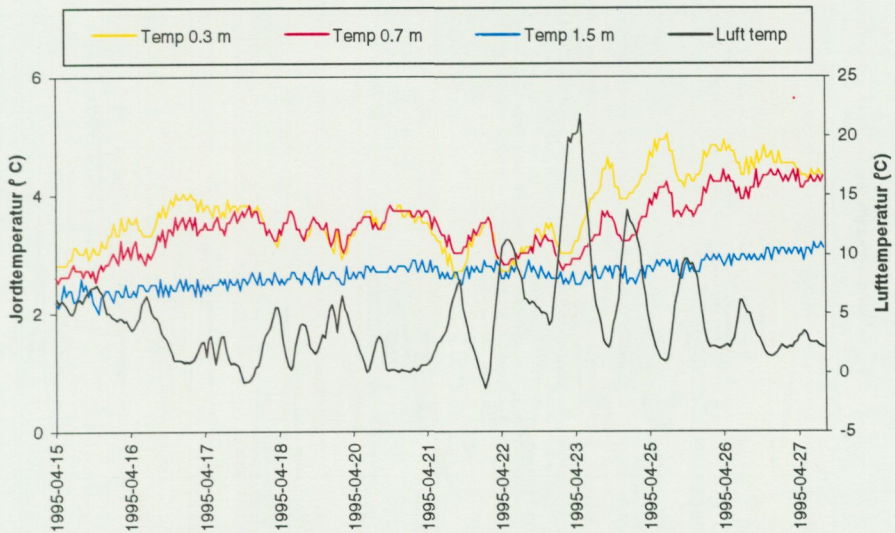
10 a. Radonhalt och nederbörd. Vid ytterligare nederbörd i en jord nära vattenmättnad sjunker den mätbara radonhalten till nära noll.

10 b. Lufttrycksförändringen har här enbart ett skenbart samband med radonhalten.

## 10 c. Börje - radon och jordtemperatur 15 - 27 april 1995

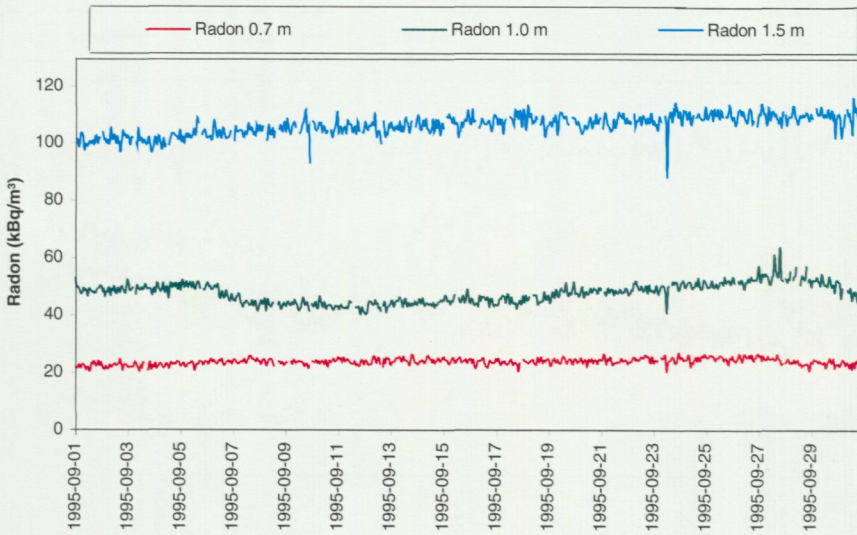


## 10 d. Börje - temperatur i jord och luft 15 - 27 april 1995

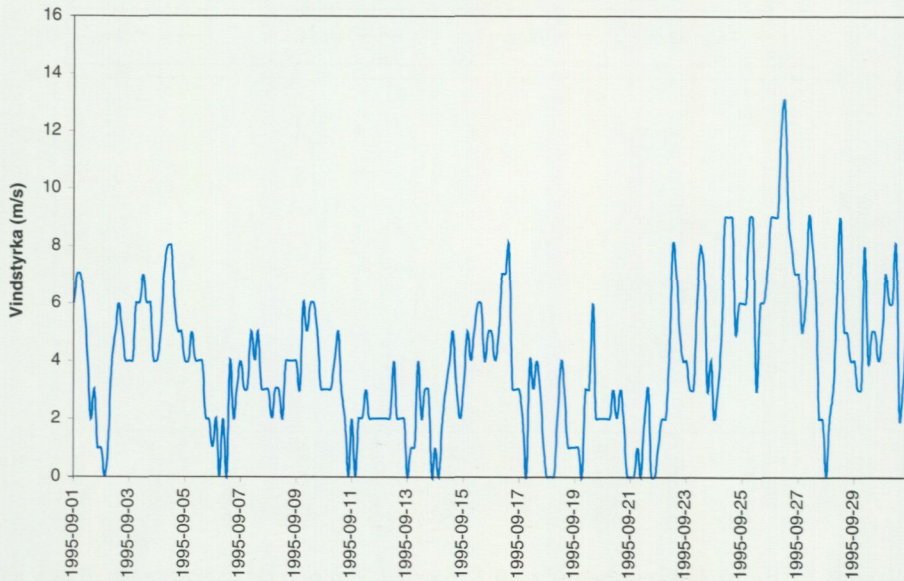


Bilaga B. 10 c - 10 d. Radonhalter på 0,7 m och 1,5 m och temperatur i jord och luft under två veckor i april 1995. De stora dygnsvariationerna i lufttemperaturer återspeglas i förändringarna av jordtemperaturen. Ev. finns även en påverkan på radonhalten på 1,5 m djup.

## II a. Börje – radon september 1995

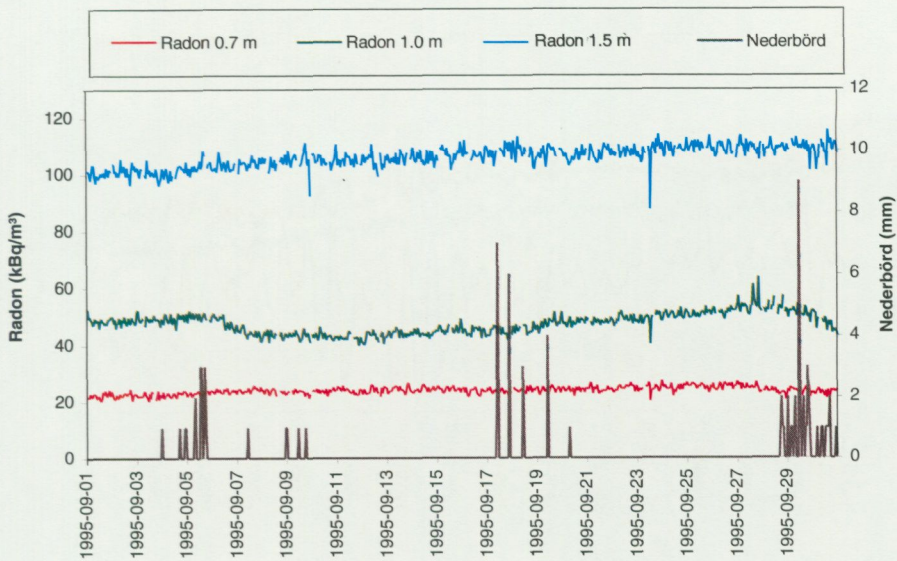


## II b. Börje – vindstyrka september 1995

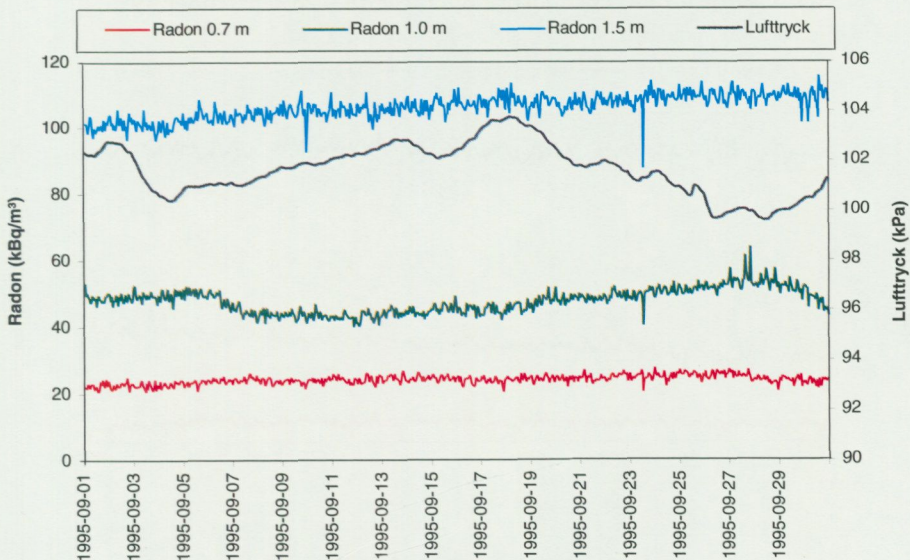


**Bilaga B. II. Radonhalter på tre mätdjup och vindstyrka under september 1995.  
Ingen förändring i radonhalter kan utläsas vid hög vindstyrka.**

## II c. Börje – radon och nederbörd september 1995

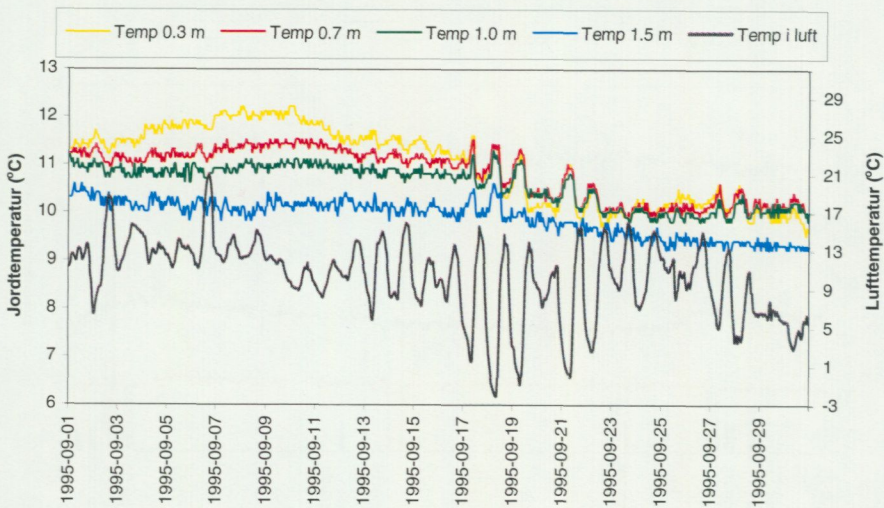


## II c. Börje – radon och lufttryck september 1995

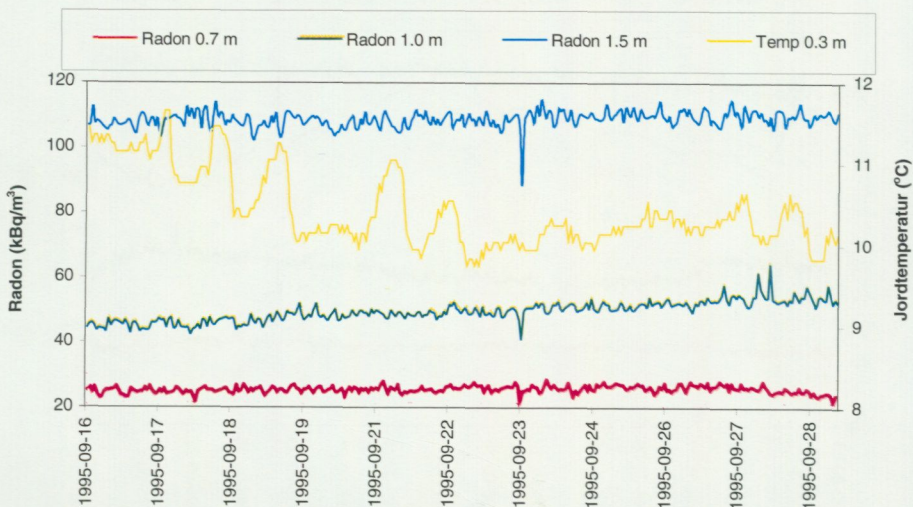


**Bilaga B. II c - II d. Radonhalter på tre mätdjup, nederbörd och lufttryck under september 1995. Radonhalten minskar på 1.0 m i samband med hög nederbörd. Radonhalterna synes inte påverkas av förändringar i lufttrycket.**

## 12 a. Börje – temperatur i jord och i luft september 1995



## 12 b. Börje – radon och jordtemperatur 16 – 28 september 1995

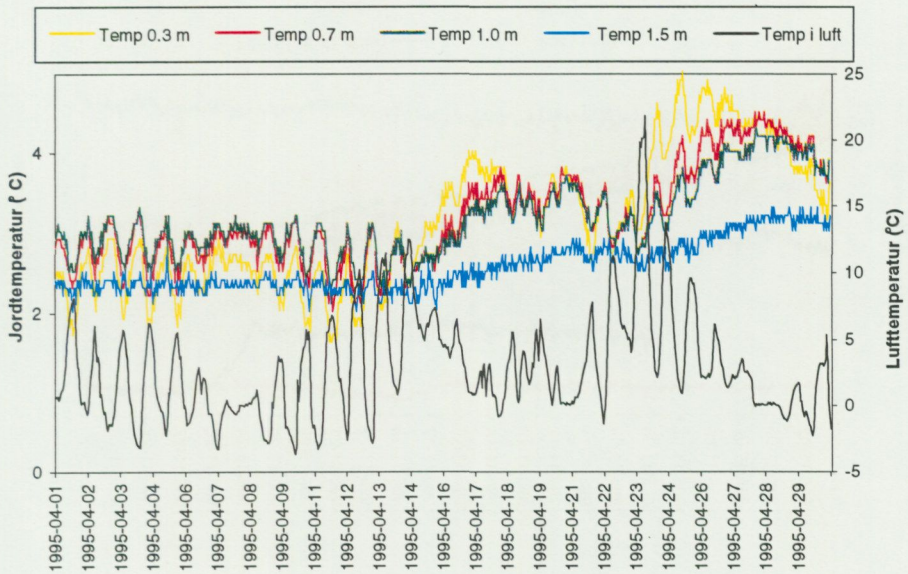


**Bilaga B. 12. Dygnsvariationer i lufttemperatur påverkar jordtemperaturen dygnsvis men någon påverkan på radonhalten i jordluften kan inte ses.**

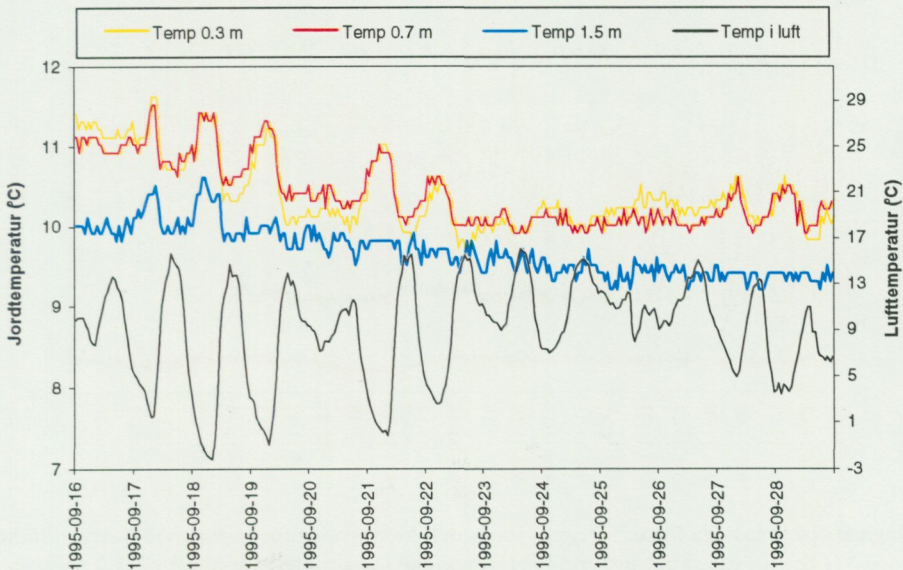
**12 a. Temperatur i jord på fyra nivåer och lufttemperatur under september 1995.**

**12 b. Radonhalter i jordluften på tre djup och jordtemperatur på 0.3 m under 10 dagar i september 1995.**

## 13 a. Börje – temperatur i jord och luft april 1995

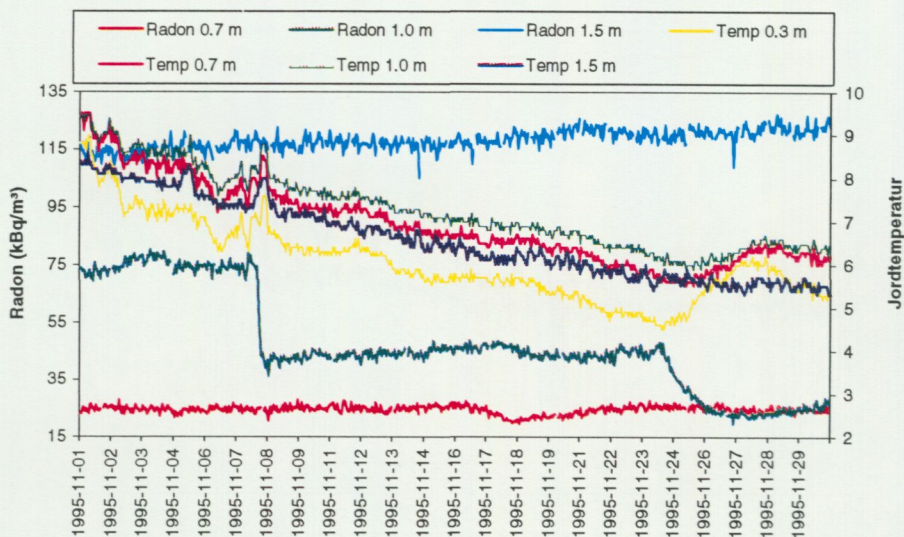


## 13 b. Börje temperatur i jord och luft 16 – 28 september 1995

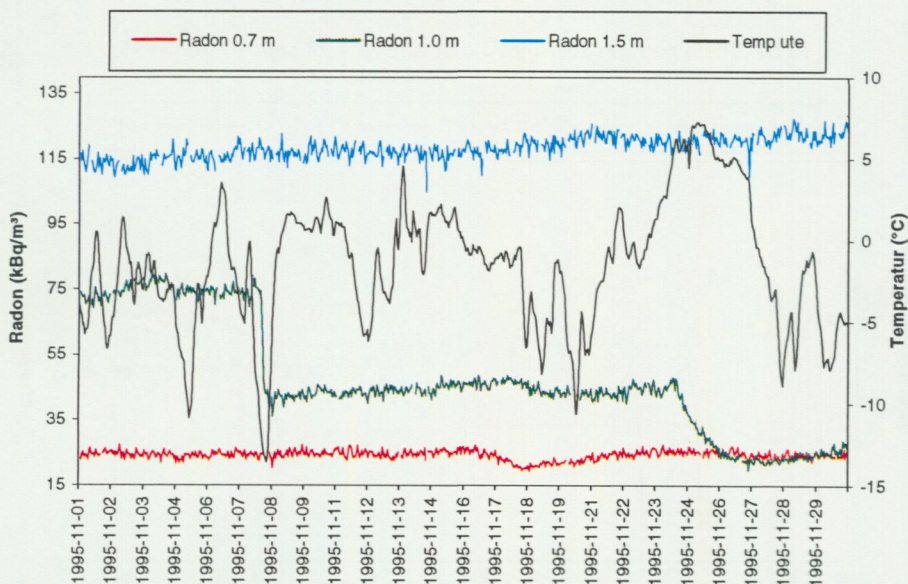


**Bilaga B. 13. Temperatur i jord och luft i april och 16 - 28 september 1995.**  
 Dygnsvariationerna i lufttemperaturen påverkar jordtemperaturen  
 ända ned till 1,5 m.

## 14 a. Börje - radon och jordtemperatur november 1995



## 14 b. Börje - radon och lufttemperatur november 1995



**Bilaga B. 14. Hastiga förändringar i jord- och lufttemperatur synes vid detta tillfälle ha ett samband med förändringar i uppmätt radonhalt på 1,0 meters djup, andra orsaker diskuteras i texten.**

**14 a. Radonhalter på tre mätdjup och jordtemperatur på fyra mätdjup, november 1995.**

**14 b. Radonhalter på tre mätdjup och lufttemperatur, november 1995.**

## Bilaga C - Statistisk undersökning

## STATISTISK UNDERSÖKNING

### *Förklaring till diagrammen från "Dem Reg"*

Vid en körning av "Dem Reg" erhålls en skärmbild som i Bilaga C:2. Diagrammet består av två fönster, markerade (A) och (B). I fönster (A) ser man de två tidserier som man undersöker. Det är den övre kurvan (1) och den nedersta kurvan (2), radon 1,5 m djup respektive lufttryck i det här fallet. De mellersta kurvorna (3), kallade "Fitted", är den övre tidserien (1) presenterad på en kurvanpassning av tidserierna. De tunna kurvorna på var sida om (3) är 95 % konfidensintervall.

Fönster (B) består av två delar. I den övre delen kan man se hur väl de två tidserierna korrelerar. Om den streck-prickade kurvan (koherenskurvan) är högt över den streckade linjen (5 % signifikansnivån) är korrelationen statistiskt säkerställd. Lägg märke till att fönster (B) har samma tidsaxel som fönster (A) vilket gör att man kan se om korrelationen är bra under en längre tid. I den nedre delen av fönster (B) kan det till vänster antingen stå "PHASE" eller "GAIN". I det här fallet står det "PHASE". Står det "PHASE" ser man fasförskjutningen mellan tidserierna, graderad från 0° till 360°. Står det "GAIN" ser man amplitudförhållandet mellan tidserierna (kvoten mellan respektive parameters amplitud). Både "PHASE" och "GAIN" är omgivna av 95 % konfidensintervall.

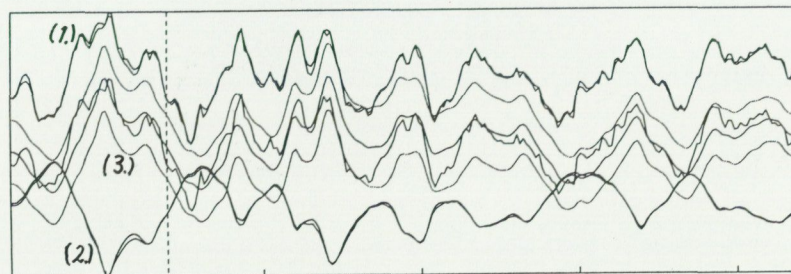
# DEMREG 0-PHASE

(A)

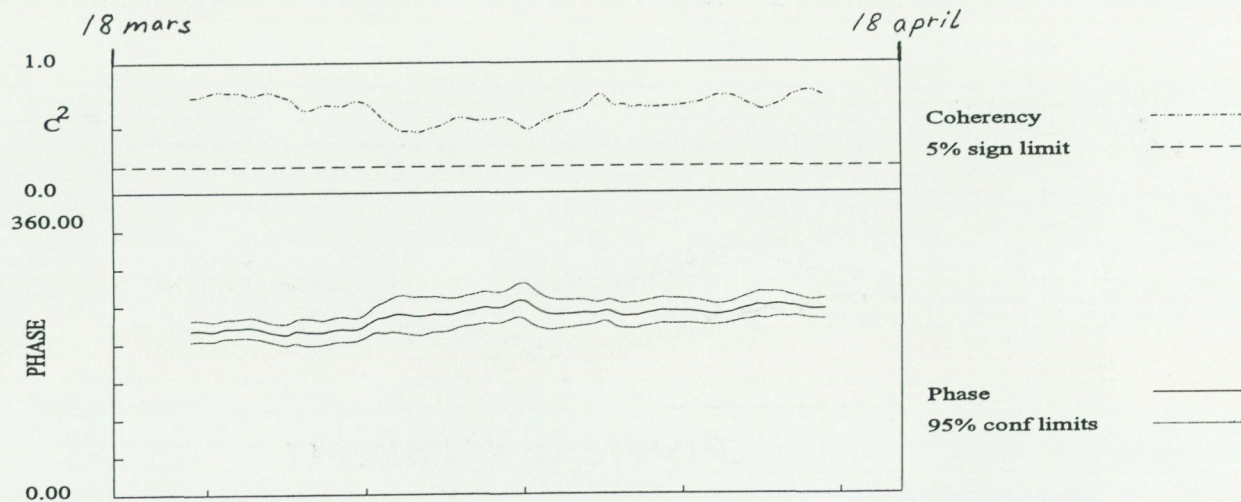
RADON 1.5

Fitted

LUFTRYCK



(B)



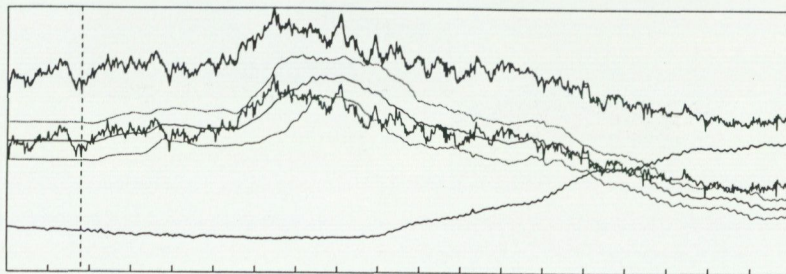
# DEMREG 0-PHASE

(A)

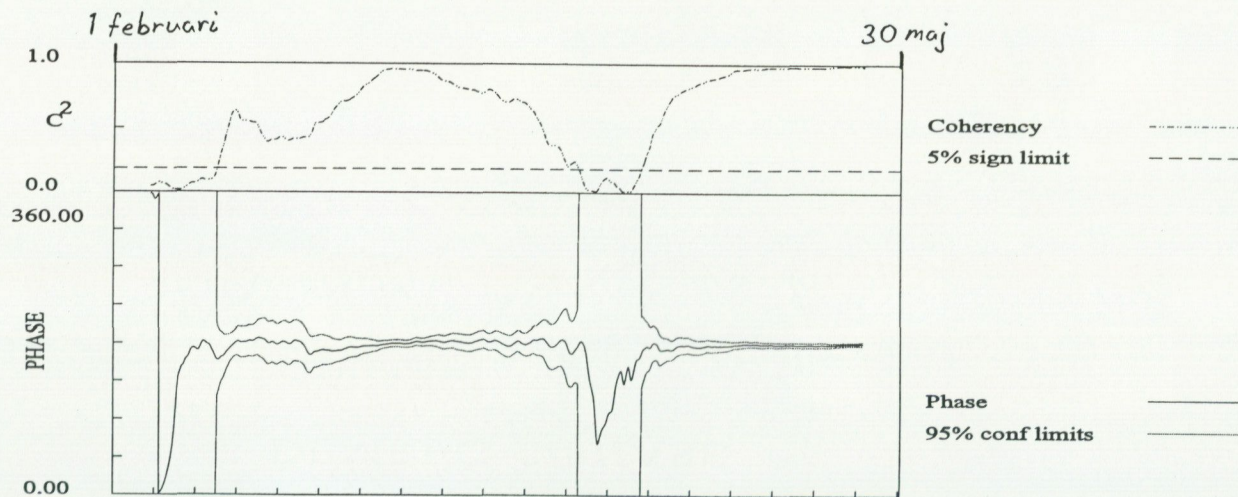
RADON 1.0

Fitted

JORDTEMP 1.0

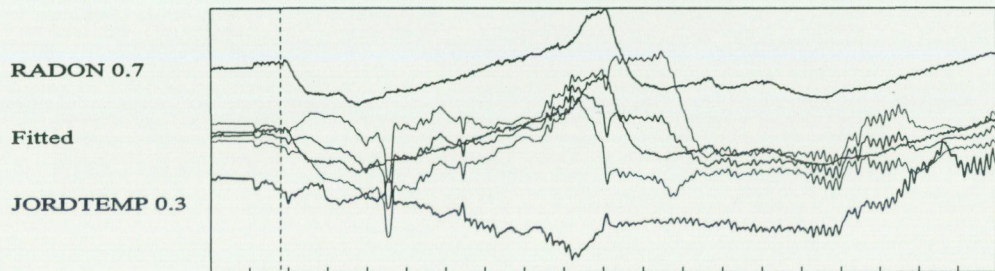


(B)

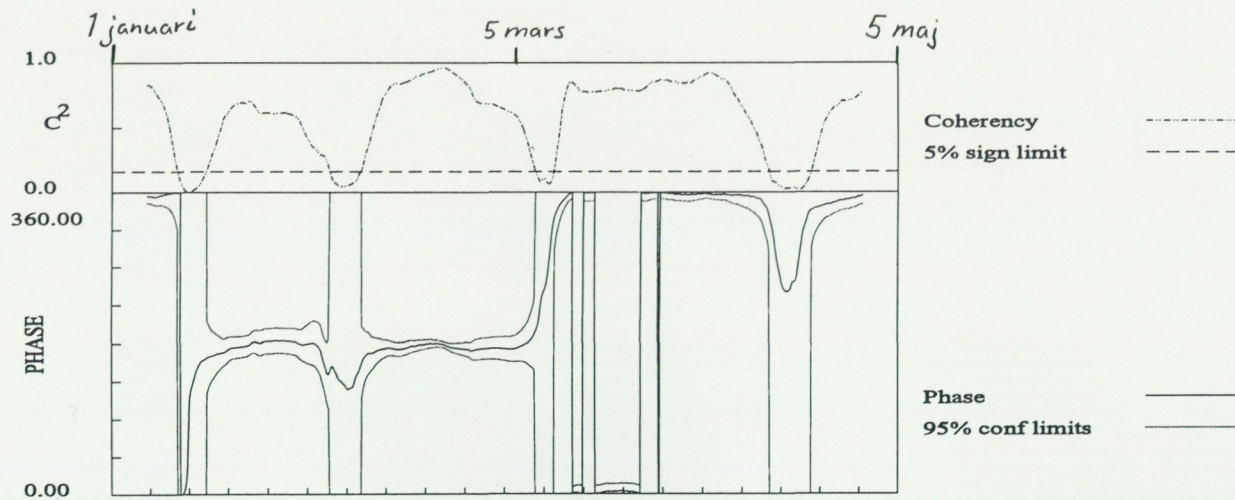


# DEMREG 0-PHASE

(A)



(B)





## Bilaga D - Fotobilaga



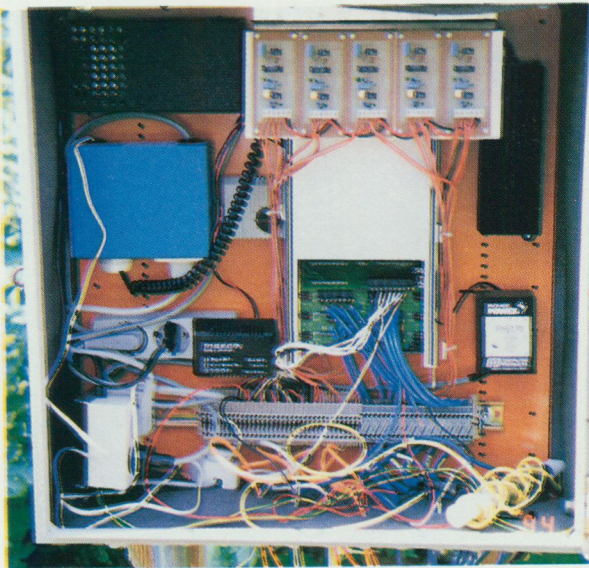
SLAKA  
Nedlagd grustäkt ca 250 m  
sydväst om mätstation  
Slaka.  
1993-06-16



SLAKA  
Grustäkten med  
moräninslag.  
1993-06-16



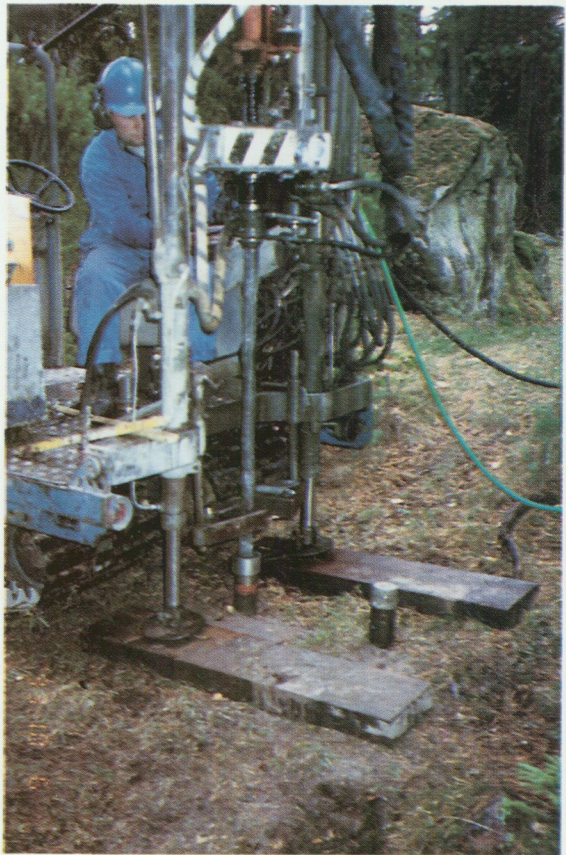
SLAKA  
Material från provgröp.  
1993-06-16



SLAKA  
Mätskåp med datalogger i  
mitten och diverse övrig  
utrustning för insamling  
och överföring av mätdata.



BÖRJE  
Uppschaktat material  
från närbelägen täkt.



BÖRJE  
Installation av skyddsror för  
instrument/givare.



BÖRJE  
Mätplatsen med färdig-  
monterade skyddsror.



BÖRJE  
Alphameter 400 upptagen för  
kontroll av mätförhållandena.

## I SGUs serie Rapporter och meddelanden har hittills utgivits:

- \* 1. Utredning rörande det svenska jordbrukets kalkförsörjning 1-2. 1931.
- \* 2. **Sahlström, K.E.** Sveriges lodade sjöar. 1945.
- \* 3. **Ödman, O.H.** Rapport över manganmalmsletningen i Jokkmokks socken 1940-48.
4. **Stålhös, G.** Bidrag till kännedomen om den radioaktiva strålningens fördelning inom den svenska berggrunden. 1959.
5. **Johansson, H.G. och Ericsson, B.** Grusutredningen -74. Översiktlig inventering av sand- och grusförekomster - Försöksverksamhet. 1976.
6. **Knutsson, G., m.fl.** Grustillgångarna i Östersundsområdet. Del 1 inventering. 1976.
7. **Ericsson, B.** Svallgrustillgångar längs Kilsbergen, Örebro län. 1977.
8. **Gustafsson, O. och De Geer, J.** Skånes större grundvattentillgångar. 1977.
9. **Knutsson, G. och Fagerlind, T.** Grundvattentillgångar i Sverige. 1977.
10. **Modig, S., Knutsson, G., Nordberg, L. och Persson, G.** Särtryck ur Ymer 1978 - Bebyggelsen och vattnet. 1978.
11. **Guy-Ohlson, D.** Jurassic biostratigraphy of three borings in NW Scania. (A brief palynological report.) 1978.
12. **Gustafsson, O., Andersson, J.-E. och De Geer, J.** Sammanställning av hydrogeologiska data från Kristianstadsslätten. 1979.
13. **Hörnsten, Å.** Sand och övriga jordarter i Öresund. Maringeologiska kartor över Öresund. 1979.
- \* 14. Hydrogeologi vid SGU. Särutgåva av Vannet i Norden. 1979.
15. **Knutsson, G., Lindén, A. och Rudmark, L.** Grus- och moräntillgångar i Nyboregionen. 1979.
16. **Wilson, M.R. och Sundin, N.O.** Isotopic age determinations on rocks and minerals from Sweden. 1960-1978.
17. **Karlqvist, L. och Qvarfort, U.** Modell för simulering av utbytesförlopp i ett sandbentonitiskt. 1980.
18. **Karlqvist, L. och Qvarfort, U.** Gruvhanterings inverkan på Bersboområdet, Åtvidabergs kommun. 1980.
19. **Wilson, M.R. and Åkerblom, G.** Uranium enriched granites in Sweden. 1980.
- \* 20. **Cato, I och Engdahl, M.** Beskrivning till tematkartor utvisande var särskild uppmärksamhet av stabilitetsförhållanden erfordras inom vissa bebyggda eller detaljplanerade områden med lerjord. 1982.
21. **Olsson, T.** Ground-water-level fluctuations as a measure of the effective porosity and ground-water recharge. 1980.
22. **Bergström, J. och Shaikh, N.A.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Kristianstads län. Projekt i länsplanering 1980. 1980.
23. **Lilja, A.** Störning av berggrundens temperaturförhållanden vid hammarborrning. 1981.
24. **Agrell, H.** Gotska Sandöns kvartärgeologi. (Summary: The Quaternary geology of the island of Gotska Sandön in the Baltic.) 1981.
25. **Laufeld, S. (Ed.).** Proceedings of Project Ecostratigraphy Plenary Meeting, Gotland, 1981. 1981.
26. **Fredén, C., m.fl.** Tuveskredet, 1977-11-30. Geologiska undersökningar. Särtryck av SGI Rapp. 11 B. 1981.
27. SWIM 81. Intruded and relict groundwater of marine origin. Proceedings of Seventh Salt Water Intrusion Meeting, Uppsala, Sweden, 14-17 September 1981. 1981.
28. **Aastrup, M., Aneblom, T., Henriksson, B. och Persson, G.** PMK-grundvatten. Lägesrapport mars 1982. 1982.
29. Energigeologi. Exempel på verksamhet inom energisektorn vid SGU. April 1982.
30. **Åkerblom, G. and Wilson, C.** Radon - geological aspects of an environmental problem. 1982.
31. **Bergström, J. och Shaikh, N.A.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Malmöhus län. 1982.
32. **Ericsson, B. och Grånäs, K.** SGU:s grusdataarkiv. 1983.

33. **Sivhed, U.** Upper Cretaceous Ostracodes from the Malen Limestone quarry and the river Stensån, southern Sweden. 1983.
34. Berggrundsgeokemi som prospekteringsmetod i Sveriges urberg. Föredrag och inlägg från ett symposium i Uppsala den 17–18 mars 1983 anordnat av Sveriges geologiska undersökning och Svenska Gruvföreningen. O. Selinus (Red.). 1983. Vanadin. 1984.
37. **Andersson, M. och Ohlsson, S.-Å.** Geokemisk kartering. 1984.
38. **Lundqvist, Th.** Färg- och teckenschema för SGU:s berggrundskartering. 1984.
39. **Lindewald, H.** Salt grundvatten i Sverige. 1985.
40. **Guy-Ohlson, D. and Malmquist, E.** Lower Jurassic biostratigraphy of the Oppegård Bore No. 1, NW Scania, Sweden. 1985.
41. **Andersson, M.** Geokemisk kartering. Tungmineralanrikad morän. Kartbladen 15–16, C–D och 16–17, G. 1985.
42. **Ressar, H. och Ohlsson, S.-Å.** Geokemisk kartering. Bäcktorv. Bilaga: Beskrivning av de fjorton spårelementens exogena geokemiska kretslopp av John Ek. 1985.
43. Grundvattennätet. Svenskt vattenarkiv. 1985.
44. Grundvattenkvalitet. Svenskt vattenarkiv. 1985.
45. **Shaikh, N.A., Samuelsson, L., Sundberg, A. och Wik, N.-G.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Älvsborgs län. 1986.
46. **Fredén, C.** Quaternary marine shell deposits in the region of Uddevalla and Lake Vänern. 1986.
47. **Ahlberg, O.** Den svenska kontinentalsockelns berggrund. 1986.
48. **Ressar, H., Ohlsson, S.-Å. och Ekelund, L.** Geokemiska kartan. Tungmetaller i Bäcktorv. Översiktskartbladen Kalmar, Oskarshamn, Sundsvall och Vilhelmina. 1986.
49. **Ressar, H., Ohlsson, S.-Å. och Ekelund, L.** Geokemiska kartan. Tungmetaller i Bäcktorv. Översiktskartbladen Malmö och Sundsvall. 1987.
50. **Shaikh, N.A., Persson, L., Sundberg, A. och Wik, N.-G.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Jönköpings län. 1989.
51. **Ressar, H., Ekelund, L. och Ohlsson, S.-Å.** Biogeokemiska kartan. Tungmetaller i Bäckvattenväxter. Översiktsbladen Göteborg och Borås. 1988.
52. **Gustafsson, O., Jonasson, S.A. och Andersson, C.** Grundvattenundersökningar på Kristianstadsslätten 1976–1987. 1988.
53. **Andersson, M.** Markgeokemiska kartan 18–22, G–I. 1988.
54. **Shaikh, N.A., Karis, L., Kumpulainen, R., Sundberg, A. och Wik, N.-G.** Kalksten och dolomit i Sverige. Del 1. Norra Sverige. 1989.
55. **Shaikh, N.A., Karis, L., Snäll, S., Sundberg, A., och N.-G. Wik.** Kalksten och dolomit i Sverige. Del 2. Mellersta Sverige. 1989.
56. **Shaikh, N.A., Bruun, Å., Karis, L., Kjellström, G., Sivhed, U., Sundberg, A. och Wik, N.-G.** Kalksten och dolomit i Sverige. Del 3. Södra Sverige. 1990.
57. **Modig, H., Miller, U. och Robertsson, A.-M.** Karbonat i jord. Del 4. Förurning i äldre sedimentlagerföljder med anknytning till och i jämförelse med nutid. 1990.
59. **Andersson, M.** Markgeokemiska kartan 16–18., G–I. 1989.
60. **Ressar, H., Ekelund, L. och Ohlsson, S.-Å.** Biogeokemiska kartan 14–16, G–H. Tungmetaller i bäckvattenväxter. 1990.
61. **Kornfält, K.-A., Samuelsson, L., Sundberg, A., Wik, N.-G. och Wikman, H.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Kronobergs län. 1990.
62. **Andersson, M.** Markgeokemiska kartan 18–21, H–J. 1990.
63. **Ressar, H., Ekelund, L. och Ohlsson, S.-Å.** Biogeokemiska kartan 8–10, A–D. Tungmetaller i bäckvattenväxter. 1990.
64. **Cato, I.** Sedimentundersökningar i Brofjorden särskilt Trommekilen 1989, samt förändringar efter 1972 och 1984. 1990.
65. **Bruun, Å., Kornfält, K.-A., Sundberg, A., Wik, N.-G., Wikman, H. och Wikström, A.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Kalmar län. 1991.
66. **Frietsch, R., Sundberg, A. och Wik, N.-G.** Register över svenska fyndigheter av malmmineral och industriella mineral och bergarter. 1991.
67. **Robertsson, A.-M.** Strandförskjutningar i Eskilstunatrakten för ca 9000 till 4000 år sedan. 1991.

68. **Ressar, H., Ekelund, L. och Ohlsson, S.-Å.** Biogeokemiska kartan 5–7, I–K och 8–10, E–G. Tungmetaller i bäckvattenväxter. 1991.
69. **Selinus, O.** (ed.). 2nd International Symposium on Environmental Chemistry. (Abstracts). 1991.
70. **Andersson, M.** Från Falkenberg till Blomstermåla; nuläge och framtida effekter av syrabelastning. 1992.
71. **Hopsu, V.** Norbergs gruvor på 1960-, 70- och 80-talen. 1992.
72. **Gustafsson, O.** Radonhalten i grundvatten från granitområden i Malmöhus län. 1992.
73. **Andersson, M. och Nilsson, C.A.** Markgeokemiska kartan 3–7, F–H. 1992.
74. **Cato, I.** Sedimentundersökningar längs Bohuskusten 1990 – Göteborgs och Bohus läns kustvattenkontroll. 1992.
75. **Ekelund, L., Nilsson, C.-A. och Ressar, H.** Biogeokemiska kartan 8–10, G–J och 11–12, H–J. Tungmetaller i bäckvattenväxter. 1993.
76. **Stephens, M.B. och Wahlgren, C.-H.** (Conveners). Workshop. Ductile shear zone in the Swedish segment of the Baltic Shield. Abstracts and excursion guide. Uppsala 1993.
77. **Sander, A.** Värderingsmodell för naturresurser. Tillämpning på ballasttillgångar.
78. **Nilsson, C.-A. och Ressar, H.** Biogeokemiska kartan 11–12, E–H, 12–13, G–J. Tungmetaller i bäckvattenväxter. 1995.
79. **Wahlgren, C.-H. (red.).** Regional berggrundsgeologisk undersökning. Sammanfattning av pågående undersökningar 1994. 1995.
80. **Bruun, Å., Nilsson, C.-A., Sundberg, A., Wik, N.-G. och Wikström, A.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Östergötlands län. 1995.
81. **Andersson, M. och Nilsson, C.-A.** Markgeokemiska kartan 7–9 D–E, 7–9 E–H. 1995.
82. **Kornfält, K.-A., Andersson, M., Daniel, E. och Persson, M.** Kadmium i marken i sydöstra Skåne. 1996.
83. **Robertsson, A.-M., Erlström, M., Damell, D., Qvarfort, U. och Fredriksson, D.** Bakgrundsdata för metaller – surhet och landskapsutveckling från sedimentundersökningar. Sammanställning av data från Örebro. 1996.
84. **Wahlgren, C.-H. (red.).** Regional berggrundsgeologisk undersökning. Sammanfattning av pågående undersökningar 1995. 1996.
85. **Andersson, M. och Lax, K.** Markgeokemiska kartan 20–22, I–L. 1996.
86. **Selinus, O. (red.).** Miljögeologi. Kartor för samhällsplanerare och miljövärdare. Exempel från Mittnordenområdet. 1996.
87. 14th Salt Water Intrusion Meeting. SWIM 96. 1996.
88. **Larsson, J.-O.** Diamanter – en blivande bristvara?. 1997.
89. **Wahlgren, C.-H. (red.).** Regional berggrundsgeologisk undersökning. Sammanställning av pågående undersökningar 1996. 1997.
90. **Holmberg, J. och Ressar, H.** Biogeokemiska kartan. Tungmetaller i bäckvattenväxter. Norra Värmland och Sydvästra Dalarna. 1997.
91. **Andersson, U.B.** Petrogenesis of some Proterozoic granitoid suites and associated basic rocks in Sweden (geochemistry and isotope geology). 1997.
92. **Frietsch, R.** The Iron Ore Inventory Programme 1963–1972 in Norrbotten County. 1997.

\* Utgången



*Distribution*

SGU  
Box 670  
751 28 UPPSALA  
Tel 018-17 90 00  
Fax 018-17 93 70