

DANMARKS OG GRØNLANDS  
GEOLOGISKE UNDERSØGELSE  
RAPPORT 1996/78

# **Radon i danske jordarter II**

## Undersøgelser og konklusioner

Af Peter Gravesen, Peter Roll Jakobsen og  
Niels Kelstrup



GEUS



# **Radon i danske jordarter II**

## **Undersøgelser og konklusioner**

Af Peter Gravesen, Peter Roll Jakobsen og  
Niels Kelstrup



---

# Indhold

---

1. RESUME .....	6
2. INDLEDNING .....	9
3. PROJEKTETS FORMÅL .....	11
4. UNDERSØGELSESMETODER - Oversigt .....	12
4.1. Feltarbejde .....	12
4.2. Laboratoriarbejde .....	12
4.3. Kort .....	13
4.4. Måleenheder m.v. ....	13
5. RESULTATER FRA LOKALITETSUNDERSØGELSERNE .....	15
6. THISTED, THY .....	16
6.1 Lokaltet .....	16
6.2 Boringer og prøver .....	16
6.3 Graverende og prøver .....	19
6.4 Aflejringernes alder .....	22
6.5 Vandindhold og nedbørsforhold. ....	22
6.6 Uran og Thorium indhold .....	23
6.7 Radium indhold .....	25
6.8 Radon emanation .....	25
6.9 Målinger ved Radon-95 .....	27
6.10 SNG-borehulslog .....	27
6.11 Kornstørrelsesanalyser .....	27
6.12 Lermineralogi og specifik overflade .....	29
6.13 Grusindhold .....	30
6.14 Organisk indhold .....	30
6.15 Sammenfatning .....	30
7. ANDRUP, JYLLAND .....	31
7.1 Lokaltet .....	31
7.2 Boringer og prøver .....	31
7.3 Graverende og prøver .....	33
7.4 Aflejringernes alder .....	35
7.5 Vandindhold og nedbørsforhold .....	35
7.6 Uran og thorium indhold .....	35
7.7 Radium indhold .....	37
7.8 Radon emanation .....	37
7.9 SNG-borehulslog .....	39



7.10 Kornstørrelsesanalyser	39
7.11 Lermineralogi og specifik overflade	39
7.12 Grusindhold	41
7.13 Organisk indhold	42
7.14 Sammenfatning	42
8. LUNDEBORG, FYN	43
8.1 Lokalitet	43
8.2 Boringer og prøver	43
8.3 Graverende og prøver	46
8.4 Aflejringernes alder	47
8.5 Vandindhold og nedbørsforhold	47
8.6 Uran og thorium indhold	47
8.7 Radium indhold	49
8.8 Radon emanation	49
8.9 SNG-borehulslog	51
8.10 Kornstørrelsesanalyser	51
8.11 Lermineralogi og specifik overflade	51
8.12 Grusindhold	52
8.13 Organisk indhold	52
8.14 Sammenfatning	52
9. VIBY, SJÆLLAND	54
9.1 Lokalitet	54
9.2 Boringer og prøver	54
9.3 Graverende og prøver	56
9.4 Aflejringernes alder	58
9.5 Vandindhold og nedbørsforhold	58
9.6 Uran og thorium indhold	58
9.7 Radium indhold	60
9.8 Radon emanation	60
9.9 Målinger ved Radon-95	60
9.10 SNG-borehulslog	62
9.11 Kornstørrelsesundersøgelser	62
9.12 Lermineralogi og specifik overflade	63
9.13 Grusindhold	63
9.14 Organisk indhold	64
9.15 Sammenfatning	64
10. NORDBORNHOLM	65
10.1 Allinge -Sandvig	65
10.2 Geologi	65
10.3 Bjergarternes alder	68
10.4 Uran og thorium indhold	68
10.5 Radium indhold	68
10.6 Tejn-Sandkås	70
10.7 Geologi	71
10.8 Bjergarternes alder	71
10.9 Uran og thorium indhold	71
10.10 Radium indhold	71
10.11 Radon forhold	72
10.12 Sammenfatning for begge bornholmske lokaliteter	72



11. DISKUSSION .....	73
11.1 Betingelser for radon emanation og transport .....	73
11.2 Uran, radium og radon .....	73
11.3 Bjergarterne: Dannelse, mineralogi og geokemi .....	78
11.3.1 Postglacial muld og udfældningshorisonter .....	80
11.3.2 Glaciale morænejordarter .....	84
11.3.3 Daniens slamkalk .....	93
11.3.4 Hammer og Vang Graniter fra Prækambrium. ....	96
11.3.5 Kortlægning og feltarbejde .....	100
12. KONKLUSION .....	101
13. FORSLAG TIL VIDERE ARBEJDE .....	104
14. TAK .....	105
15. REFERENCELISTE .....	106
BILAG A. METODER OG RESULTATER .....	114
BILAG B. BOREPROFILER OG SNG-LOGS .....	126
BILAG C. PRØVER OG ANALYSEOVERSIGT .....	127



---

# 1. RESUME

---

Projektets formål har været at belyse de naturlige radonforhold i en række jordarter, som har betydning for hvor megen radon, der kan transporteres ind i bygninger.

Dette er sket ved at beskrive forholdene omkring radons oprindelse i danske jordarter bl.a. ved at sammenholde jordarterens oprindelse og alder med deres sammensætning samt ved at vurdere radon/oprindelses-materialets afhængighed af redoxforholdene. Radons mulige transportveje i jordlagene enten i luft eller vand er beskrevet, herunder den umættede zones betydning for transport og omsætning. Studiet er et metodestudie, der skal foreskrive metoder, der også kan anvendes på andre lokaliteter.

Der er undersøgt fem lokaliteter: Thisted, Andrup, Lundeborg, Viby og Nordbornholm. Lokaliteterne er blevet udvalgt efter geologiske kriterier samt efter kendskabet til radon niveauer i huse beliggende ved lokaliteterne.

På hver lokalitet er der udført geologiske undersøgelser, boret fire lagfølgeboringer, boret en SNG-logboring og udgravet en rende i jordlagene til ca. 2 meters dybde. Der er blevet udtaget prøver til at beskrive de geologiske og de geokemiske parametre, og der blevet målt og registreret en række egenskaber ved jordlagene.

Jordarternes sammensætning er blevet bestemt ved laboratorieanalyser, og der er blevet målt indhold af uran og radium samt radon emanations rater. En række supplerende fysiske og kemiske parametre har medvirket til at karakterisere jordarterne og til at fastslå deres geologiske alder og placering.

Hovedkonklusioner for undersøgelsen er følgende:

1. Sammenhængen mellem indhold af uran og radium samt radon emanations rater sat i relation til moræneaflejringerens alder viser en variation, der afspejler alderforholdene. I det uforvitrede, reducerede moræneler, som repræsenterer det oprindeligt aflejrede ler, er der generelt det laveste radiumindhold i de ældste lag ved Andrup (130.000 år gamle) og Lundeborg (60.000 år gamle) og det højeste indhold i det yngste ved Viby (15.000 år gamle). For radon emanations raterne er den aldersmæssige forskel også tilstede med 3,2



atomer/(s\*kg) ved Andrup, 4,5 atomer/(s\*kg) ved Lundeborg og 5,3 atomer/(s\*kg) ved Viby. Årsagen hertil er den kemiske sammensætning af det tilgængelige erosionsmateriale, der indgår i morænelerene, men også henfald af radium (halveringstid 1600 år) har betydning, når der er tale om aflejringer af så forskellig alder. I de forvitrede, oxiderede morænelag er fordelingen knapt så udtalt, idet der i denne horisont spiller en række processer ind, som har påvirket aflejringerne efter deres dannelse og frem til idag.

2. Det har vist sig, at der er en væsentlig forskel i radon emanations rater mellem i de forskellige redox zoner og forvittringshorisonter i morænelersaflejringerne. I den forvitrede, oxiderede zone ligger værdierne langt højere end i den uforvitrede, reducerede zone for de samme enheder, d.v.s af samme alder og sammensætning. De fysiske og kemiske processer, der har præget de øverste aflejringer siden deres dannelse, har således medvirket til at åbne op for exponering af radium på leroverfladerne i moræneleret og skabe transportmuligheder for radon.

3. De klare relationer mellem alder og redox forhold, hvor de afledede parametre beskriver aflejringerens sammensætning og struktur, giver et billede af niveauer for radon emanations raterne i moræneaflejringer. Det giver baggrund og mulighed for at udforme et radon risikokort. Metoden udgør således et "indikatorværktøj" selv om der kun ved målinger kan konstateres, hvad den konkrete radon emanation er.

4. Muldaflejringerne har i mange tilfælde lige så høje værdier som moræneaflejringerne, og det er betinget af urans og radiums absorption på planteresterne samt de relativt højpermable forhold, der hersker i disse øvre jordlag.

5. Radonforholdene i kalkbjergarterne er vanskelige at forklare, bl.a. fordi der er målt høje værdier i huse på kalk ved Thisted selv om radon emanations raterne (og uran og radium indholdet) er meget lave i selve kalken. I de tilfælde hvor kalken overlejres af muld og/eller moræneaflejringer, vil disse jordarter ligesom i det øvrige land være radonkilde. Hvis der ikke er andre aflejringer over kalken, viser nærværende undersøgelser, at Tertiært ler med stor specifik overflade og organisk indhold beliggende i sprækker og gruber i kalken kan have meget høje rater og dermed være en væsentlig radon kilde.

6. Bornholmsk granit er en radon kilde i sig selv på grund af det høje radium indhold, der er påvist ved denne og andre undersøgelser. Desuden indeholder jordluft og indeluft store radon mængder. Radon emaneres både fra rene granitflader og fra forvitret granit i f.eks. sprækker, og der sker måske især en øget mulighed for radon emanation gennem forvitringen.



7. Undersøgelsermetodikken med en kombination af feltundersøgelser (boringer og gravninger), laboratorieundersøgelser (kemi, mineralogi, tekstur) og aldersbestemmelse i horisontal og vertikal retning ser ud til at give nye muligheder for at forklare radons optræden i jordlagene.

8. Anvendelse af metodikken har ført frem til at vise, at både alder og lagrelationer, forvitring og redoxforhold har betydning i morænejordarter. Anvendelse af metodikken har desuden hjulpet til at give en forklaring på radons optræden i kalk og har bestemt radons niveauer i muld. Især har udgravningerne kunne angive mere præcist, hvordan lagrelationerne er, og hvorfor radon kan genereres fra disse lag.

9. Metodikken med at vælge aflejringer af kendt alder med en regional udstrækning og undersøge dens radon emanations rater giver grundlaget til at tolke forholdene på landsbasis. Den geografiske fordeling af forskellige jordarter kan dermed sættes i relation til variationen i radonniveauerne i Danmark.

En række jordarts-radonforhold skal endnu belyses, hvoraf der især skal peges på redoxzonernes betydning i moræneaflejringer og andre istidsaflejringer. Desuden vil en supplerende undersøgelse af alderens betydning være vigtig også set i relation til de mange ældre aflejringstyper der findes. Endelig vil udarbejdelse af radon risikokort på landsbasis baseret på både kendskab til radonforhold i jordarterne og radonniveauer i indeluften være et centralt element i en undersøgelse. Et radon risikokort vil kunne bidrage til vurdering af exponeringsrisikoen i Danmark og herunder om visse egne er særligt exponerede for radonpåvirkning.



---

## 2. INDLEDNING

---

Radon fra naturligt forekommende jordarter påvirker befolkningens helbred. Hidtidige undersøgelser i Danmark har vist, at en mindre del af befolkningen får doser større end 50 Bq/m<sup>3</sup> (Sundhedsstyrelsen, 1987a, Bertollini et al., 1996), mens der f.eks. i andre europæiske lande og i USA er væsentlig højere radon niveauer i jordarter og huse. Det er vurderet, at mere end 2 millioner mennesker i Europa har en forøget risiko for radon påvirkning, og at ca. 10.000 lungecancer tilfælde skyldes radon og dets datterprodukter (Stanners & Bourdeau, 1995). WHO (1994) angiver, at værdier over 200 Bq/m<sup>3</sup> må antages at påvirke helbredet.

Sundhedsstyrelsen (1987a) antager, at ca. 10 % af alle tilfælde af lungecancer i Danmark skyldes radonpåvirkning, mens en undersøgelse i Sverige viser, at ca. 15 % af tilfældene skyldes radon (Perschagen et al., 1993). Radons betydning for sundheden er nærmere beskrevet af overlæge Mark Krasnik, Gentofte amtssygehus i Gravesen (1996a).

Relativt høje radonniveauer i bygninger vil således i nogle områder i Danmark være et samfundsmæssigt problem. Årsagerne til de høje radonværdier er ikke tilstrækkeligt belyst, og dette skyldes bl.a., at hidtidige undersøgelser ikke har givet et mere præcist svar på radons naturlige, geografiske variation og styrke i Danmark (Sundhedsstyrelsen, 1987b, Hansen, Krasnik & Gravesen, 1994).

De naturlige radonniveauer i en række udvalgte danske jordarter er blevet undersøgt af Damkjær & Korsbech (1985) og Korsbech (1985), mens Majborn et al. (1988) har undersøgt radonforholdene i moræneler omkring Risø. Majborn (1992) har ved en undersøgelse på Midtsjælland vurderet radonforholdene i smeltevandssand, og Damkjær & Korsbech (1988) har undersøgt radonindhold i Danien kalk, Palæocæn ler og moræneler på Mors. Desuden er vurderinger af de geologiske forhold foretaget indirekte ved en større undersøgelse udført af Sundhedsstyrelsen (1987b). Der er også udført undersøgelser af radons transportforhold fra jordlagene udenom bygninger og videre ind i bygningerne (Andersen, 1992, Andersen et al., 1992, 1994) og diffusionstransporten i jordprøver er undersøgt i laboratoriet (Søgaard-Hansen & Damkjær, 1987).

Radons geologiske optræden er derudover undersøgt i mange andre lande (f.eks. Ball & Miles, 1993, Ball et al., 1991, Gates, Malizzi & Driscoll III, 1992, Gundersen et al., 1992). En



del af disse resultater kan overføres på danske forhold, f.eks. når der er tale om jordarter, der er dannet på samme måde (ensartet dannelsesmekanisme) og som har samme type strukturer (dannet ved samme fysiske processer), mens deres sammensætning med hensyn til mineralogi m.v. er mere betinget af deres oprindelse og af de lokale forhold.

Radonforholdene i Danmark er således ikke hidtil undersøgt ud fra en opfattelse af, at de geografiske og geologiske forhold i landet er styrende for den lokale og regionale fordeling. De geologiske aflejringer er af særdeles varierende sammensætning og af forskellig alder både i overfladen og nedad i de dybere lag, og deres lejringsforhold vil have stor betydning for radoniveauerne.

Undersøgelser af radonniveauer i danske jordarter samt viden om transport af radon gennem jordlagenes porer til bygninger er af stor betydning for en bedømmelse af risikoen for høje værdier i bygninger i forskellige dele af Danmark. Ud fra vurdering af forholdene i mindre områder som sættes i relation til de danske jordarters aldre og oprindelse, vil der på længere sigt være muligheder for at kunne bedømme radonforholdene for hele landet.

Der er derfor gennem denne undersøgelse, finansieret af Sundhedsministeriet, afprøvet metoder til at bestemme relationerne mellem jordarternes oprindelse, alder, indhold af radon, mineralogi og transportforhold (Gravesen & Krasnik, 1994).

Nærværende rapport gennemgår resultaterne, som er opnået og foreligger ved undersøgelsens afslutning i 1996, og den giver de endelige konklusioner ud fra resultaterne. En mere udbygget gennemgang af baggrunden for undersøgelsen, en beskrivelse af de geologiske forhold og udvælgelseskræterier for områderne m.v. kan findes i rapporten: "Radon i danske jordarter. I" (Gravesen, 1996a).



---

### 3. PROJEKTETS FORMÅL

---

Det har været projektets mål at belyse de naturlige radonforhold i en række jordarter, som har betydning for, hvor megen radon der kan genereres i, omkring og under bygninger og dermed transporteres ind bygninger (Gravesen & Krasnik, 1994). Dette er sket ved:

- at beskrive forholdene omkring radons oprindelse i danske jordarter bl.a. ved af sammenholde jordarterens oprindelse og alder med deres sammensætning samt vurdere radon/oprindelses-materialets afhængighed af redoxforhold i jordlagene.
- at beskrive radons mulige transportveje i jordlagenes porer enten i luft eller i vand, herunder at studere den umættede zones betydning for radons transport og omsætning. Resultater fra igangværende projekter, der belyser transportforhold i moræneler, er inddraget.



---

## 4. UNDERSØGELSESMETODER - Oversigt

---

En række metoder er anvendt ved undersøgelsen. I afsnittet gives kun en oversigt, mens der i bilag A kan findes mere om metoderne.

### 4.1. Feltarbejde

Feltarbejdet har bestået af en række aktiviteter på områderne omkring de huse, hvor der er målt radon i forbindelse med "Radon-95"-projektet ved Thisted, Viby og Nordbornholm (Risø, 1994, Damkjær et al., 1995 a,b) samt ved Andrup og Lundeberg (Gravesen, 1996a):

1. Den geologiske jordartsfordeling på området er kortlagt.
2. Der er udført 5 korte borer pr. område til ca. 5 meters dybde til udtagning af jordprøver og til understøttelse af kortlægningen af de geologiske forhold. På Bornholm er der dog ikke boret.
3. En boring på hver lokalitet er SNG-logget (Spektral Naturlig Gamma log).
4. Jordarternes strukturer (d.v.s makroporer, sprækker, rodsystemer, ormehuller, sandlegemer m.v. og matrix) er beskrevet i små udgravninger til max. 2 meters dybde, og der er udtaget jordprøver.
5. De meteorologiske forhold i områderne er registreret.

Boreprofiler og logs kan ses i bilag B.

### 4.2. Laboratoriearbejde

Laboratoriearbejdet har omfattet bearbejdning af boreprøver og graveprøver for at bestemme de mineralogiske og kemiske forhold i jordarterne. Disse er sammenholdt med de målte radonværdier. Radonværdier og mineralogi/kemi er sammenholdt med formodet



alder og oprindelse af jordarterne. De udtagne prøver er ikke analyseret for samtlige parametre, men følgende er den totale liste, som er udført:

1. Jordartene er beskrevet geologisk.
2. Der er udført kornstørrelsesanalyser.
3. Den specifikke overflade er målt på lerprøver.
4. Vandindhold i de optagne jordprøver er målt.
5. Mineralogi er bestemt med henblik på at finde mineraler/bjergarter, der kan være oprindelsesmateriale for radon.
6. Der er foretaget kemiske analyser af jordarterne, især af uran (U) og thorium (Th), men også en række andre parametre er blevet målt.
7. Radon emanations rater i jordprøverne er målt.
8. Radiumindhold i jordprøverne er målt.
9. Organisk indhold er målt.
10. Kalkholdighed er bestemt.

En oversigt over prøver og analyser kan ses i bilag C.

#### **4.3. Kort**

Data fra borerne er indlagt i GEUS' boringsdatabase ZEUS (Gravesen & Fredericia, 1984), og de er udtegnede på kort (se Gravesen, 1996a).

#### **4.4. Måleenheder m.v.**

Værdierne for uran (U), thorium (Th), radium (Ra) og radon (Rn) er målt i forskellige enheder. Indholdet af U og Th er ved kemisk analyse målt i ppm ligesom værdierne ved



SNG-loggen er det. I Danmark anvendes enheden bequarel (Bq) for aktiviteten, og radium er målt i Bq/kg. Radon emanations rate målinger er angivet i atomer/(s\*kg). Desuden er radon i jordgas og indendørsluft målt og angivet i Bq/m<sup>3</sup>.

I USA anvendes enheden picocurie (pCi) for aktiviteten, og ved måling i luft eller jord bruges pCi/l eller pCi/g.

Omsætning mellem enhederne er:

#### Europa

$$1 \text{ ppm} = 12,3 \text{ Bq/kg}$$

$$1 \text{ Bq/(s*kg)} = 2,1 \times 10^{-6} \text{ atomer/(s*kg)}$$

#### Europa - USA

$$1 \text{ pCi} = 0,037 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq/m}^3 = 2,7 \times 10^{-2} \text{ pCi/l}$$

$$1 \text{ pCi/l} = 37 \text{ Bq/m}^3$$

$$1 \text{ pCi/g} = 3 \text{ ppm}$$

Korsbech (1985) og Damkjær & Korsbech (1985) har etableret en radon emanations rate klassifikation:

Lav emanations rate når der er mindre en 5 atomer/(s\*kg)

Middel emanations rate når der er mellem 5 og 20 atomer/(s\*kg)

Høj emanations rate når der er mere end 20 atomer/(s\*kg)

Der vil blive refereret til denne klassifikation i de næste afsnit.



---

## 5. RESULTATER FRA LOKALITETSUNDERSØGELSERNE

---

På de fem lokaliteter (fig.1) blev der udført feltarbejde i maj og oktober 1995, mens laboratoriearbejdet startede i juni og blev forsat frem til maj 1996.

Nedenfor følger en gennemgang af resultaterne fra arbejdet.



Fig. 1. Kort med angivelse af lokaliteterne. 1. Thisted, 2. Andrup, 3. Lundeberg, 4. Viby, 5. Nordbornholm.



---

## 6. THISTED, THY

---

### 6.1 Lokaltet

Undersøgelsen er udført på en tom byggegrund (græsmark) beliggende ud mod Sennelsvej og Lindevej, i den østlige udkant af Thisted (fig. 2). Der blev udført fem borer d. 8 maj 1995 og en udgravning d. 9 maj 1995. Boringerne blev lagt i hjørnerne af en kvadrat, mens udgravningen blev placeret mellem bor DGU ark. nr. 30.1002 (T1) og DGU ark. nr. 30.1006 (T5) (fig.3). Terrænet er relativt fladt, og hælder fra kote + 26 m i øst til kote + 25 m mod vest.

### 6.2 Boringer og prøver

Samfundsteknik A/S borede fire 8" snegleboringer (DGU ark. nr. 30.1002 (T1), 30.1003 (T2), 30.1004 (T3), 30.1005 (T4)). Grundvandsspejlet blev ikke nået. Der blev kontinuert udtaget sedimentprøver. Prøverne blev geologisk beskrevet på stedet efter GEUS procedure (Gravesen & Knudsen, 1981, Larsen et al., 1995), og derefter opdelt og hjemtaget til analyse (se bilag A, B og C).

I boringerne er der øverst truffet muld. Derunder er der truffet glacigene aflejringer i form af morænesand og kalkmoræne, som igen overlejrer slamkalk fra Danien tidsafsnittet. Boreprofilerne er vedlagt i bilag B. Et geologisk tværprofil gennem boringerne ses på fig.4. Signaturforklaring til alle tværprofiler (fig. 4, 14, 23, 31) ses på fig. 5.

Aflejringerne kan opdeles i fem lithologiske enheder; det vil sige enheder, der kan adskilles på grund af deres sammensætning og udseende.

Den øverste enhed, der er truffet i boringerne er mørkebrun, sandet muld, som er svagt gruset og svagt kalkholdig eller kalkfri. Tykkelsen af muldlaget varierer fra 0,3 til 0,8 m.



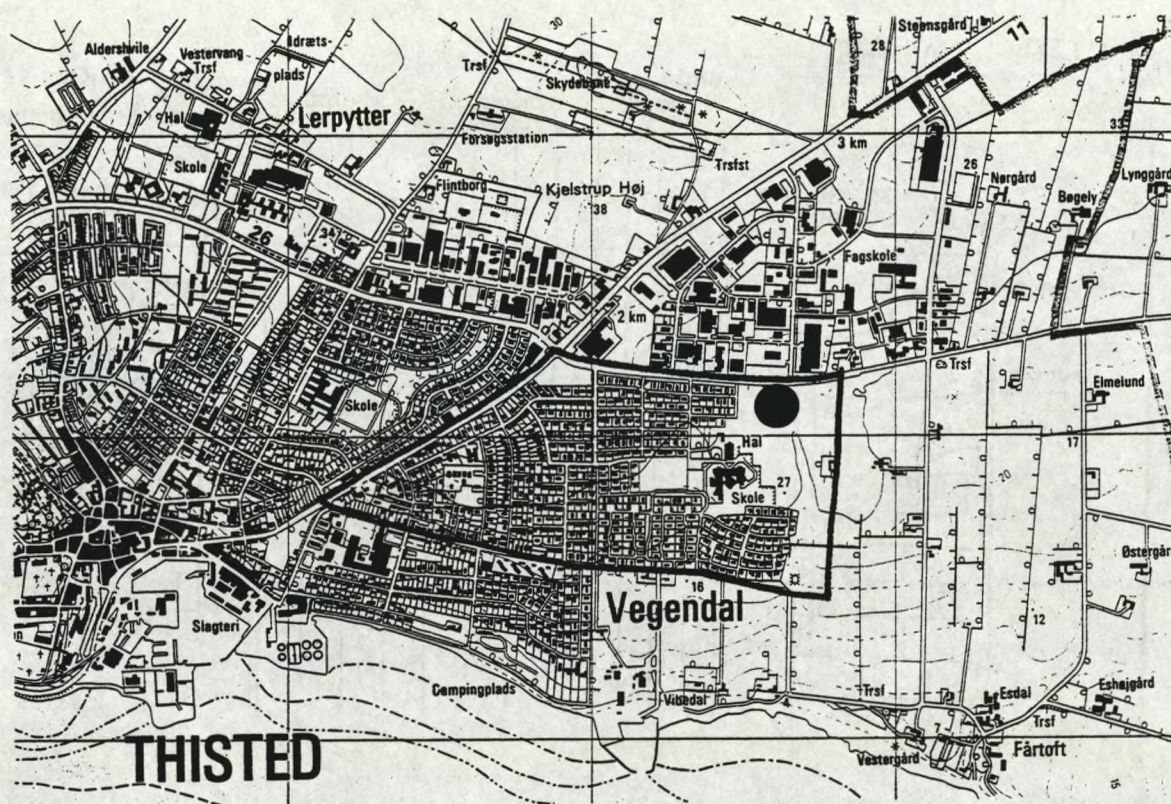


Fig. 2. Undersøgelingslokaliteten ved Thisted. Del af 1116 I Thisted. 1:25.000 (Med tilladelse fra Kort- og Matrikelstyrelsen).

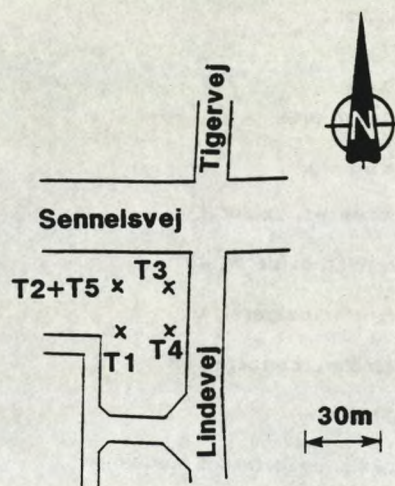


Fig. 3. Skitse over lokaliteten ved Thisted med angivelse af boringernes placering.



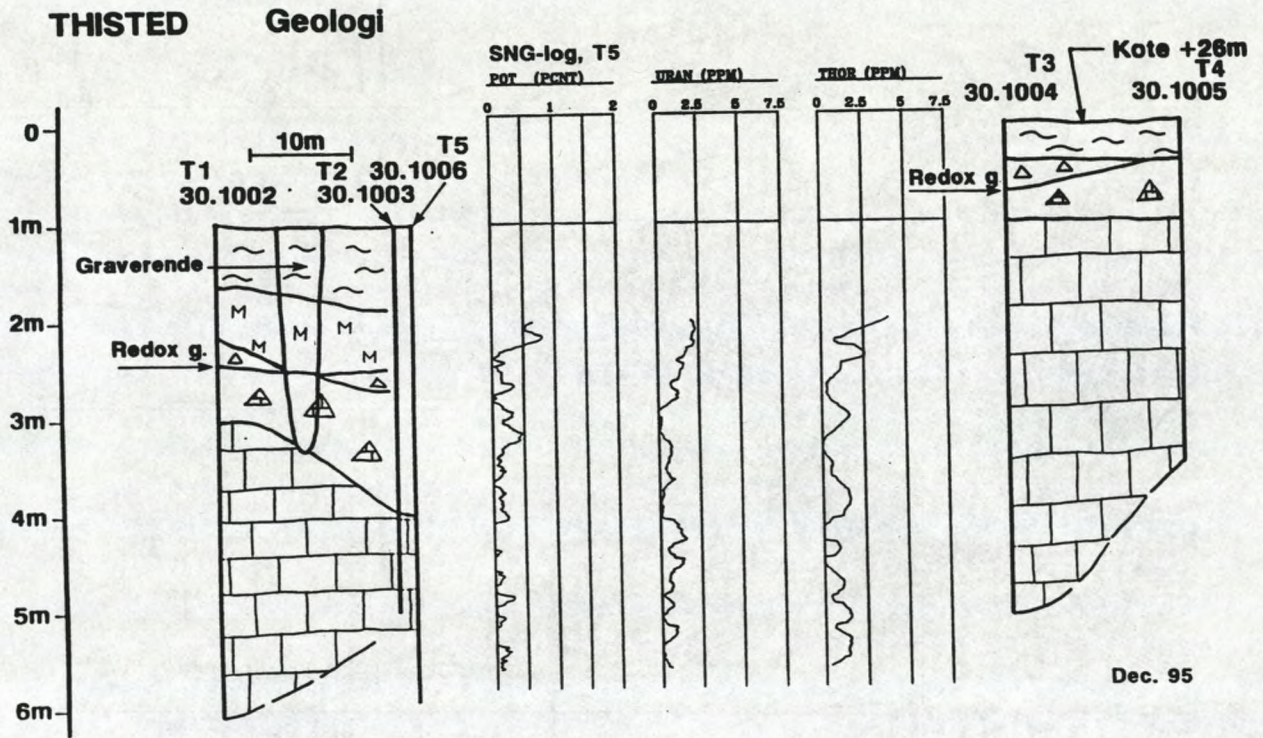


Fig. 4. Thisted. Geologisk tværprofil gennem boringer og graverende. Signaturforklaring på fig. 5.

**Signaturforklaring til tværprofiler**

- Muld
- Illuvialzone
- Ler
- Sand med grus
- Grus og sten
- Morænesand, oxideret
- Moræneler, oxideret, kfr
- Moræneler, oxideret, kh
- Moræneler, reduceret, kh
- Kalk-moræne
- Slamkalk, opsprækket-brecciere
- Slamkalk
- Rødder
- Sprækker

Fig. 5. Signaturforklaring til tværprofilerne fig. 4, 14, 23 og 32.



Under muldlaget findes gulbrunt, oxideret morænesand, der er siltet og svagt leret. Sandet har et varierende indhold af kalkklaster og flint. Indholdet af kalkklaster stiger generelt nedefter, men stedvis er morænesandet imidlertid kalkfattigt: Bor T1 og T2 (1-6 %  $\text{CaCO}_3$ ). Tykkelsen af morænesandet varierer fra 0 til 1,2 m, og træffes ikke i bor T3 og T4.

Den tredje enhed består af gulbrunt og brunt, oxideret moræneler, der kan have op til 43 %  $\text{CaCO}_3$ , og den findes som tynde lag i borerne T1, T2 og T3. Lagene kiler tilsyneladende ud horisontalt.

I boring T4, hvor der ikke er truffet morænesand eller gulbrunt moræneler, nås direkte under mulden en ca. 0,7 m tyk kalkmoræne (lokal moræne) med et  $\text{CaCO}_3$  indhold på 60-84 %. Denne enhed mødes iøvrigt i hele profilet.

Under de glacigene aflejringer er der truffet hvidgrå Daniens kalk, der er slammet og hård (hærdnet) men med bløde partier, samt flintholdig. Den kan klassificeres som en slamkalk, hvor hovedparten af kalkens korn har en størrelse på under 0,06 mm, d.v.s. i silt og lerfraktionerne. De bløde partier findes især i den øverste del af slamkalken. På (sprække-)flader er der udfældet jernoxider, som er observeret i hele den gennemborede del af kalken, d.v.s. til mindst 5 m under terræn, eller de øverste 4 meter af kalken.

### 6.3 Graverende og prøver

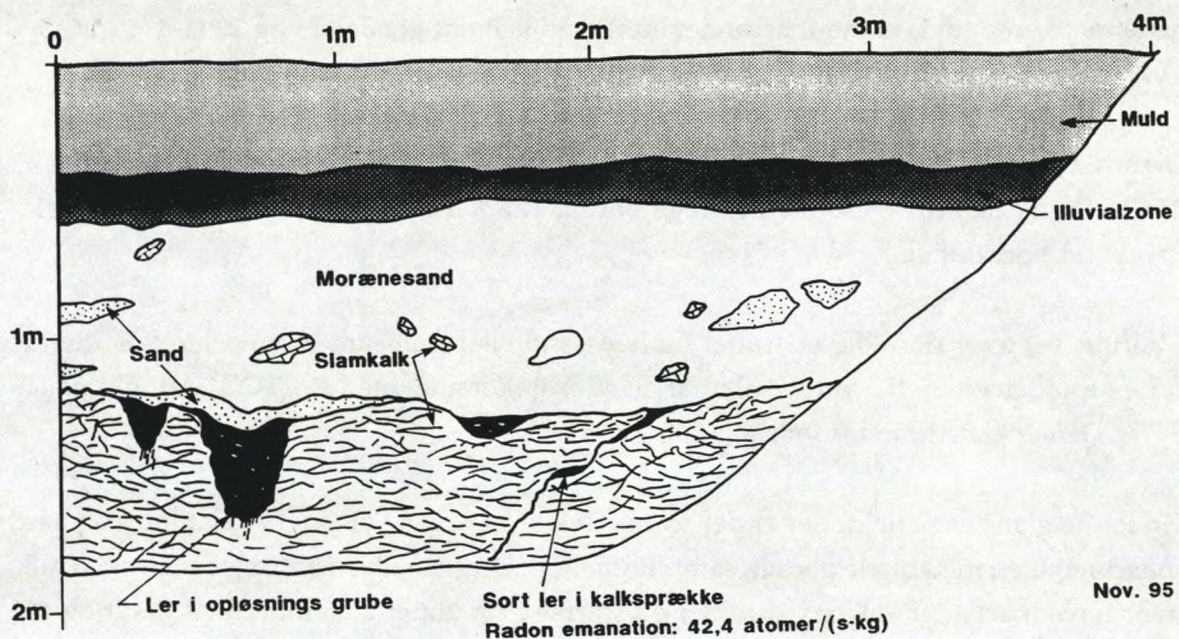
Graverenden er 1,9 m dyb, og udført mellem boring T1 og T5, 1 m syd for boring T5. I graverenden er der fire lithologiske enheder, der ses i to profiler vinkelret på hinanden (fig.6). De to øverste enheder er dannet ved jordbundsdannende processer, og de to nederste enheder er primært materiale. Den øverste enhed er et muldlag (0,5 m tyk), med en underliggende illuvialzone (nedvaskningszone) (15-20 cm tyk). Disse to enheder svarer til den øverste muldenhed i boringsprofilet. Under jordbundshorisonterne er der truffet morænesand (0,7 m tyk), der overlejrer kalk.

Det mørkebrune muldlag er sandet, svagt gruset og med mange rødder. Overgangen til den underliggende illuvialzone er plan og tydelig.

Illuvialzonen er sort og sandet med en del rødder. Overgangen til den underliggende morænesand er irregulær men tydelig. I den nordlige ende af udgravningen er der en 30 cm dyb og 5 cm bred kileformet forlængelse af illuvialzonen nedefter langs en sprække i morænesandet.

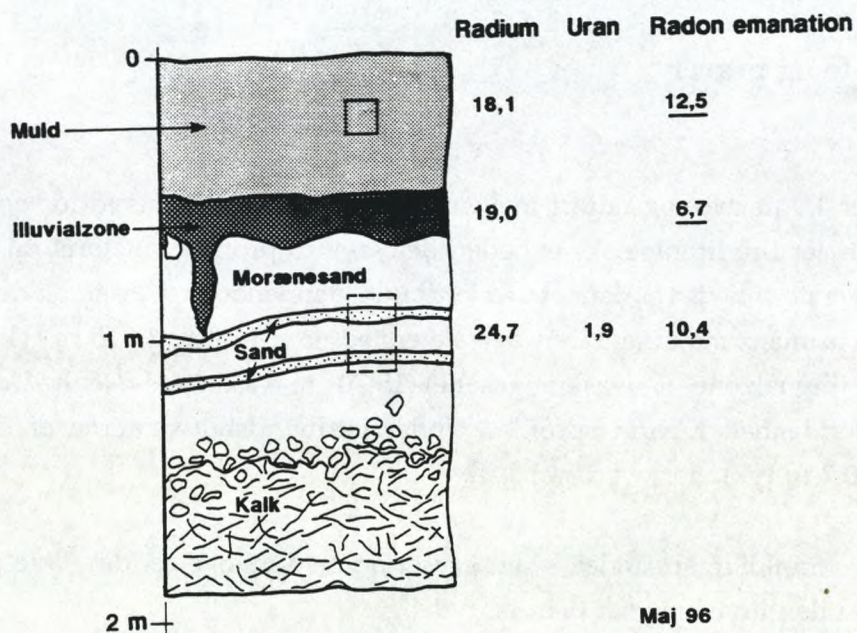


## THISTED Geologi



a.

## THISTED



b.

Fig. 6. To profiler fra graverenden ved Thisted. a. Østvæg, b. Nordvæg. Der er angivet radium (i Bq/kg), uran (i ppm) og radon emanations rate (i atomer/(s\*kg)) værdier målt på prøver udtaget i væggene (firkanter).



Morænesandet er gulbrunt, siltet og svagt leret samt indeholdende få gruskorn. Øverst er det svagt kalkholdigt (2%  $\text{CaCO}_3$ ). Desuden findes der striber og linser af mellemkornet sand (fig.4). Overgangen til den underliggende kalk er diffus, og mange løse kalkbrokker indgår i den nederste del af morænesandet. Indholdet af kalkbrokker stiger nedefter og går gradvis over i opsprækket kalk. Overgangszonen svarer til kalkmorænelagene i borerne.

Kalken er gråhvid, slammet og hård (hærdnet) med bløde partier. Den hårde kalk ligger som klaster omgivet af en matrix bestående af den bløde kalk, der stedvis er lerholdig. Kalken er stærkt opsprækket med jernudfældninger på sprækkeflader. I toppen af kalken er der karstlignende gruber, der er udfyldt med sort, fedt ler (fig.7). Fra bunden af gruberne og 10 til 15 cm nedefter er kalken opsprækket ved en række tætliggende vertikale sprækker. Disse sprækker er ligeledes fyldt med sort ler. Gruberne er sandsynligvis dannet ved opløsning af kalken i en mindre sprækkezone, der har virket som svaghedszone.

#### Sprækker

Både morænesandet og kalken er opsprækkede. I morænesandet er der et vertikalt sprækkesæt der stryger 15 til 20°, og der er en afstand mellem dem på 5 til 10 cm. Kalken er breccieret med en klastestørrelse på 1 til 10 cm. I bunden af karstgruberne er der et sæt tætsiddende vertikale sprækker, der kan følges 10 til 15 cm nedefter. Desuden er der set en større lerfyldt sprække, som kan følges ned til bunden af udgravningen.

#### Rod og ormegange

Græsrodde er meget hyppige i de to øverste zoner, og findes ned til kalken i 1,2 m under terræn. Desuden er der tomme (ca. 0,5 cm tykke) rod og ormegange. De er vertikale og kan følges fra overfladen og ned til kalken. Gangene har en indbyrdes afstand på ca 10 cm. Væggene i gangene er belagt med sort, organisk materiale og evt. udfældet mangan. Vægbelæggningerne er også trængt ind i horisontale sprækker fra gangen.

Informationerne om de strukturelle forhold kan bruges til at vurdere permeabilitetsforhold og den hydrauliske ledningsevne (vand-luft) i aflejringerne i den umættede zone. For moræneaflejringerne er brugt metoden i McKeagne et al. (1986), der bygger på en visuel bedømmelse for hele enheder. Imidlertid er det karakteristisk at netop moræneler-sand kan have væsentligt forskellige forhold i matrix og i makroporer (Bouma, 1977, Fredericia, 1990).

Morænesandet vurderes til at have en permeabilitet på  $10^{-12} \text{ m}^2$ , og en hydraulisk ledningsevne på skønsmæssig  $10^{-5} \text{ m/s}$ . Desuden har kalken har en høj porøsitet på 30-40 % og skønsmæssigt en hydraulisk ledningsevne på  $10^{-2}$ - $10^{-4} \text{ m/s}$ .



## 6.4 Aflejringeres alder

Mulden og illuvialzonen er dannet i Postglacial tid, d.v.s. indenfor de sidste 10.000 år. Morænesandet og det gulbrune moræneler er dannet ved Weichsel istidens NØ-fremstød, der nåede frem til Hovedopholds-Linien for ca. 18.000 år siden i Sen Mellem Weichsel (Gry, 1979, Houmark-Nielsen, 1987). Den stærkt kalkholdige morænetype udgør den nedre del af moræneenheden, som er fuldstændig præget af den underliggende kalk. Danien kalken er ca. 65 millioner år gammel (Nedre Palæocæn). Det sorte ler i kalken er af Øvre Palæocæn alder. Dannelse af opløsningsgruber, sprækker og lerudfyldninger er sket fra Danien tid til Postglacial tid.

## 6.5 Vandindhold og nedbørsforhold.

Vandindholdet i jorden kan have en effekt på radon emanations raten. Et indhold på over 20 vægt procent har en dæmpende effekt på emanationen.

I forbindelse med store nedbørsintensiteter kan der opstår høje vandindhold, eventuelt mættede forhold i de øverste jordlag med en der af følgende dæmpende indflydelse på emanationen. Af disse årsager er vandindholdet i et udvalg af de udtagne prøver bestemt og oplysninger om nedbørsforhold for perioden forud for prøvetagningen er indhentet fra Danmarks Meteorologiske Institut.

Ved Thisted er der undersøgt vandindhold, vægt %, i prøver af muld (8), morænesand (6), moræneler (2) og Danien kalk (6). Prøverne dækker et interval på 0,25-4,0 m.u.t. (bilag C). Muldprøverne viser generelt de højeste vandindhold 12,3-17,2 %, for morænesand og moræneler er variationen 10,4-17,1 % og 11,3-13,0 % henholdsvis. Kalkprøverne viser den største variation på 7,2-19,1 %.

Ni dage forud for prøvetagningen var uden nedbør, men inden for samme døgn som prøvetagningen fandt sted d.8/5-95, faldt 12,5 mm. Dette forklarer det relativt høje vandindhold i muldlaget.

Vandindholdet overskred ikke i nogen af prøverne grænseværdien for indflydelse på radon emanationen.



## 6.6 Uran og Thorium indhold

Der er undersøgt 15 prøver for indhold af uran (U) og thorium (Th). På fig. 6 og 8 ses fordeling af U-værdier i borer og graverende. Mulden har mellem 0,8 og 1,4 ppm U, mens værdier i morænesandet giver mellem 1,6 og 1,9 ppm. Moræneleret har 0,6 ppm U, og kalkmorænenens indhold er også lavt svarende til 0,7 ppm eller under 0,5 ppm. I Danien kalken er der under 0,6 ppm U.

Generelt er værdierne lave, men svarer godt til tidligere målte værdier for danske morænejordarter og kalk (Engell-Jensen et al., 1984, Skov- og Naturstyrelsen, 1987), dog er der målt højere værdier for Danien kalk tidligere.

Th-værdien for morænesand er på 4,6 ppm, og svarer godt til det kendte niveau, men derudover er det kun mulden, der har høje værdier (op til 6,9 ppm).



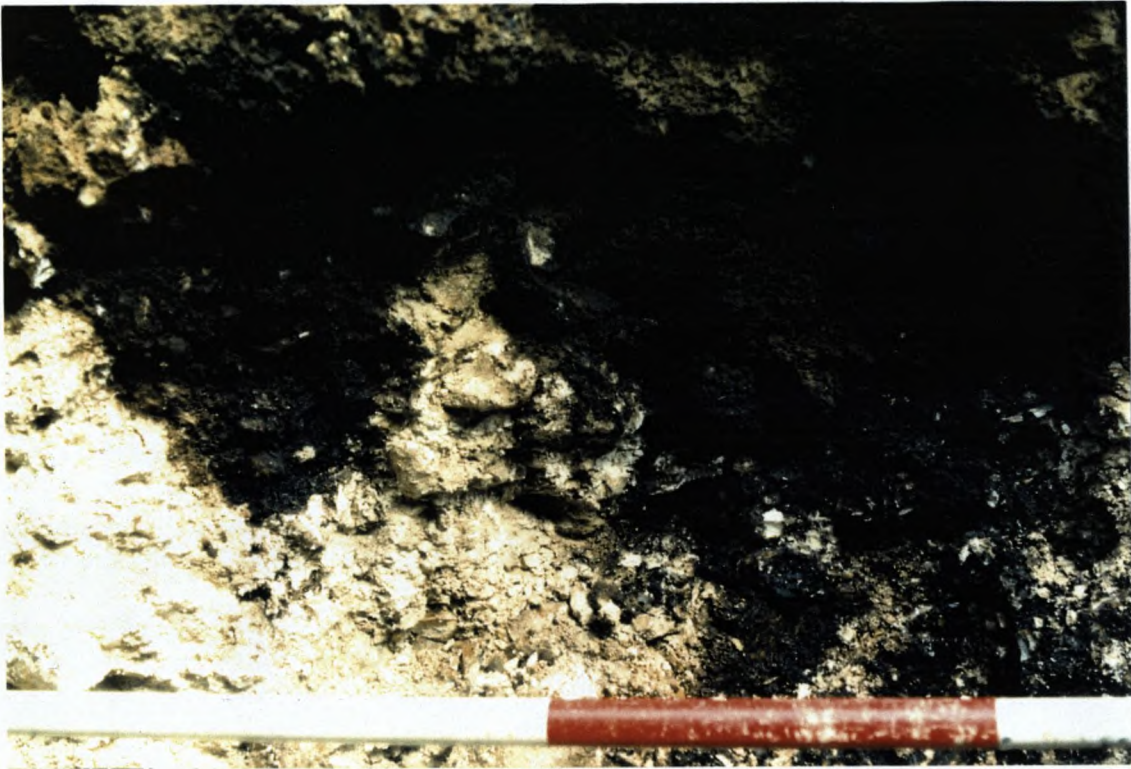


Fig. 7. Karstgrube i Danien kalken med sort palæocænt ler. Kalken er stærkt opsprækket. Det palæocæne ler overlejres af gulbrunt morænesand. Graverende, Thisted.

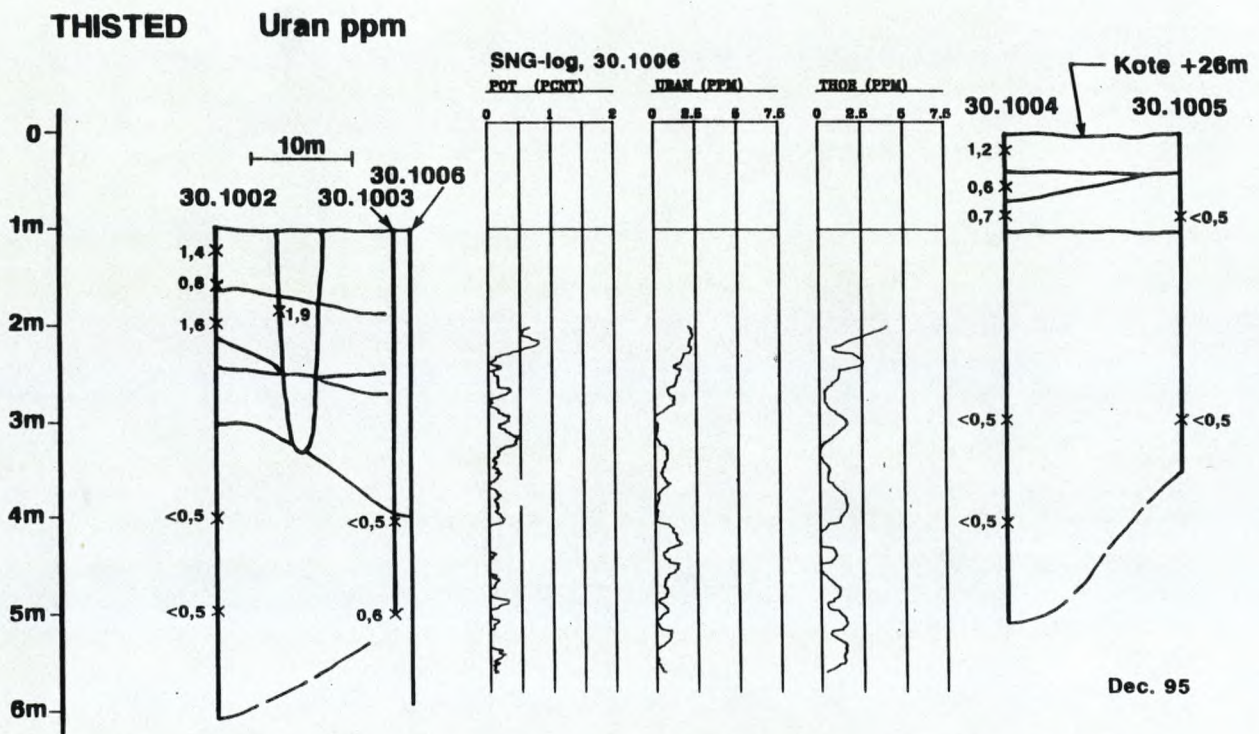


Fig. 8. Tværprofil med uranværdier. Thisted. Se geologi fig. 4.



## 6.7 Radium indhold

Der er undersøgt 20 prøver for deres radiumindhold (fig. 9)(bilag A). Muldlaget og illuviallaget har radiumværdier mellem 14,7 og 23,2 Bq/kg og en aritmetrisk middelværdi med standard afvigelse på  $18,9 \pm 3,1$  Bq/kg. Morænesandets værdier ligger fra 18,7 Bq/kg til 24,7 Bq/kg med en middelværdi, som ligger på  $20,5 \pm 3,0$  Bq/kg.

Det oxiderede moræneler har en værdi på 14,1 Bq/kg. Der er derefter et væsentligt fald til niveauet i de to andre lithologiske enheder. Fra kalkmorænen er der værdier fra 1,2 Bq/kg til 6,6 Bq/kg (middelværdi  $3,9 \pm 2,2$ ). Danien slamkalken ligger mellem 1,0 Bq/kg og 3,7 Bq/kg. Middelværdien for kalken ligger på  $2,5 \pm 1,0$  Bq/kg.

Lave radiumværdier i kalkbjergarter er tidligere påvist (Korsbech, 1985, Damkjær & Korsbech, 1985, 1988). Til gengæld er det påfaldende, at de to øverste kvartære aflejringer over kalken har relativt høje værdier.

## 6.8 Radon emanation

Der er undersøgt 23 prøver for radon emanations rater (fig.10). I muldlaget er målt mellem 5,8 og 12,5 atomer/(s\*kg), hvilket er middel høje værdier i henhold til klassifikationen i Korsbech (1985) og Damkjær og Korsbech (1985)(Aritmetrisk middelværdi og standardafvigelser:  $9,0 \pm 1,3$  atomer/(s\*kg)). I det oxiderede, kalkholdige moræneler er målt 13,6 atomer/(s\*kg), mens der i oxiderede, kalkfattige morænesand er rater på mellem 7,6 og 10,4 atomer/(s\*kg) med en middelværdi  $8,5 \pm 1,3$  atomer/(s\*kg).

Herefter falder værdierne til mellem 0,9 og 1,5 atomer/(s\*kg) i kalkmorænen og mellem 0,1 og 1,2 atomer/(s\*kg) i Danien kalken (middelværdi:  $0,5 \pm 0,3$  atomer/(s\*kg)). I det sorte palæocæne ler fra sprækkerne i kalken er målt radon emanations rate på 42,4 atomer/(s\*kg).

Værdierne for det oxiderede moræneler og morænesandet ligger noget højere end hvad der tidligere er målt på danske morænejordarter (Korsbech, 1985, Damkjær & Korsbech, 1985), mens værdierne for kalken og det palæocæne ler svarer godt til, hvad der tidligere er målt.



**THISTED Radium Bq/kg**

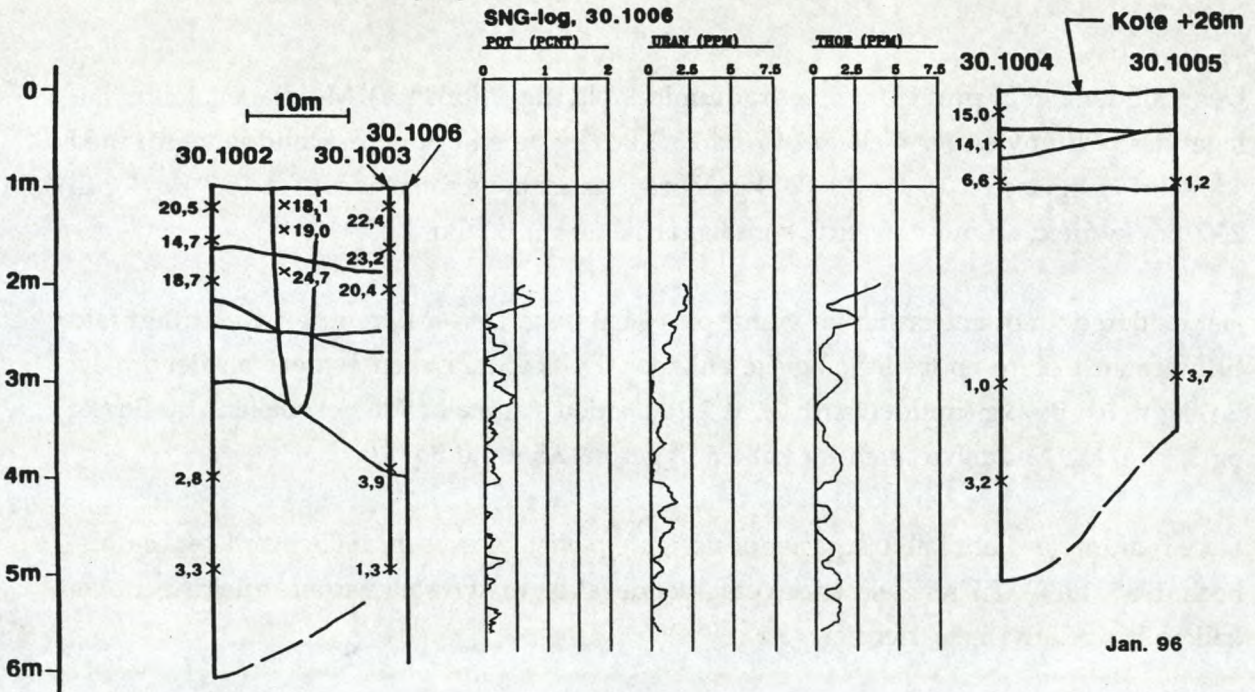


Fig. 9. Tværprofil med radiumværdier. Thisted. Se geologi fig. 4.

**THISTED Radon emanations rater i Atomer/(s·kg)**

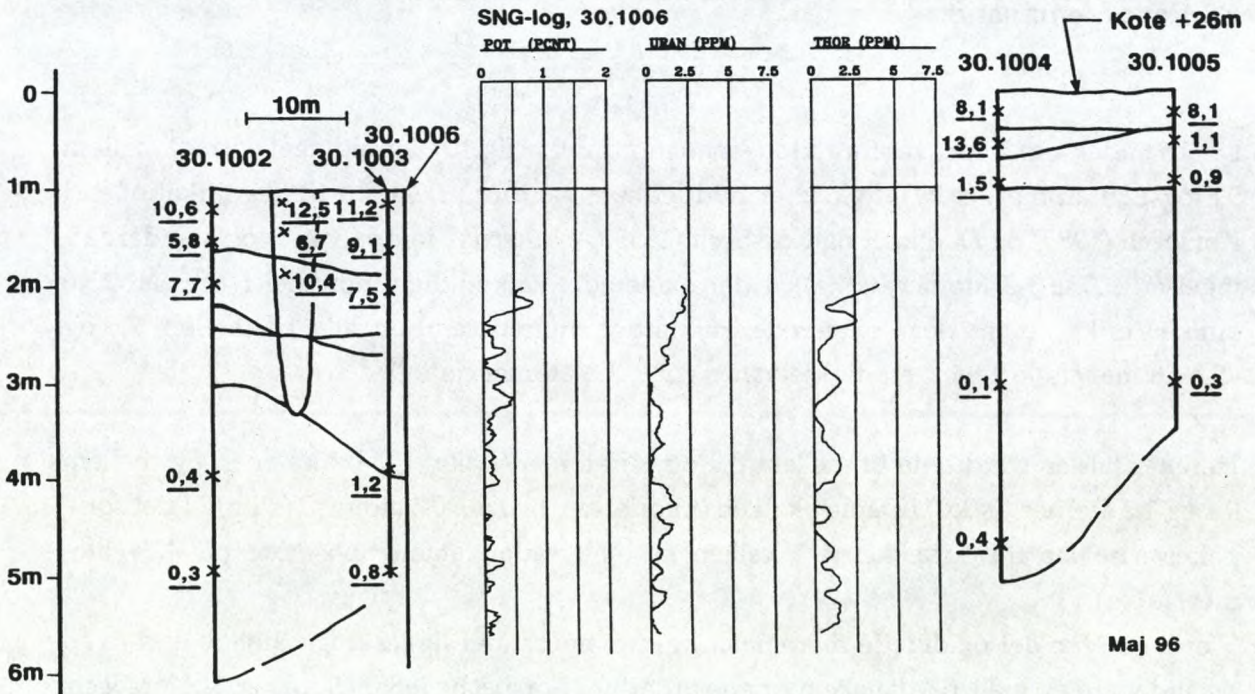


Fig. 10. Tværprofil med radon emanations rater. Thisted. Se geologi fig. 4.



## 6.9 Målinger ved Radon-95

Under "Radon-95"-projektet er der målt for radon i indeluften i 90 huse samt i jordluften udenfor husene (Damkjær et al., 1995a). I indeluften var der en aritmetisk middelværdi på  $98 \text{ Bq/m}^3$ . Minimum var på  $8 \text{ Bq/m}^3$ , mens de to højeste værdier i husene var som årsmidler  $280 \pm 90 \text{ Bq/m}^3$  og  $340 \pm 210 \text{ Bq/m}^3$ , mens værdier i stuen var på  $430 \pm 40 \text{ Bq/m}^3$  og  $700 \pm 100 \text{ Bq/m}^3$ . Ialt havde 6 huse over  $200 \text{ Bq/m}^3$ .

Der blev foretaget 17 jordgasmålinger på 6 grunde. Målingerne blev foretaget i gennemsnitlig 83 cm's dybde. Den gennemsnitlige radonkoncentration var på  $6 \text{ kBq/m}^3$ . Der er ikke fundet klar sammenhæng mellem koncentrationerne i poreluft og indendørsluft.

## 6.10 SNG-borehulslog

Der blev boret en 6" sneglebor (DGU Borearkiv nr. 30.1006 (T5)), hvori der blev nedsat et 125 mm pvc-rør inden logningen af boringen (fig.4). SNG-log metoden er bl.a. beskrevet af Engell-Jensen (1981).

SNG-loggen viser svingende lave uranværdier ( $eU = \text{ækvivalent uran}$ ) i kalken og i kalkmorænen (0-2 ppm), mens der i morænesandet kan findes op til 2,5 ppm  $eU$ . Det er markant hvordan uranindholdet falder nedad gennem laget til kalkmorænen. Thoriumindholdet ( $eTh$ ) er lavt under 2,5 ppm, men generelt lavere i kalklagene end i de Kvartære lag. Værdierne ligger generelt højere end de målte ved de kemiske analyser (se afsnit 6.6).

## 6.11 Kornstørrelsesanalyser

Der er foretaget kornstørrelsesanalyser på de tre moræneenheder: Tre prøver af morænesand, to moræneler-(sand)prøver og to kalkmoræneprøver. Eksempler på de tre typer ses på fig.11.

De tre morænesandsprøver har middeldkornstørrelser fra 0,057 mm til 0,129 mm og sorteringsgrader på 1,98 til 2,48. Lerindholdet er på 4,2-11,3 %.

Tre morænelersprøver med underordnede sandstriber har fra 12,0% til 18,3 % ler. Middelværdier er fra 0,091 mm til 0,289 mm og sorteringsgrad mellem 2,81 og 8,39.

Kalkmoræneprøverne har et lerindhold/kalkslamindhold fra 21,5% til 24 %. Middeldkornstørrelsen er mellem 0,022 mm og 0,069 mm samt sorteringsgraden mellem 4,98 og 8,86.



**Thisted**  
**Kornkurve (akkumuleret)**

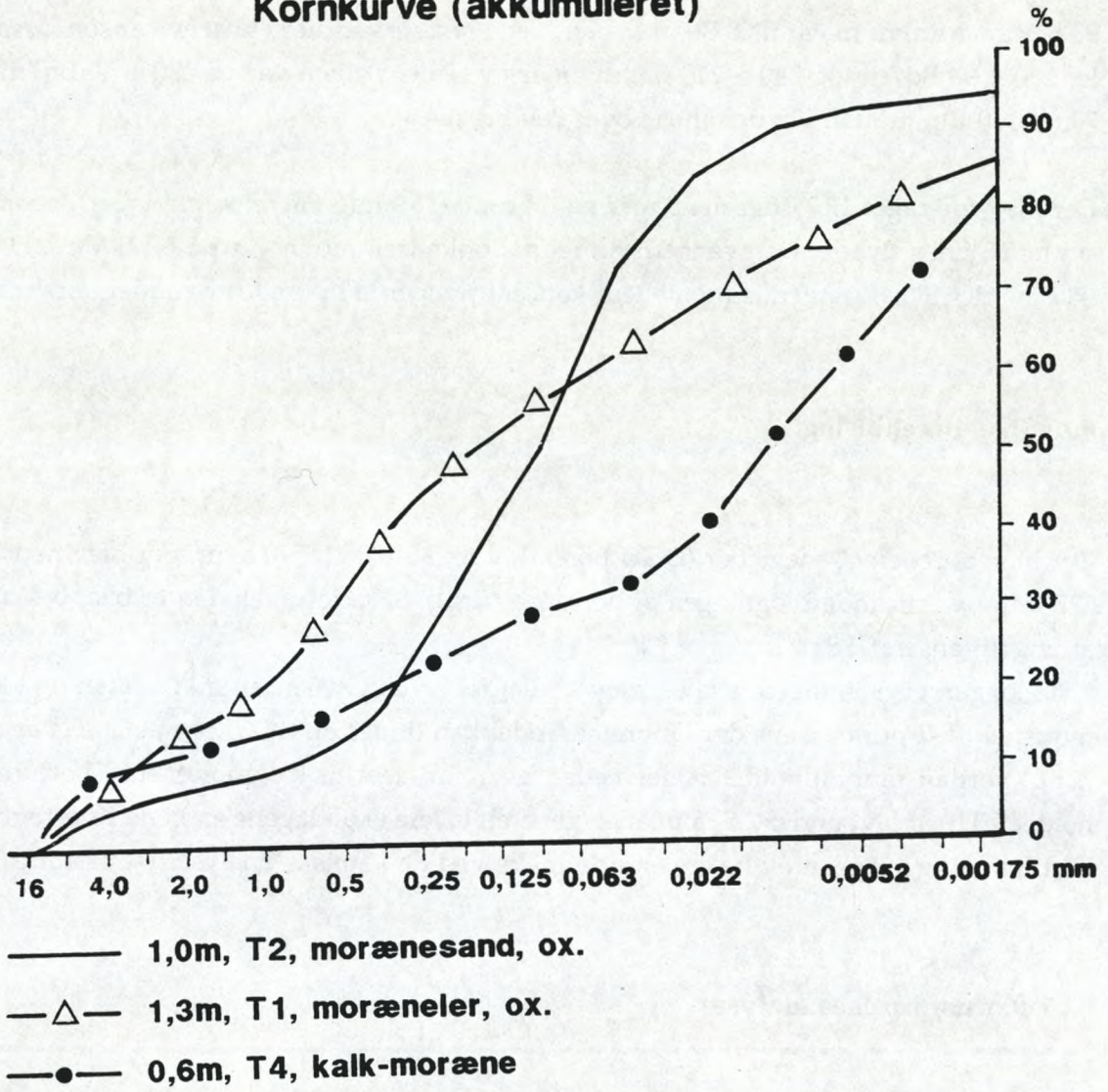


Fig. 11. Eksempel på kornstørrelsesfordelinger. Thisted.



Kornstørrelsesanalyserne viser de tre moræneenheders forskellige sammensætning. Kornstørrelsesforholdene i lagene har sammen med permeabilitet, porøsitet og fugtighed stor betydning for radon migrationen. I morænejordarter er især de strukturelle forhold af betydning for transportvejene. Matrix permeabilitet i moræneler er almindeligvis meget lav, mens permeabiliteten i makroporerne (sprækker, ormegange, rodkanaler) kan være flere størrelsesordener højere (Fredericia, 1990).

## 6.12 Lermineralogi og specifik overflade

Der er foretaget måling af specifik overflade og analyseret med røntgen for lermineraler samt andre mineraler på tre prøver fra den oxiderede zone i Thisted området. De to prøver er fra graverenden taget i dybderne 0,9 m (morænesand) og 1,5 meter (Palæocæn ler i kalksprække), mens den tredje er fra 1,0 m i bor T2 (morænesand). De anvendte metoder omtales i bilag A.

### Specifik overflade

Værdien for prøven ved 0,9 meter er  $12 \text{ m}^2/\text{g}$  og for 1,5 meter  $34 \text{ m}^2/\text{g}$ . Førstnævnte falder indenfor de værdier, der typiske for de andre lokaliteter, hvorimod den sidstnævnte værdi er væsentlig højere. Det høje indhold af ler kan være forklaringen herpå, hvortil et betydeligt indhold af organisk stof (bestemt ved differential kemisk analyse) ligeledes bidrager til, at overfladen i denne prøve, som iøvrigt er kalkfri, selv om den ligger i en sprække i kalken.

### Anden mineralogi

Udfra røntgendiagrammer på fraktionene under 125  $\mu\text{m}$  er det vist, at der ikke er kalk i prøverne ved 0,9 m og 1,0 m. De er iøvrigt karakteriseret ved at indeholde store mængder kvarts og mindre mængder feldspat (mikroklin og plagioklas) samt lermineraler.

### Lermineralogi

Sammensætningen af lermineraler er bestemt i dybderne 0,9 m og 1,0 m. Prøven ved 0,9 m viser tilstedeværelsen af smectit eller et smectit-lignende mineral (bred top  $18\text{\AA}$ , Mg-glycrol), vermiculit ( $14\text{\AA}$ , Mg-glycerol) samt mindre mængder af illit ( $10\text{\AA}$ , Mg-luftrør) og kaolinit ( $7\text{\AA}$ , Mg-luftrør). Mindre mængder af illit-smectit mineralet ( $10\text{-}14\text{\AA}$ , Mg-luft) synes også at være tilstede. Prøven fra 1,0 m er markant forskellig fra den første prøve, idet smectit ikke synes at være til stede her, hvorimod betydelige mængder af vermiculit og illit-smectit er tilstede samt mindre mængder illit og kaolinit.



### 6.13 Grusindhold

Morænesandet er domineret af granit-gnejs gruskorn, men også kalk og flint findes i store mængder. Kvarts forekommer i den fine fraktion (0,71-2 mm). Kalkmorænen er helt domineret af kalk og flint med noget granit-gnejs. Danien kalken indeholder lidt granit og gnejs samt kvarts i den fine fraktion.

### 6.14 Organisk indhold

Det organiske indhold er meget lavt i de fleste prøver, bortset fra ved 0,45 m i udgravningen, hvor der er 1,73 Wt-% organisk materiale.

### 6.15 Sammenfatning

Radon emanations raterne i jordarterne ved Thisted viser en sammenhæng mellem indholdet af uran og radium på den ene side og deres alder og oprindelse på den anden side. De meget lave radon værdier i Danien kalken skyldes fraværet af mineraler og bjerarter, der indeholder uran og radium og dermed potentialet for radon emanation. Det palæocæne ler i gruber og sprækker i kalken med den høje radon emanations rate har en stor specifik leroverflade og et højt organisk indhold, hvor radium kan adsorberes og fastholdes. Kalkmorænen har ligesom kalken lave uran, radium og radon værdier, men sammensætningen er også næsten den samme.

Det gulbrune, oxiderede moræneler og morænesand har radon emanations rater, der kendes fra tilsvarende oxiderede jordarter andre steder i landet, og den udvaskning og forvitring, der er foregået siden sidste istid, har medvirket til fysiske ændringer i jordarterne i retning af højere permabilitet, ligesom sprækker og makroporer er med til at øge permeabiliteten i den umættede zone. Det øverste muldlag har også relativt høje uran, radium og radon værdier, og især det organiske indhold i mulden er med til at fixere de radioaktive mineraler. De mineralogiske og fysiske forhold i den umættede zone er, på trods af kalkens lave radon potentiale, af en karakter, der gør, at radon kan transporteres med jordluften opad gennem jordlagene.



---

## 7.ANDRUP, JYLLAND

---

### 7.1 Lokalitet

Undersøgelsen er udført på en brakmark lige udenfor Andrup (Oksvangvej), der ligger nordøst for Esbjerg (fig.12).

Der blev foretaget fem boringer d. 10 maj 1995 og en udgravning d. 11 maj 1995. Udgravning og boringer blev lagt på en linie sydvest-nordøst. Udgravningen lå mellem bor DGU ark. nr. 130.1368 (A5) og DGU ark. nr. 130.1365 (A2), og var 5,6 meter lang (fig.13). Terrænet er fladt beliggende i kote + 21 m.

### 7.2 Boringer og prøver

Firmaet Samfundsteknik A/S udførte fire lagfølgeboringer som tørboringer med en 8" snegl til 5 meter under terræn (DGU ark. nr. 130.1364 (A1), 130.1365 (A2), 130.1366 (A3), 130.1367 (A4)). Grundvandspejlet blev ikke nået. Der blev udtaget 50 sedimentprøver ved kontinuert udtagning fra sneglen, som blev geologisk beskrevet på stedet i overensstemmelse med GEUS procedure (Gravesen & Knudsen, 1981, Larsen et al., 1995)( se bilag B). Derefter blev prøverne opdelt og hjemtaget til analyse (se bilag A, B og C).

I boringerne er der øverst truffet en muldenhed. Derunder er der truffet glaciale morænersaflejringer, som kan opdeles i to lithologiske enheder. Boreprofiler med prøvebeskrivelser findes i bilag B. Et geologisk tværprofil gennem boringerne og graverenden ses på fig.14.

Den øverste enhed i boringerne, er mørkebrun muld, som er sandet og svagt leret. Tykkelsen af muldlaget er 0,3 til 0,4 m.

Under muldlaget træffes øverste lerenhed af ca. 2,5 m sandet og siltet, oxideret moræneler, som øverst er broget gulbrunt og rødgult, men hvor der nederst findes en kile af gråbrunt ler. Sand og silt indholdet varierer en del indenfor enheden. Det er desuden kalkfrit eller svagt kalkholdigt, (0-2 % CaCO<sub>3</sub>).



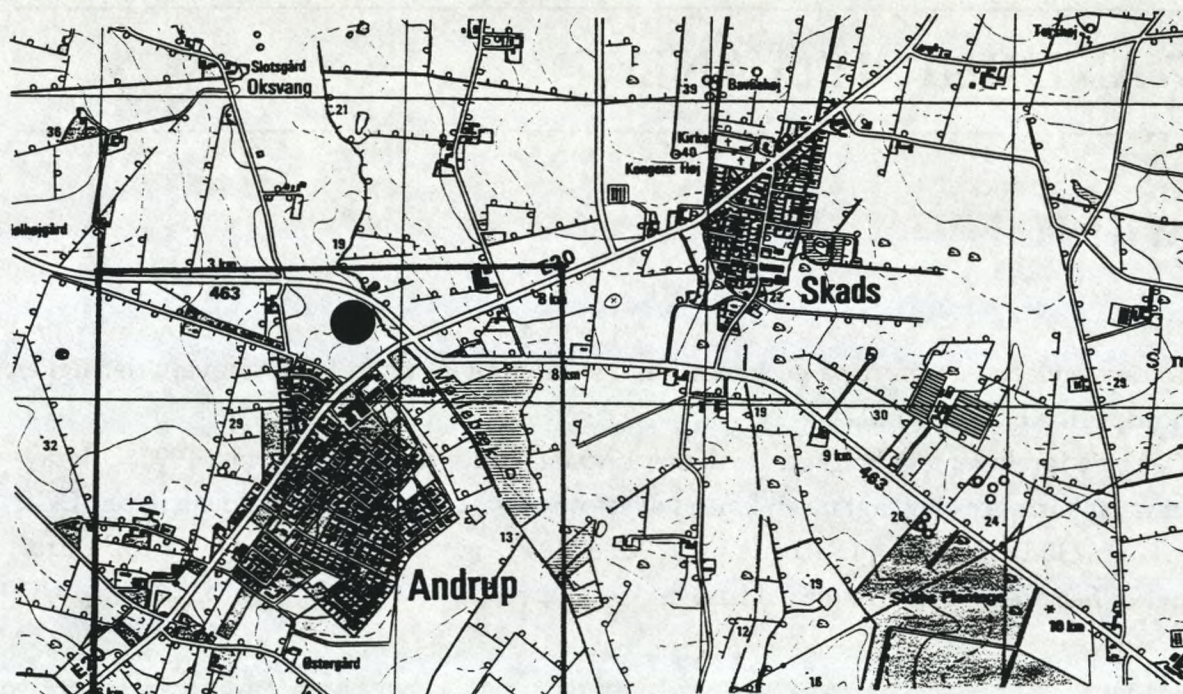


Fig. 12. Undersøgelingslokaliteten ved Andrup, Esbjerg, Vestjylland i 1:25.000. Kortblad 1113 III Esbjerg (Med tilladelse fra Kort- og Matrikelstyrelsen).

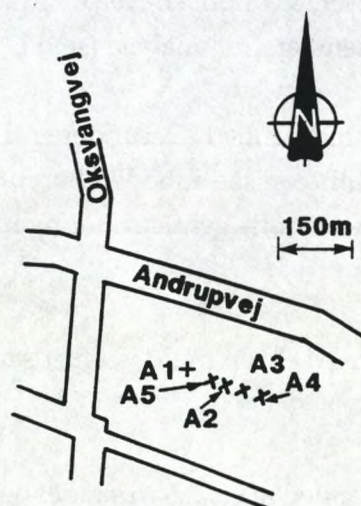


Fig. 13. Skitse over lokaliteten ved Andrup med angivelse af boringernes placering.



Den anden, nedre enhed består af siltet og svagt sandet, reduceret moræneler, som er olivengråt og kalkholdigt. Det indeholder klaster i grusstørrelsen af kalk og flint, samt klaster af fedt plastisk grønt ler samt undertiden små træstykker. Det olivengrå moræneler er desuden mere fast/hårdt end den overliggende brogede, oxiderede enhed.

Grænsen mellem det oxiderede, brogede gulbrune moræneler og det reducerede, olivengrå moræneler falder sammen med grænsen mellem kalkfrit og kalkholdigt moræneler i 2,5-3 meters dybde (fig. 14).

### 7.3 Graverende og prøver

Graverenden er 2,2 m dyb i den dybeste ende (mod vest), og er udført 1,7 meter øst for boring DGU nr. 130.1368, i øst-vestlig retning (fig.13). I graverenden træffes de to øverste lithologiske enheder. Øverst er der et muldlag, som er 0,3 til 0,4 m tykt. Derunder er der moræneler til bunden af udgravningen (fig.15).

Muldlaget er sandet, svagt leret, mørkebrunt og kalkfrit. Overgangen til den underliggende moræneler er irregulær og tydelig med talrige små rodgange og ormehuller.

Moræneleret er sandet (stedvis stærkt sandet), siltet, svagt gruset, med enkelte sten. Der er set en enkelt sten på 30 cm i diameter. Det oxiderede moræneler er flammert, rødgult og gulbrunt, hvor de gulbrune partier følger lodrette sprækker. Sprækkerne kan følges ned til 2 meters dybde (fra undersiden af muldlaget og til bunden af udgravningen (Fig.15 og 16).

#### Sprækker

Der er observeret tre sæt vertikale sprækker, der stryger 114°, 140° og 170°. På begge sider af sprækkerne er der en 0,5 til 1 cm bred gulbrun halo, hvorfra jernet er opløst og udvasket. Jernet er efterfølgende udfældet i de rødgult farvede områder. På sprækkefladerne er der udfældet mangan (ant.), og i sprækkerne ses ofte rødde.

#### Rod og ormegange

Græsrodde er hyppige i muldlaget og den øverste halve meter af moræneleret (fig.16). I moræneleret er der vertikale, tomme rod og ormegange, der er ca 0,5 cm tykke. De har en indbyrdes afstand på 5 til 10 cm, og er fulgt til ca 1,5 m under terræn.

Vurdering af permeabilitet og hydraulisk ledningsevne i det oxiderede moræneler (McKeegan et al. 1986) giver værdier på  $k=10^{-14}$  m<sup>2</sup> og  $K=10^{-6}$  -  $10^{-7}$  m/s.



**ANDRUP Geologi**

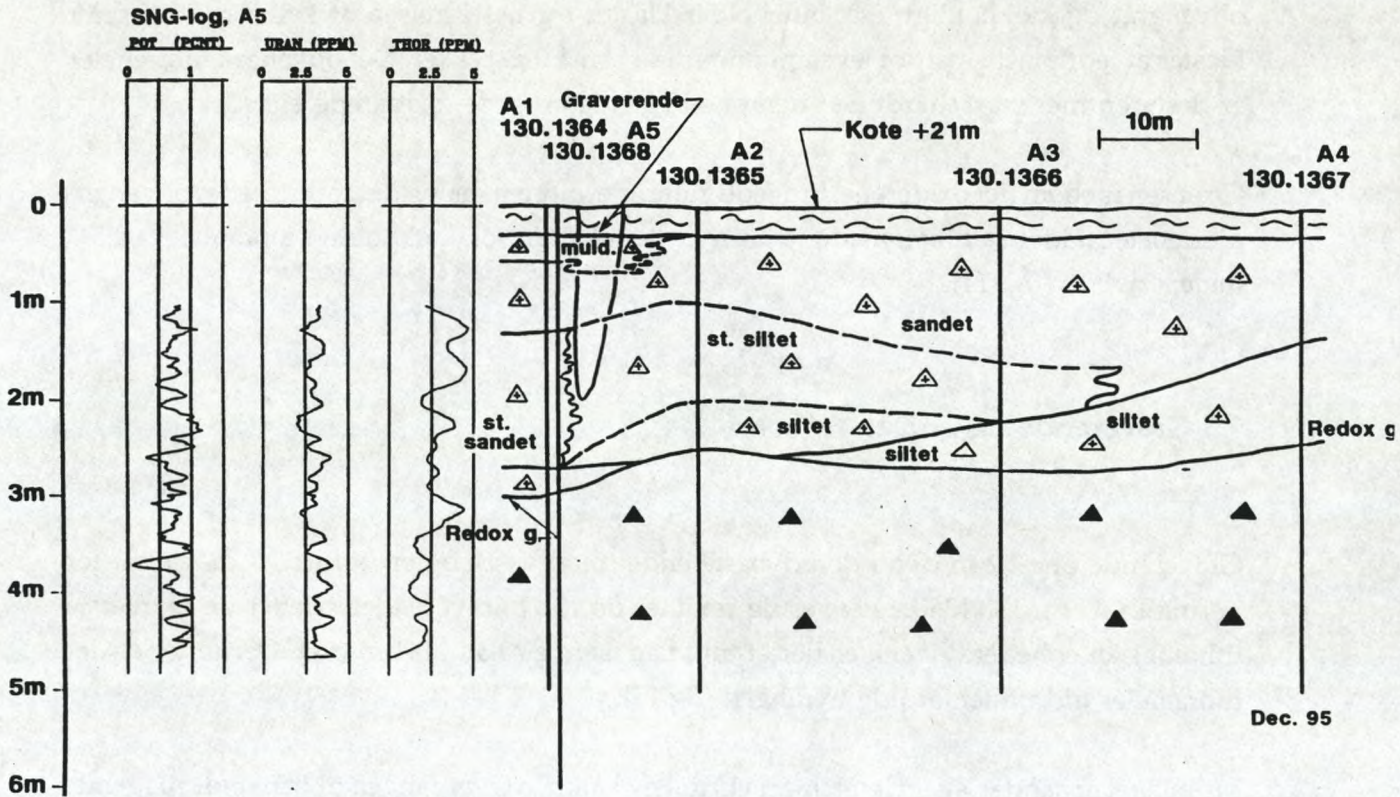


Fig. 14. Andrup. Geologisk tværprofil gennem boringer og graverende. Signaturforklaring på fig. 5.

**ANDRUP Geologi, Uran i ppm, Radium i Bq/kg og Radon i Atomer/(s·kg)**

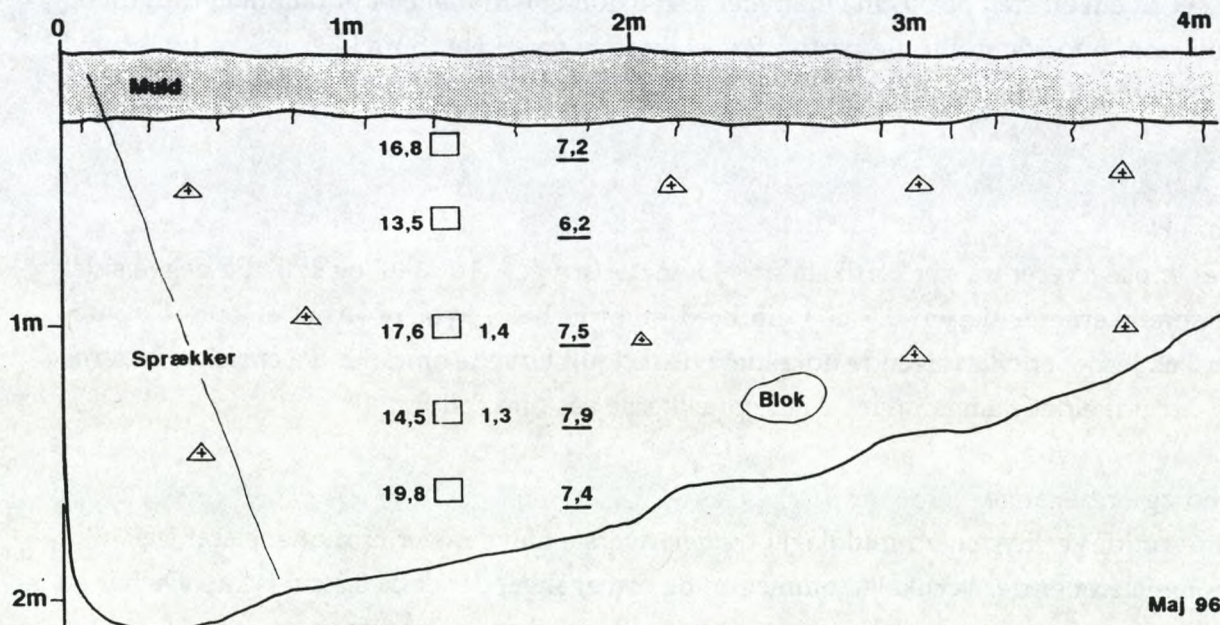


Fig. 15. Profil i graverenden, Andrup. Der er angivet prøveudtagning med en firkant, radiumindhold til venstre, uranindhold til højre og radon emanations rater med streg under.



#### 7.4 Aflejringernes alder

Det øverste muldlag er dannet i Postglacial tid, d.v.s indenfor de sidste 10.000 år.

De øvrige morænelersaflejringer, der findes på Esbjerg Bakkeø, er ældre end Weichsel istiden, og kan henføres til Saale istiden. På daglokaliteter i Esbjerg området har man kunnet se, at ældre Saale aflejringer (Drenthe, mere end 150.000 år ) har ligget ovenpå yngre Saale aflejringer (Warthe, mere end 130.000 år).

Den undersøgte moræneler henregnes til Warthe-afsnittet på grundlag af dets indhold af finkornet grus.

#### 7.5 Vandindhold og nedbørsforhold

På denne lokalitet målt vandindholdet på muldprøver (4) og morænelersprøver (21). Prøverne dækker et interval på 0,3-4,0 m.u.t. Muldprøverne viser en variation på 12,2-14,2 %, og moræneler varierer mellem 10,6-16,1 %.

Prøvetagning fandt sted d. 10/5-95, hvor der faldt 0,1 mm nedbør. Den 8 og 9 maj faldt 12,6 mm, mens de forudgående 18 dage var uden nedbør.

Udtørring i muldlaget i den lange tørkeperiode er kompenseret af nedbøren d. 8 og 9 maj. Vandindholdet i prøverne overskred ikke grænseværdien for indflydelse på emanationen.

#### 7.6 Uran og thorium indhold

Sytten prøver er analyseret for indhold af uran (U) og thorium (Th). På fig. 15 og 17 ses fordelingen af U-indholdet i borer og graverende.

I mulden er målt værdier på 1,3 til 1,4 ppm. I det oxiderede moræneler er der mellem 1,2 og 2 ppm U (middelværdi 1,54 ppm U), men i det reducerede moræneler træffes mellem 1,5 og 1,9 ppm U (middelværdi 1,68 ppm U). Der træffes en høj værdi indenfor den øverste meter ved bor A 4, mens der er lave værdier ved A1, A5, A3 og i graverenden. Der synes dog ikke at være forskel mellem den oxiderede og den reducerede zone.

Der er tale om relativt lave U-værdier i hele profilet, lavere end hvad der tidligere er målt for danske jordarter generelt.





Fig. 16. Øverst ses brun muld. Desuden følger gulbrunt, oxideret moræneler med sprækker. Orme- og rodgange er markeret ved de mørke striber, der ofte følger sprækkerne. Graverenden Andrup.

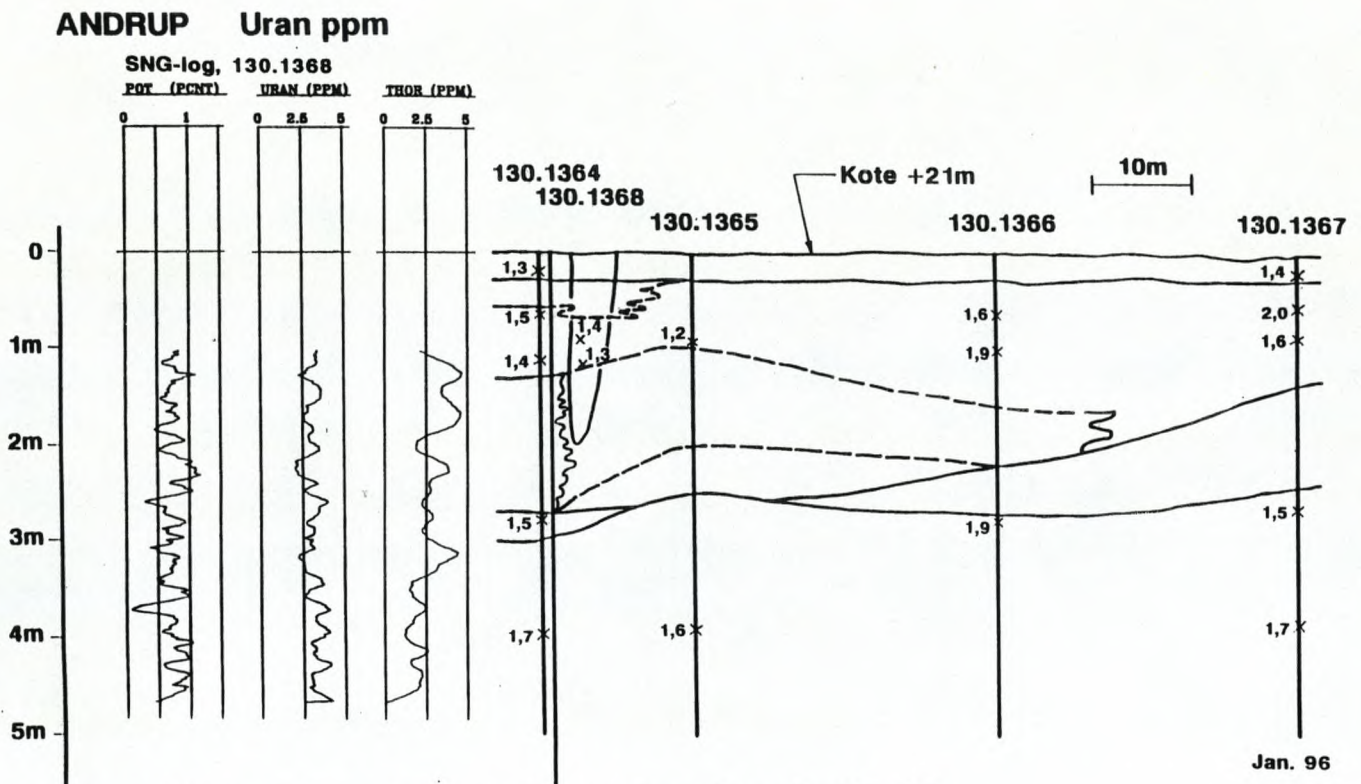


Fig. 17. Tværprofil med uranværdier, Andrup. Se geologi fig. 14.



Indholdet af Th er på mellem 4,8 ppm og 7,8 ppm, værdier som også er lidt lavere i forhold til angivelserne i Engell-Jensen et al. (1984) og Skov- og Naturstyrelsen (1987).

## 7.7 Radium indhold

Der er målt radiumindhold på 25 prøver ved Andrup (fig.18).

Radiumindholdet i muldlaget giver tre værdier fra 12 til 14 Bq/kg og en på 31 Bq/kg. Radiumindholdet i moræneleret ligger mellem 13-20 Bq/kg. Der synes ellers ikke at være markant forskel på radiumnivauerne i den oxiderede, kalkfri og reducerede, kalkholdige zone i moræneprofilen, som henholdsvis har aritmetriske middelværdier og standard afvigelser på  $16,5 \pm 2,3$  Bq/kg og  $15,8 \pm 1,9$  Bq/kg.

Der kan ses en antydning af zoner i dele af morænelers-profilen (fig.18) med højeste værdier i toppen indenfor den øverste meter ved bor A3 og A4, hvorefter lavere værdier træffes omkring bor A1, A2 og graverenden. Nedad i det samlede profil for boringer og graverende varierer værdierne. Værdierne ligger generelt lavere end dem som Damkjær og Korsbech (1984) har målt for Weichsel moræneler.

## 7.8 Radon emanation

Radon emanations rater er målt på 26 prøver (fig.19). I mulden findes værdier på 4,4 til 8,2 atomer/(s\*kg) med aritmetrisk middelværdi på  $6,9 \pm 1,3$  atomer/(s\*kg); d.v.s. middel høje værdier ifølge Damkjær og Korsbech (1985). I det sandede, stærkt siltede, oxiderede, kalkfrie moræneler er målt fra 6,3 til 10,6 atomer/(s\*kg) med en middelværdi på  $8,3 \pm 1,3$  atomer/(s\*kg). I det reducerede, kalkholdige moræneler falder værdierne til mellem 2,6 og 3,7 atomer/(s\*kg) med en middelværdi på  $3,2 \pm 0,4$  atomer/(s\*kg). Emanations rate værdierne i det reducerede moræneler er således lave.



**ANDRUP Radium Bq/kg**

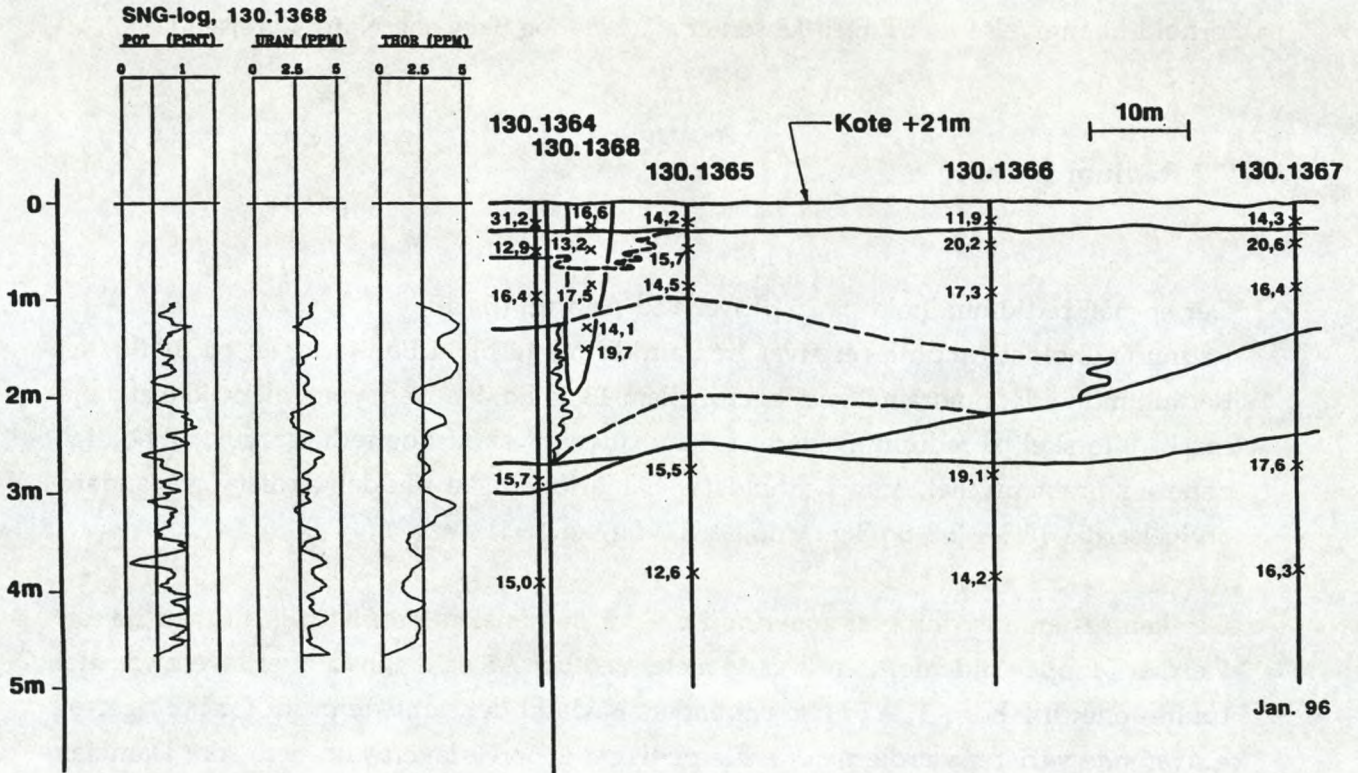


Fig. 18. Tværprofil med radiumværdier, Andrup. Se geologi fig. 14.

**ANDRUP Radon emanations rater i Atomer/(s·kg)**

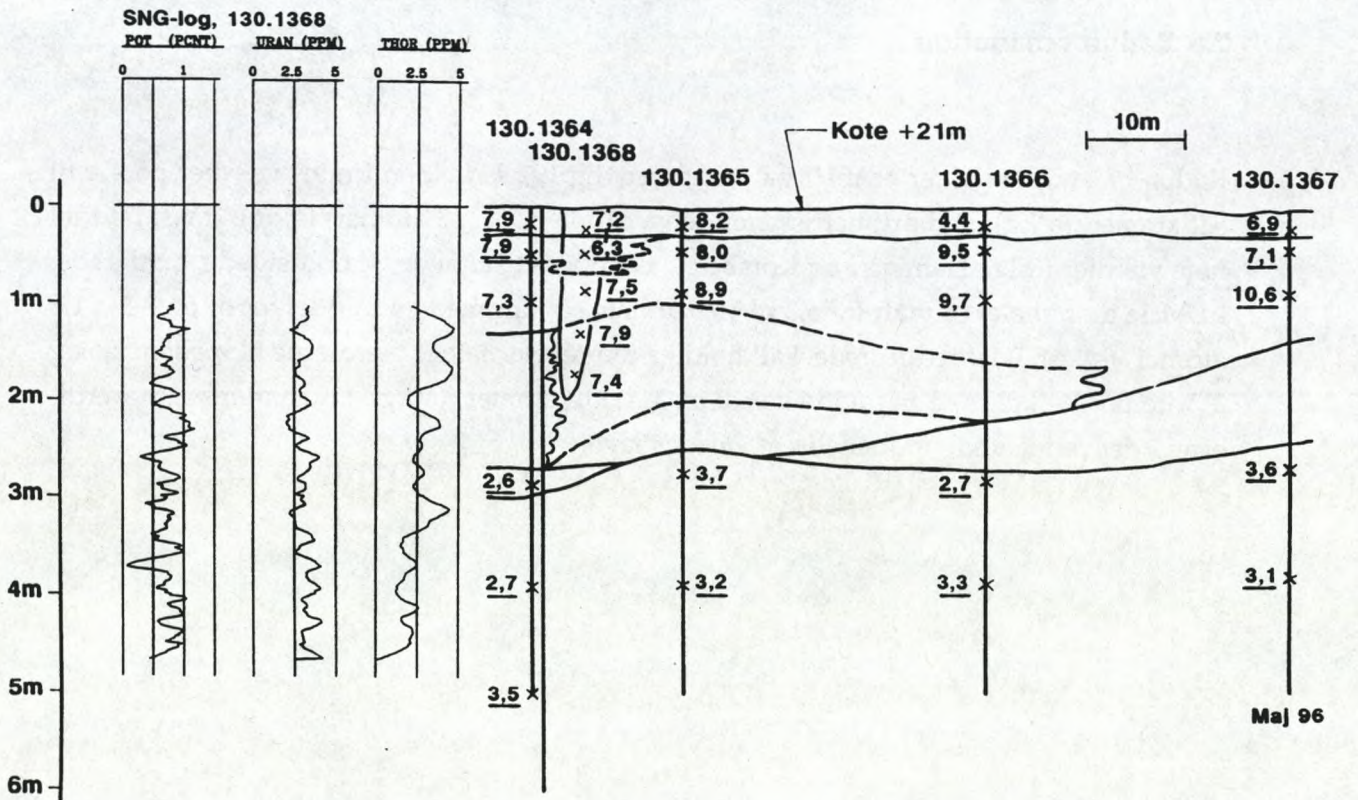


Fig. 19. Tværprofil med radon emanations rater, Andrup. Se geologi fig. 14.



## 7.9 SNG-borehulslog

Der blev udført en 6" snegleboring (DGU Borearkiv nr. 130.1368 (A5)), hvori der blev nedsat et 125 mm pvc-rør inden logningen (fig.14). SNG-log metoden er beskrevet af Engell-Jensen (1981).

Loggen viser et varierende uranindhold på mellem 2 og 4 ppm ned gennem boreprofilet, hvor de maximale toppe ligger i to niveauer. I den oxiderede zone ned til 2,5 meters dybde er der ca. 3,5 ppm eU i moræneleret, mens der i den reducerede zone er ca. 4 ppm eU. Begge værdier ligger lidt over de værdier der forventes i danske moræneler (Skov- og Naturstyrelsen, 1987), og som er målt af Korsbech (1985).

Værdierne opnået ved de kemiske analyser er generelt lavere end ved SNG-loggen (se afsnit 7.5).

## 7.10 Kornstørrelsesanalyser

Kornstørrelsesfordelingerne er undersøgt for 10 morænelersprøver; 6 fra den oxiderede zone og 4 fra den reducerede zone. Eksempler ses på fig 20. I de oxiderede prøver er lerindholdet mellem 17,3 % og 23,8 %, middelnkornstørrelsen fra 0,096 mm til 0,152 mm, mens sorteringsgraden er fra 4,57 og 11,82. I de reducerede prøver er lerindholdet mellem 15,7 % og 22,7 %, middelnkornstørrelsen mellem 0,089 mm og 0,116 mm, samt sorteringsgraden fra 5,05 og 9,14. For alle prøver gælder iøvrigt, at det er fint og mellem sand, der dominerer prøverne mængdemæssigt.

## 7.11 Lermineralogi og specifik overflade

Der er undersøgt specifik overflade på fem prøver fra graverenden ved Andrup ( 0,3-0,4 m, 0,5-0,6 m, 0,9-1,0 m, 1,3-1,4 m, 1,5-1,6 m) fra den oxiderede zone, og lermineralogi og anden mineralogi ved røntgenanalyse på to prøver (0,9-1,0 m og 4,0 m fra boring A2). De anvendte metoder ses i bilag A.



**Andrup**  
**Kornkurve (akkumuleret)**

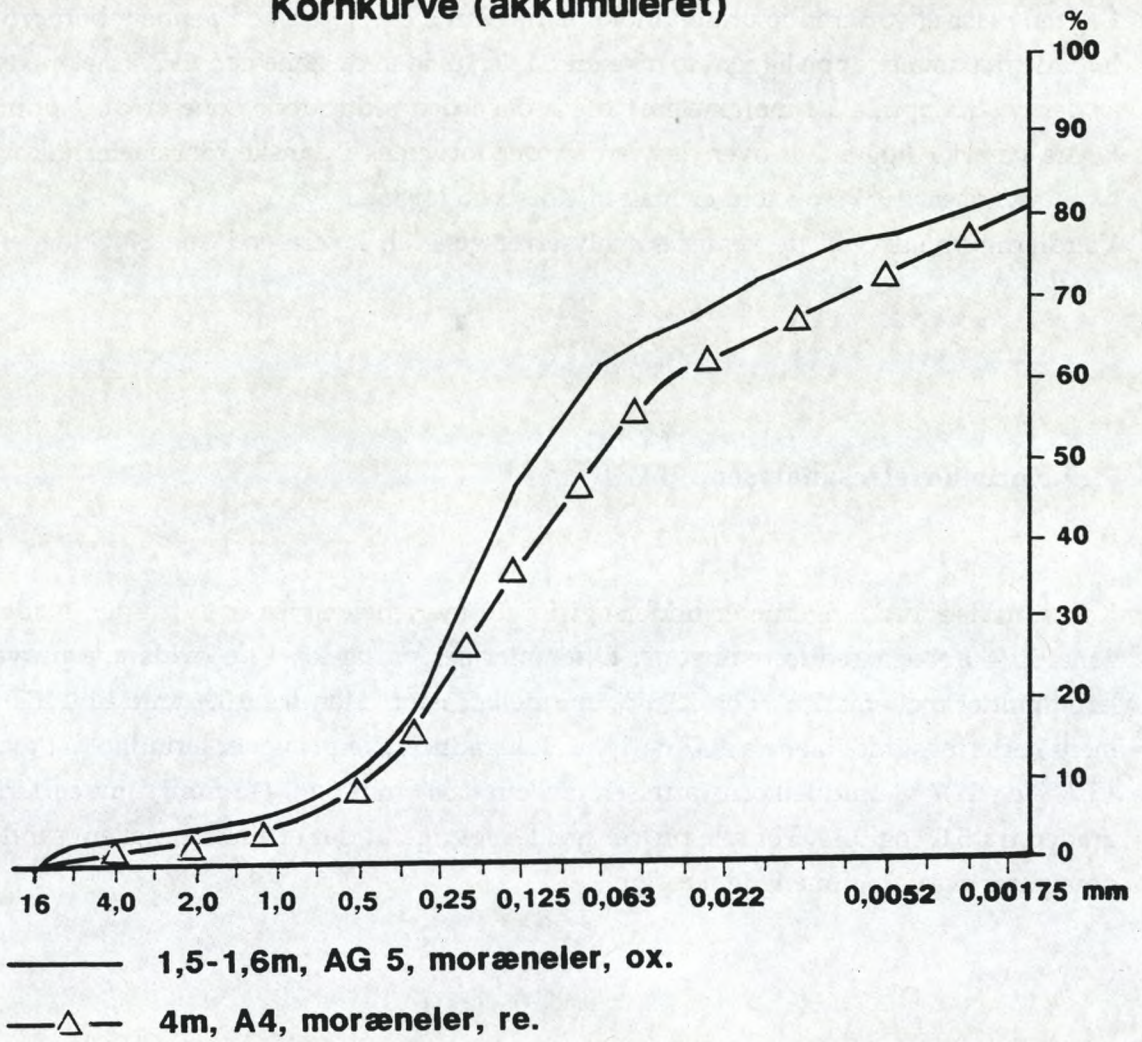


Fig. 20. Eksempler på kornstørrelsesfordelinger. Andrup.



### Specifik overflade

Overfladerne på de fem prøver viser kun små forskelle. Lagene ned til 0,6 m har en overflade på 15 m<sup>2</sup>/g stigende til 18-19 m<sup>2</sup>/g i 1,6 m u.t.. En svagt forhøjet værdi i prøven 0,9-1,0 m kan evt. skyldes jordbundsdannende processer, hvor der sker transport af lermineraller fra de øvre horisonter til dybere lag. Det organiske indhold i denne prøve er meget lavt (0,08 Wt-%).

### Anden mineralogi

Røntgenanalysen viser, at prøven fra 0,9-1,0 m er kalkfri og kvarts forekommer som den væsentligste komponent sammen med mindre mængder feldspat (mikroclin og plagioklas) og lermineraller. Prøven fra 4,0 m indeholder kalk, men minder i sammensætning i øvrigt om prøven ovenfor.

### Lermineralogi

Den lermineralogiske sammensætning viser, at i begge prøver er det dominerende mineral smectit (18Å, Mg-glycerol). Desuden forekommer mindre mængder illit (10Å, Mg-luftrør, kaolinit (7Å, Mg-luftrør) og vermiculit (14Å, Mg-glycerol). Det høje indhold af smectit bidrager i væsentlig grad til det høje overfladeareal for prøverne.

## 7.12 Grusindhold

Der er foretaget gruspetrografisk analyse på fire prøver. To prøver i udgravningen og to prøver fra boring A1. Sammensætningen af de stabile bjergarter (kvarts, granit og gnejs) er meget lig hinanden i det oxiderede og det reducerede moræneler, hvilket viser at der er tale om den samme morænelersenhed. I den øvre kalkfrie del er der kun set et enkelt korn af Palæozoisk kalksten. I den nedre kalkholdige del (11-17 % CaCO<sub>3</sub>) dominerer de palæozoiske kalksten over Maastrichtien/Danien kalksten. Det viser, at isen, der har aflejret moræneleret er kommet fra det baltiske område, og morænelersenheden kan således henføres til afsnittet Warthe i slutningen af Saale istiden (Sjørring & Frederiksen, 1980).

Kalkfrie, brunlige og gullige, sandede moræneler-aflejringer kendes ligeledes i Esbjerg området, og de henføres til et ældre afsnit i Saale, Drenthe (Sjørring & Frederiksen, 1980). I Esbjerg området har man således tidligere på flere lokaliteter kunne se, at ældre gråbrune Drenthe-aflejringer ligger ovenpå yngre olivengrå Warthe-aflejringer. Dette kan f.eks også ses i vandforsyningsboringer som DGU ark. nr. 130.1184 (Gravesen, 1995b) tæt ved undersøgelsesområdet. Imidlertid viser denne undersøgelse, at de øvre gulbrune og rødgyldne lag er den oxiderede udgave af Warthe moræneleret.



### 7.13 Organisk indhold

Det organiske indhold er meget lavt i de fleste morænelersprøver (0,07-0,3 Wt-%), bortset fra i en prøve i 0,6 meters dybde i bor 130.1364 (1,14 Wt-%). I denne prøve er der også registreret muldmateriale i moræneleret.

### 7.14 Sammenfatning

De gamle moræneaflejringer ved Andrup er delt op i en øvre oxideret zone og en nedre reduceret zone. Med hensyn til uran og radium indholdet i de to zoner ser der ikke ud til at være de store forskelle i værdierne, dog er der en svag antydning af lidt højere værdier i den oxiderede zone. Radon emanations rate værdierne viser imidlertid en klar forskel i niveau mellem de to zoner med de højeste rater i den oxiderede, forvitrede zone, og med de laveste værdier i den reducerede zone, som samtidig er de laveste målte for moræneler ved hele undersøgelsen.

Alle de undersøgte karakterer ved morænelersenhederne peger på, at det aldersmæssigt er den samme enhed i den to zoner, og forskellen i radon emanations rater må her skyldes forskel i fysisk forvitring og redoxforhold, der har gjort at radon potentiale og transportforhold er blevet forøget i den oxiderede zone.

Radon emanations raterne i mulden er også forholdsvis høje, og i alle tilfælde højere end det reducerede morænelers værdier.



---

## 8. LUNDEBORG, FYN

---

### 8.1 Lokalitet

Undersøgelsen blev udført ved Bolsmosevej, lige ved nedkørslen til Egemosegård sydvest for Lundeborg (fig.21).

Der blev boret fem boringer og foretaget en udgravning d. 15 maj 1995, som blev undersøgt d. 16 maj 1995. Boringerne blev lagt på en knækket linie vest-øst - nord-syd og udgravningen blev placeret mellem bor DGU ark. nr. 165.364 (L1) og DGU ark. nr. 165.366 (L3) (fig.22). Terrænet ligger i kote + 32 m bortset fra ved boring DGU ark. nr. 165.367 (L4), hvor terrænet findes i kote + 31 m.

### 8.2 Boringer og prøver

Fire 8" snegleboringer blev udført af Samfundsteknik A/S (DGU ark. nr. 165.364 (L1), 165.365 (L2), 165.366 (L3), 165.367 (L4)). Grundvandsspejlet blev ikke nået. Der blev taget prøver kontinuert fra sneglen, som blev geologisk beskrevet på stedet efter GEUS procedure (Gravesen & Knudsen, 1981, Larsen et al. 1995).

I boringerne er der øverst muld. Derunder er der truffet glacigene aflejringer i form af tre morænelerenheder og en morænesandenhed. Boreprofiler er vedlagt i bilag B. Et geologisk tværprofil gennem boringerne ses på fig. 23.

Den øverste enhed truffet i boringer er brun muld, som er sandet, svagt leret, kalkfri og med en del planterødder (0,2 - 0,5 m).

Under muldlaget er der truffet morænesand og moræneler med varierende indhold af silt og sand. Gulbrunt, svagt leret morænesand findes i bor L4 indenfor den øverste meter samt i profilet fra graverenden. Det er kalkfrit og indeholder lidt grus og sten.



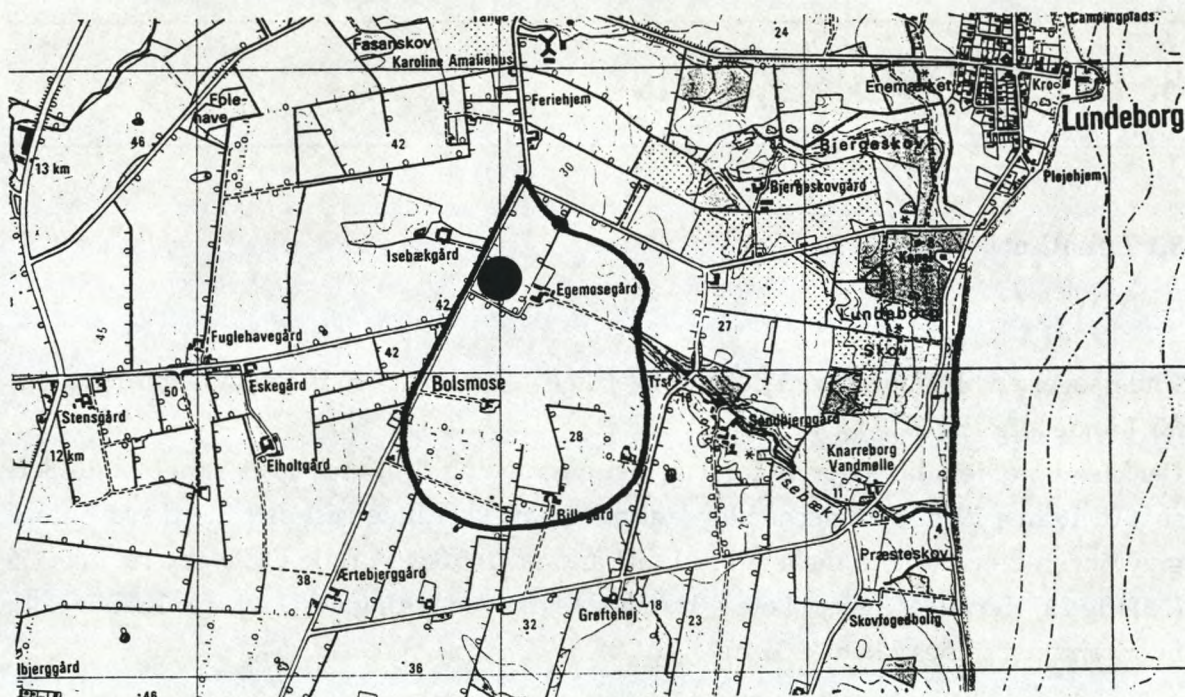


Fig. 21. Undersøgelingslokaliteten ved Lundeberg, Østfyn i 1:25.000. Kortblad 1312 II Svendborg (Med tilladelse fra Kort- og Matrikelstyrelsen).

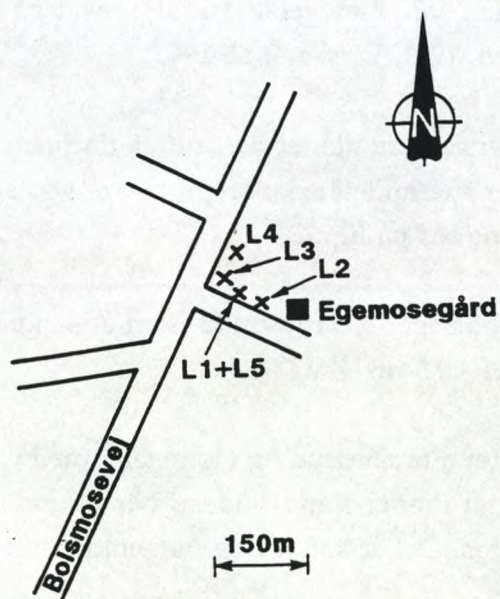


Fig. 22. Skitse over lokaliteten ved Lundeberg, med angivelse af boringernes placeringer.



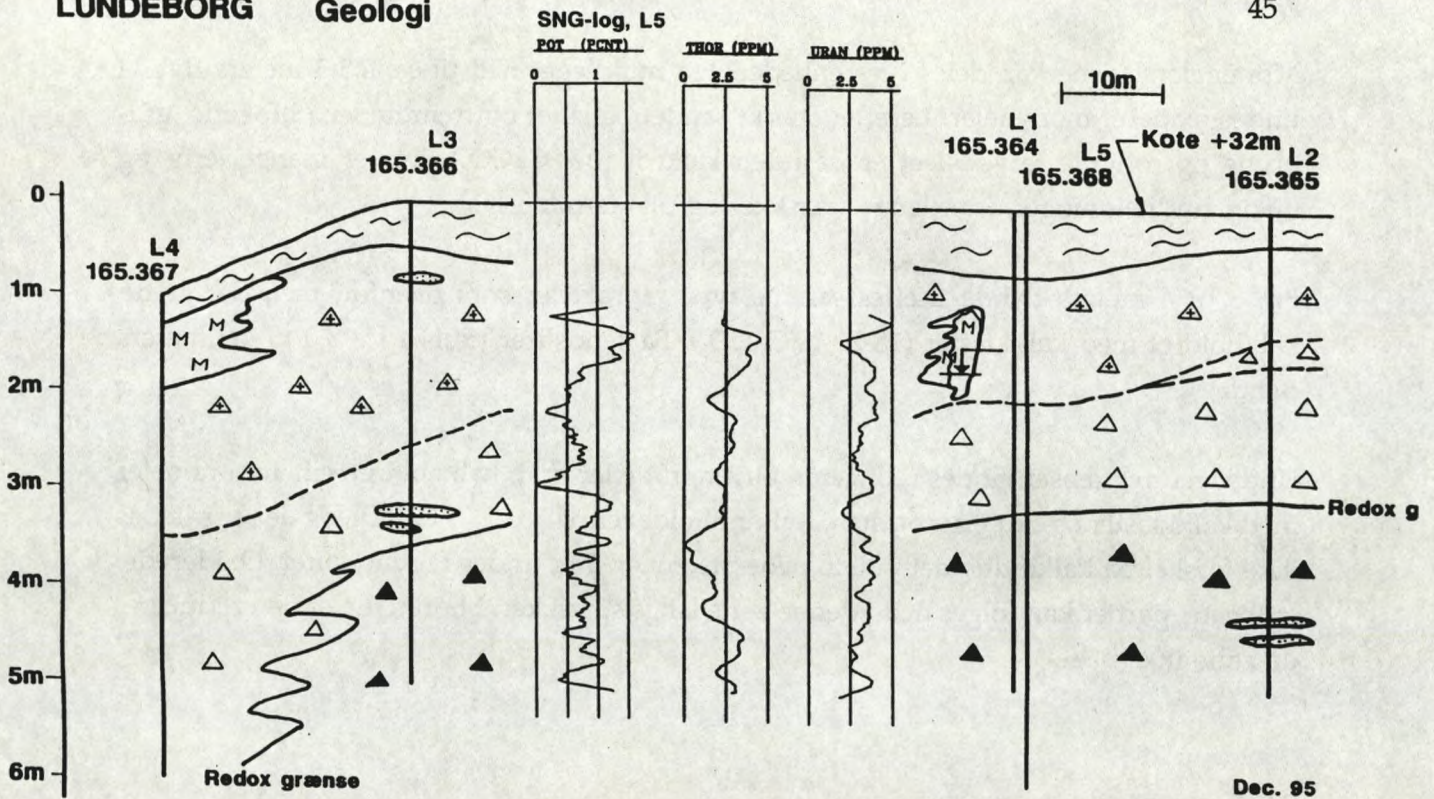


Fig. 23. Lundeberg. Geologisk tværprofil gennem boringer og graverende. Signaturforklaring på fig. 5.

LUNDEBORG Geologi, Uran i ppm, Radium i Bq/kg og Radon i Atomer/(s·kg)

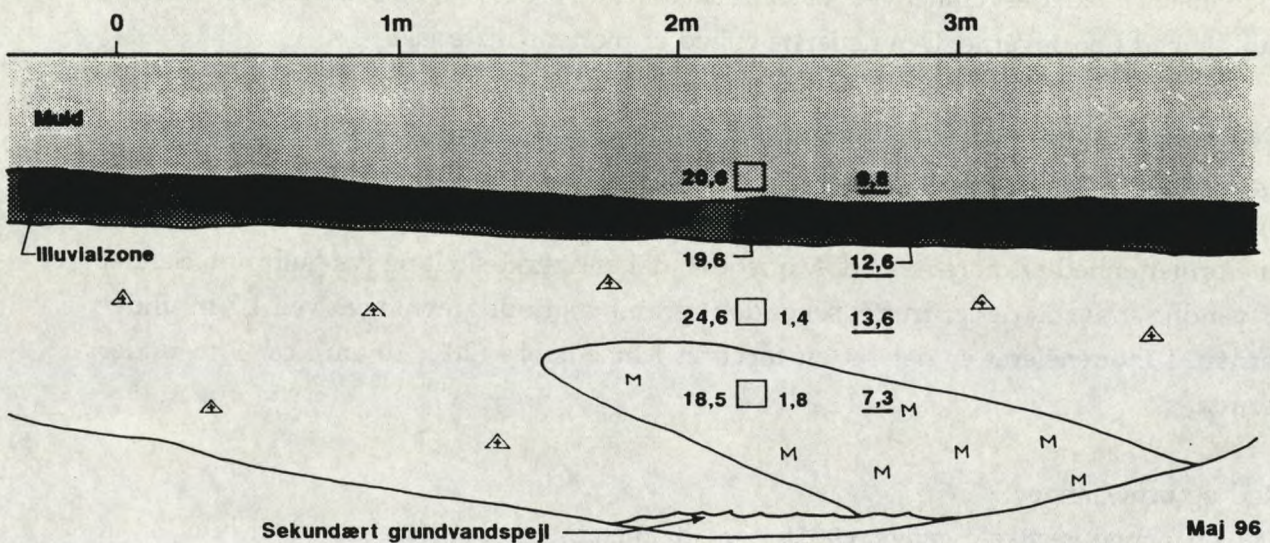


Fig. 24. Profil i graverenden, Lundeberg. Der er angivet prøvetagning med en firkant, radiumindhold til venstre, uranindhold til højre og radon emanations rater med streg under.



Morænelerslagene kan deles i tre enheder. Fra muldlaget ned til ca. 2,5-3 meters dybde findes oxideret moræneler. Leret er stærkt sandet og siltet og fremtræder i brogede, gulbrune og rødgyldne farver. Det er desuden kalkfrit (0%  $\text{CaCO}_3$ ). Der er mange jern- og manganudfældninger, især langs sprækker og planterødder.

Fra 3 til 4 meters dybde træffes samme type moræneler som ovenfor, men det er nu kalkholdigt med kalkklaster (18-21 %  $\text{CaCO}_3$ ). Få sandslirer træffes fra 3,0 til 4,0 meters dybde.

Under redoxgrænsen findes reduceret, olivengråt eller gråt, kalkholdigt, siltet moræneler med kalkklaster og lidt grus og sten. Kalkindholdet er på 18-21 %  $\text{CaCO}_3$ , og der er således ikke forskel på kalkindholdet i de to nederste zoner. Der findes få sand-slirer. Oxiderede, gulbrune partier kan følges ned i denne zone langs sprækker. I boring L4 er den reducerede zone ikke nået.

### 8.3 Graverende og prøver

Graverenden er udført til 1,80 meter under terræn ved boring DGU nr. 165.364 (fig.24). De to øverste enheder er dannet ved jordbundsdannende processer, og svarer til den øverste muldenhed i borerne. Den nederste enhed er moræne materiale.

Den øverste enhed er et sandet, brunt muldrag (0,4 m tyk), med en underliggende sandet og leret illuvialzone (nedvaskningszone) (15-20 cm tyk) med brune og sorte farver. Derunder findes broget brunt og rødgyldt moræneler, som er sandet og siltet, hvori der er en kileformet enhed af morænesand. Morænesandet er stærkt siltet og lys gulbrunt. Sandet er vandførende, og der er truffet sekundært grundvand i udgravningen ved 1,7 m under terræn. I moræneleret er der set en forvitret Kinnediabas (20 x 30 cm), ca. 1 m under terræn.

#### Rod og ormegange

Der er mange vertikale gange, ca 0,5 cm i diameter, som kan følges ned til bunden af udgravningen, 1,8 m under terræn. Væggene i gangene er ofte belagt med organisk materiale, og en del af dem indeholder rødder (fig.25).

Ifølge MacKeague et al., (1986) kan permeabiliteten for moræneleret vurderes til  $k=10^{-14} \text{ m}^2$  og den hydrauliske ledningsevne til  $K=10^{-6} \text{ m/s}$ .



## 8.4 Aflejringernes alder

Det øvre muldrag er fra Postglacial tid, der strækker sig 10.000 år tilbage i tid. De to morænelersenheder kan være fra to forskellige baltiske isfremstød i Weichsel. Den nederste er aflejret af den Gammel Baltiske isstrøm for ca. 60.000 år siden, mens den øverste kan være aflejret af NØ-isen for ca. 18.000 år siden eller af den Ungbaltiske isstrøm for ca. 15.000 år siden (Petersen et al., 1988, Gravesen & Nyegaard, 1990). Det kan heller udelukkes, at de to moræneenheder er fra samme isfremstød.

## 8.5 Vandindhold og nedbørsforhold

Vandindhold blev målt på muld (5), morænesand (3) og moræneler (14). Prøverne dækker et interval på 0,3-4,0 m.u.t.

Muldprøverne viser en variation mellem 6,6-11,3 %, mens moræneler varierer mellem 9,5 og 13,9%. Morænesand ligger mellem 10,5 og 13,8 %.

Muldlagets lave værdier forklares ved, at der i 5 dage forud for prøvetagning d. 15/5-95 ikke faldt nogen nedbør.

Vandindholdet i prøverne overskred ikke grænseværdien for indflydelse på emanationen.

## 8.6 Uran og thorium indhold

Der er undersøgt 17 prøver for indhold af uran (U) og thorium (Th). På fig. 24 og 26 ses fordelingen i borer og graverende. To værdier i mulden er på 1,0 og 1,3 ppm U. I den kalkfri, oxiderede zone har morænesandet værdier mellem 1,2 og 1,5 ppm U, mens moræneleret ligger mellem 1,3 ppm og 1,9 ppm U (middelværdi 1,62 ppm). I den kalkholdige oxiderede zone er værdierne mellem 1,1 ppm og 1,7 ppm U (middelværdi 1,48 ppm). To værdier på 1,2 ppm og 1,4 ppm findes fra det reducerede moræneler. De højeste værdier synes således at være i den oxiderede kalkfri zone, men generelt er værdierne lave (Engell-Jensen et al., 1984, Skov- og Naturstyrelsen, 1987).

Thorium indholdet ligger mellem 4,2 ppm og 8,5 ppm.





Fig. 25. Ormehuller/rodgange i oxideret moræneler set ovenfra. Graverenden ved Lundeborg.

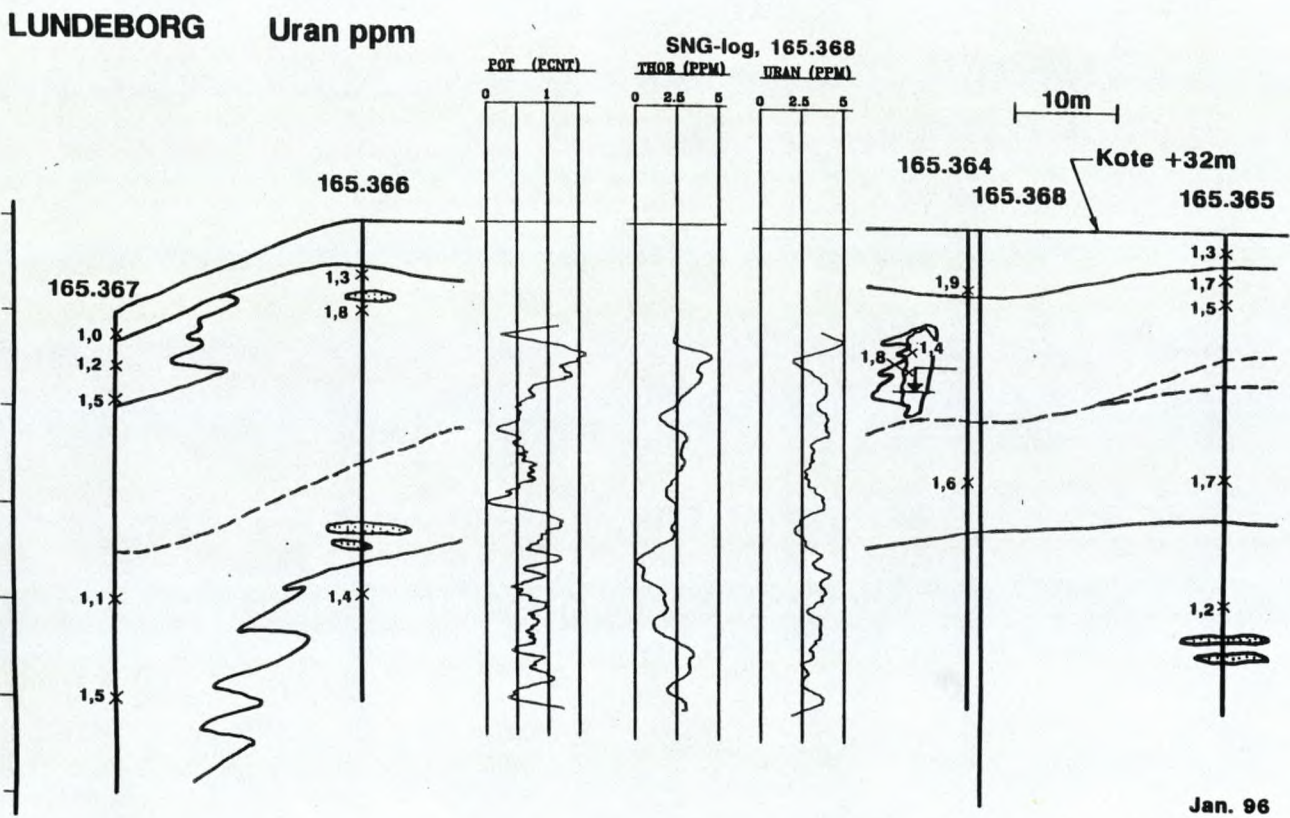


Fig. 26. Tværprofil med uranværdier. Lundeborg. Se geologi fig. 23.



## 8.7 Radium indhold

Der er målt radium på 25 prøver (fig.27). Radiumværdierne følger de geologiske enheder. Indenfor muldlaget ligger værdierne mellem 19,2 Bq/kg og 24,3 Bq/kg med en enkelt lav værdi på 15,5 Bq/kg. Aritmetrisk middelværdi og standardafvigelse er på 20,5 Bq/kg  $\pm$  2,7. En måling i illuvialzonen giver 19,6 Bq/kg.

I det oxiderede, kalkfri moræneler ligger værdierne mellem 13,8 Bq/kg og 24,9 Bq/kg med en aritmetrisk middelværdi med standard afvigelse på 20,1  $\pm$  3,5 Bq/kg. I det oxiderede, kalkfri morænesand er målt værdier på 14,8 Bq/kg og 20,1 Bq/kg. I det oxiderede, kalkholdige moræneler træffes værdier mellem 14,1 Bq/kg og 20,1 Bq/kg med en middelværdi på 16,4 Bq/kg  $\pm$  2,2.

Endelig er der i det reducerede, kalkholdige moræneler målt mellem 14,8 og 15,5 Bq/kg radium med en middelværdi på 15,2  $\pm$  0,3 Bq/kg. Det ser således ud til at radiumniveauet falder nedad i profilet, men det skal dog bemærkes, at værdien i 4 meters dybde i bor L4 i den oxiderede, kalkholdige zone er på 14,4 Bq/kg, og dermed på niveau med den reducerede zone.

## 8.8 Radon emanation

Der er målt radon emanations rater på 24 prøver (fig.28). I muldlaget er værdierne mellem 7,8 og 12,7 atomer/(s\*kg) med en middelværdi på 10,0  $\pm$  1,8 atomer/(s\*kg). I det oxiderede, kalkfrie moræneler er der fra 8,8 til 15,6 atomer/(s\*kg), mens der i det oxiderede, kalkfrie morænesand er målt 5,3-7,6 atomer/(s\*kg). En samlet middelværdi for de oxiderede, kalkfrie morænejordarter er på 10,4  $\pm$  3,4 atomer/(s\*kg) svarende til middel høje værdier ifølge Damkjær og Korsbech (1985). I det oxiderede, kalkholdige moræneler er der mellem 4,6 og 6,8 atomer/(s\*kg) (Middelværdi 5,5  $\pm$  0,7 atomer/(s\*kg)). Endelig er der målt radon emanations rater mellem 3,2 og 6,5 atomer/(s\*kg) i der reducerede moræneler (Middelværdi 4,6  $\pm$  1,4 atomer/(s\*kg)).



**LUNDEBORG Radium Bq/kg**

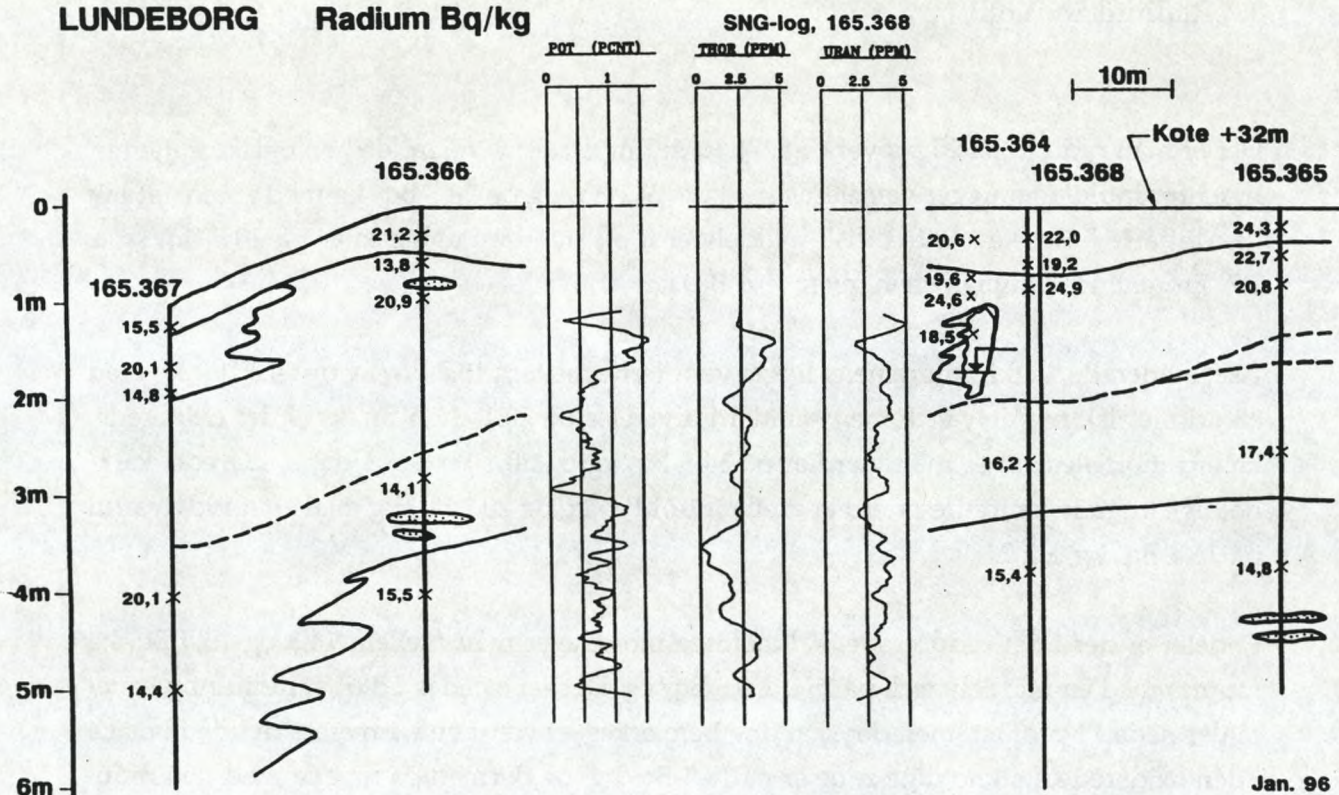


Fig. 27. Tværprofil med radiumværdier. Lundeberg. Se geologi fig. 23.

**LUNDEBORG Radon emanations rater i Atomer/(s·kg)**

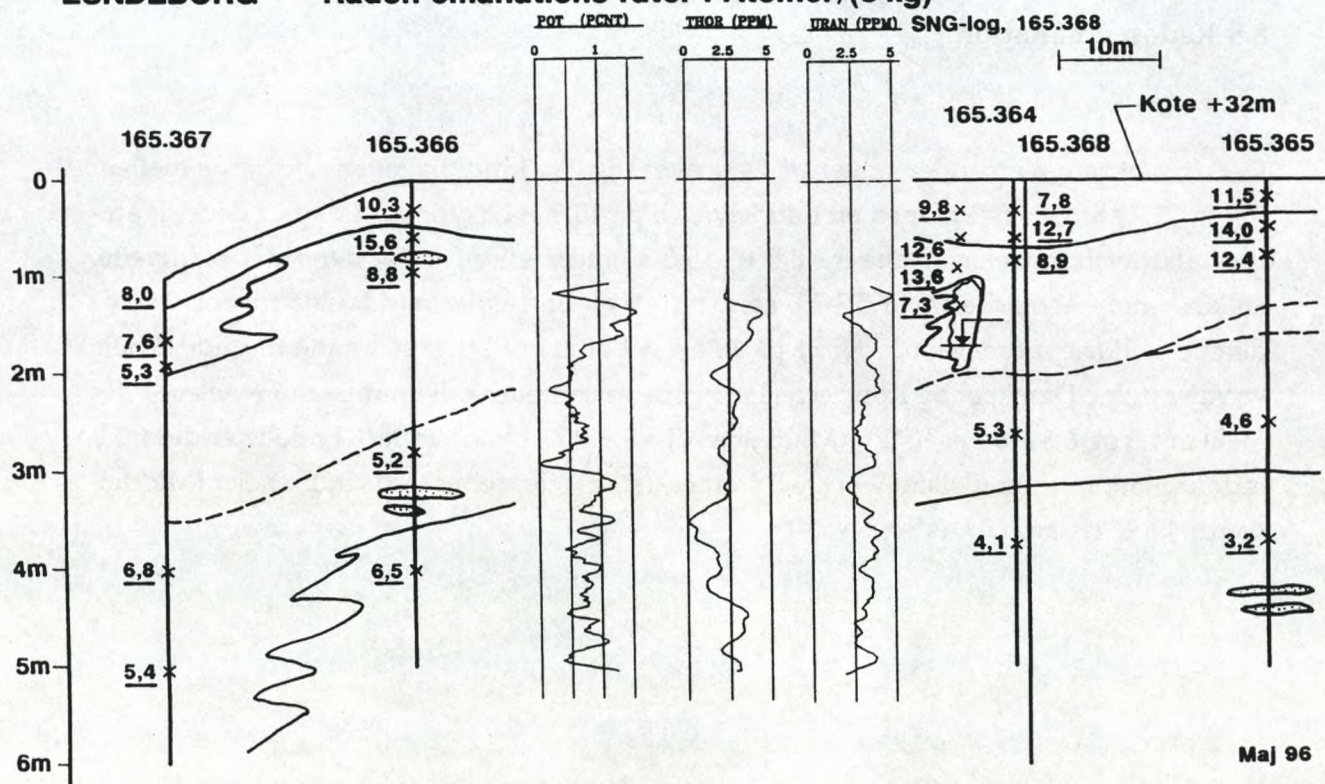


Fig. 28. Tværprofil med radon emanations rater. Lundeberg. Se geologi fig. 23.



## 8.9 SNG-borehulslog

Der er udført en 6" snegleboring til 6 meters dybde (DGU Borearkiv nr. 165.368 (L5)) (fig.23). Den blev før SNG-logningen (Engell-Jensen, 1981) udstyret med et 125 mm pvc-rør. Uranværdierne (eU) ligger næsten alle over 2,5 ppm. En enkelt top når 5 ppm, mens en del ligger på 3-4 ppm. Værdierne ligger over allerede registrerede værdier for danske morænelersbjergarter (Skov- og Naturstyrelsen, 1987).

I forhold til de analyserede værdier er SNG-loggens værdier generelt højere (se afsnit 8.6).

## 8.10 Kornstørrelsesanalyser

Ti prøver er blevet undersøgt for kornstørrelsefordeling. Eksempler ses på fig. 29. Det oxiderede morænesand har et lerindhold på 5,7-9,7 %, men indeholder langt over 50 % sand og ca. 4 % grus. Middelkornstørrelsen er 0,110-0,116 mm og sorteringsgraden er på 1,70 til 2,40.

Det oxiderede moræneler har et lerindhold på 12,7-20,5 %, middelkornstørrelse på 0,083 mm til 0,148 mm og sorteringsgrad på 3,65 til 8,19. Det reducerede moræneler indeholder 13,3 % ler, har middelkornstørrelse på 0,119 mm og sorteringsgrad på 6,05. Fint og mellem sand dominerer mængdemæssigt alle prøverne.

## 8.11 Lermineralogi og specifik overflade

Der er undersøgt specifik overflade på to prøver fra graverenden ved Lundeborg (0,9-1,0 m og 1,2-1,3 m) liggende i den oxiderede zone. Desuden er der ved røntgenanalyse bestemt lermineralogi og anden mineralogi på to prøver (graverende 0,9-1,0 m og 3,0 m boring L2). De anvendte metoder er beskrevet i bilag A.

### Specifik overflade

Overfladens størrelser bestemt i to dybder udviser tydelige forskelle. I dybden 0,9-1,0 m er overfladen bestemt til 19 m<sup>2</sup>/g og i 1,2-1,3 m til 10 m<sup>2</sup>/g. Forskellen må primært begrundes i kornstørrelses sammensætning og indholdet af organisk stof.



### Anden mineralogi

Den kalkfrie prøve fra 0,9-1,0 m er domineret af kvarts samt mindre mængder feldspat (mikroclin og plagioklas) samt lerminerale. I prøven fra 3,0 m findes desuden kalk.

### Lermineralogi

Det dominerende lermineral er smectit (18Å, Mg-glycerol) samt vermiculit (14Å, Mg-glycerol), illit (10Å, Mg-luftrør) og kaolinit (7Å, Mg-luft). Desuden forekommer mindre mængder af illit-smectit (10-14Å, Mg-luftrør). Indholdet af vermiculit er højere ved 0,9-1,0 m end ved 3,0 m.

## 8.12 Grusindhold

Forholdet mellem kvarts, flint, gnejs/granit og sedimentære bjergarter er meget lig hinanden i det oxiderede og det reducerede moræneler.

I det oxiderede kalkfri moræneler er der kun set få Maastrichtien/Danien kalksten og ingen palæozoiske kalksten.

I det reducerede moræneler derimod, er der en overvægt af Palæozoisk kalksten i forhold til de andre kalksten, hvilket indikerer at moræneleret er aflejret af en baltisk isstrøm.

## 8.13 Organisk indhold

Generelt er der målt lave værdier, undtagen i moræneleret helt oppe under muldlaget, hvor der i L3 er målt 0,45 wt-% organisk stof.

## 8.14 Sammenfatning

Moræneaflejringerne ved Lundeberg er opdelt i en oxideret og reduceret zone, således at den oxiderede zone både har en øvre kalkfri del og en nedre kalkholdig del. Aflejringerne er dannet af gletscher kommende fra det baltiske område, men det er lidt vanskeligt at bestemme sikkert på hvilket tidspunkt indenfor Weichsel tidsafsnittet, det er sket. De undersøgte karakterer kan dog godt underbygge, at de er fra samme tidspunkt.



Indholdet af uran og radium samt radon emanations rater falder nedad fra det oxiderede lag til det reducerede lag. Niveauet for det reducerede, uforandrede moræneler er imidlertid højere end ved Andrup. Forskellen mellem zonerne er således betinget af fysisk forvitring, udvaskning og redox forhold, der har gjort, at den oxiderede zone har højere emanations rater og større transport muligheder.

Muldlaget har et særdeles højt uran og radium indhold, og radon emanations raterne ligger på niveau med de oxiderede moræneaflejringer.

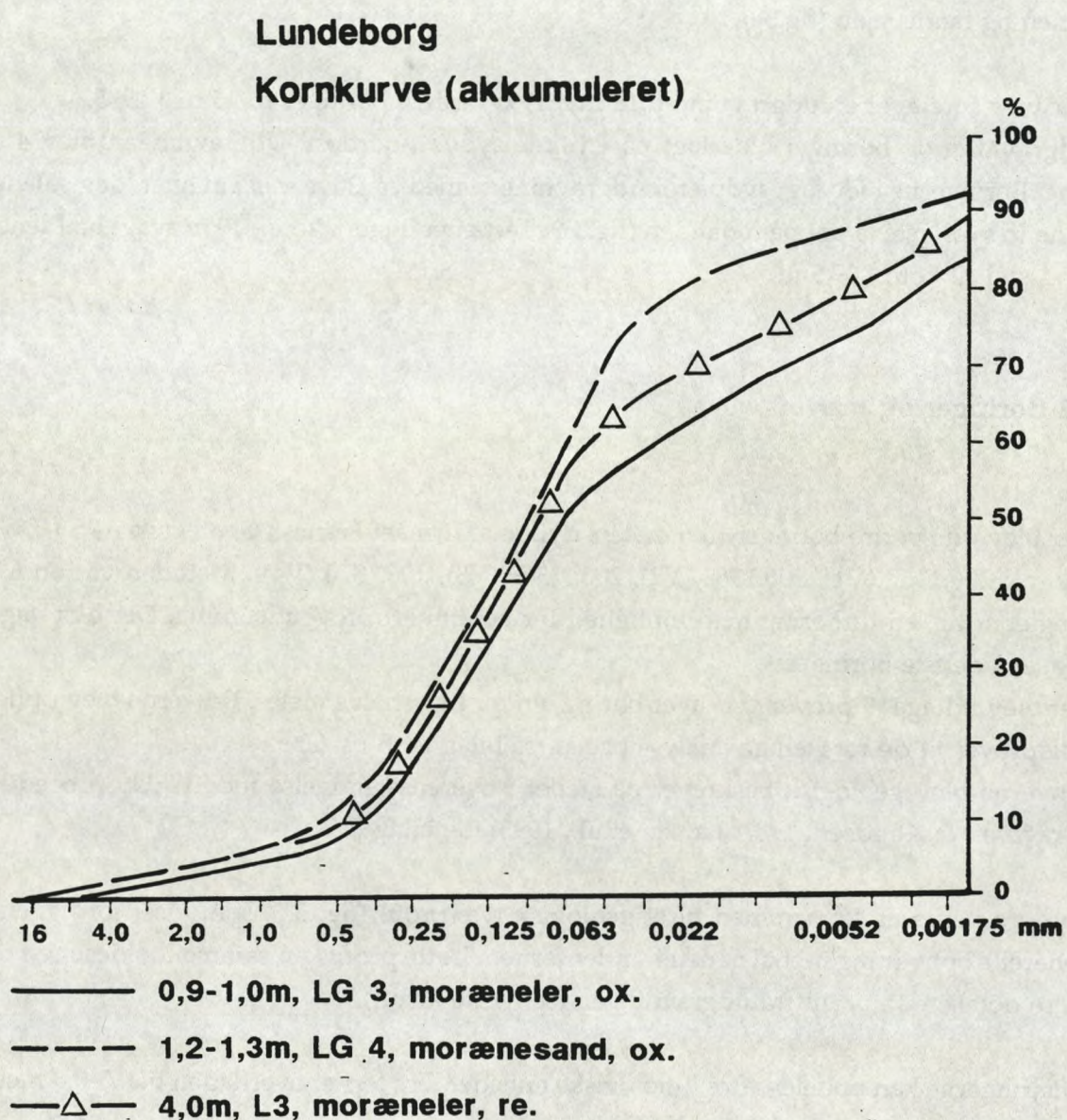


Fig. 29. Eksempler på kornstørrelsesanalyser. Lundeborg.



---

## 9. VIBY, SJÆLLAND

---

### 9.1 Lokalitet

Feltarbejdet blev udført på en natur græsmark i den nordøstlige del af Viby mellem jernbanen og landevejen (fig.30).

Der blev foretaget en udgravning d.15 maj 1995 og fem boringer d. 16 maj 1995. Udgravning og boringer blev lagt på en linie sydvest-nordøst. Udgravningen blev 4 m lang. Boringerne blev lagt sydpå for udgravningen med ca. 20 m mellem hver, dog således at de to sydligste lå tæt på hinanden (fig.31). Terrænet ligger i kote +40 m svagt hældende mod syd til kote +39,5 m.

### 9.2 Boringer og prøver

Der blev udført fire boringer til 5 meters dybde af firmaet Francks Geoteknik A/S ( DGU ark. nr. 206.1367 (V1), 206.1368 (V2), 206. 1369 (V3), 206.1370 (V4)). Metoden var en 6,5" snegleboring, en tørboring med mulighed for kontinuert prøveudtagning. Der blev taget prøver i de fire boringer.

Der blev udtaget 9 prøver ved hver boring, en for hver halve meter. Prøverne blev opdelt i delprøver til de forskellige analyseformål (se bilag A, B og C).

Prøverne blev geologisk beskrevet på stedet i overensstemmelse med GEUS procedure (Gravesen & Knudsen, 1981, Larsen et al., 1995) (Se bilag B).

Boreprofilerne er sat sammen til et geologisk tværprofil (fig. 32), som viser jordlagenes generelle opbygning ned til 5 meter under terræn. Dette profil kan sammenholdes med det mere detaljerede profil fra udgravningen (se næste afsnit).

Aflejringerne kan opdeles i fire lithologiske enheder. Fra terrænoverfladen til 0,3-0,8 meter under terræn findes sandet, brun muld.

Derunder følger fra 0,8 m til 1,0-2,0 meter u.t. oxideret og gulbrunt ler, men i toppen er det ofte broget, lyst olivengråt med gulbrune pletter og med noget brunt organisk materia-



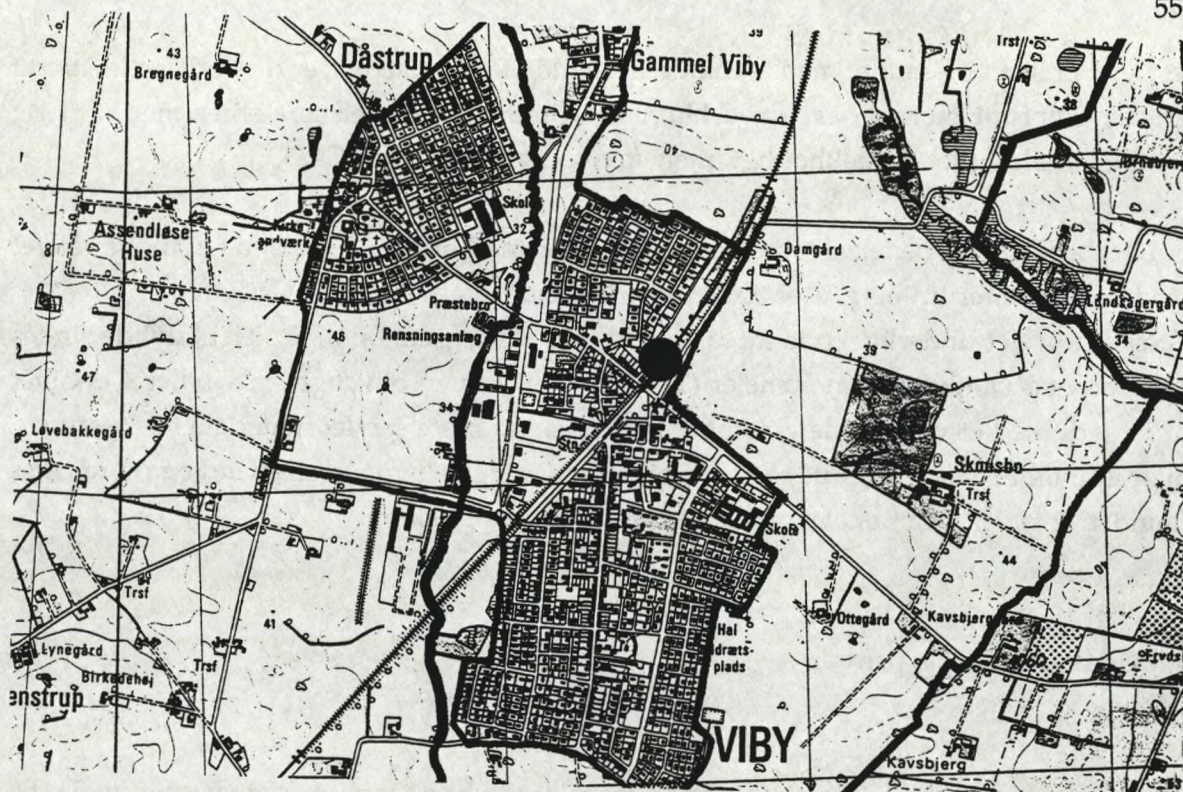


Fig. 30. Undersøgelseslokaliteten ved Viby på Sjælland. Udsnit af 1913 III Havdrup i 1:25.000 (Med tilladelse fra Kort- og Matrikelstyrelsen).

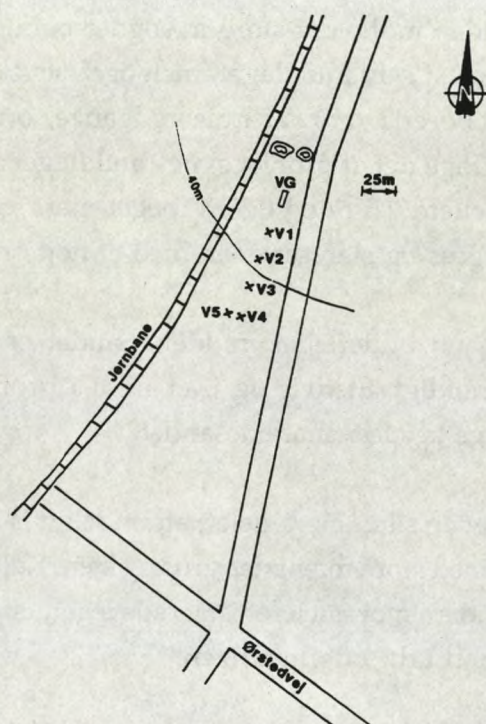


Fig. 31. Skitse over lokaliteten ved Viby med angivelse af boringernes placering.



le. Leret er siltet og sandet med et mindre indhold af grus. Stedvis er der indslag af stærkt gruset, gulbrunt morænesand med klumper af moræneler eller små slirer med sorteret sand eller silt. Leret er kalkholdigt, men stedvis kalkfrit (0-9 %  $\text{CaCO}_3$ ).

Fra det brogede morænelers bundgrænse og videre ned til 2,0-3,0 meter u.t er moræneleret oxideret, olivenbrunt og gruset. Enheden indeholder kalk (11-24 %  $\text{CaCO}_3$ ).

Grænsen til det underliggende moræneler er redoxgrænsen, og til 5 meters dybde findes reduceret og kalkholdigt moræneler (13-22 %  $\text{CaCO}_3$ ) i en olivengrå farve. Leret er siltet til ret fedt med et varierende grusindhold. Indslag af mere sandet materiale forekommer, hvor indholdet af ler ligger på grænsen af definitionen mellem morænesand og moræneler (mindst 12 % ler i moræneler). Redoxgrænsen er relativ skarp.

### 9.3 Graverende og prøver

Det udgravede profil er 4 meter langt og 1,5 meter dybt orienteret som vist på fig. 31. På fig. 33 ses en feltoptegning af profilet med fire lithologiske enheder.

Det brune, kalkfrie muldlag er mellem 0,5 og 0,8 meter tykt og overlejrer morænesand og ler med en ret skarp grænse. Mulden indeholder store mængder planterester, og tydelige lodrette rødder kan findes både nede i selv muldlaget, men også strækkende sig ned i de underliggende lag. Talrige makroporer i form af hule rodgange, ormehuller og andre hulrum kan tydelig ses. I den nordlige del af profilet synes muldlaget at blive tykkere, op mod 0,8 m. Imidlertid er laget mellem 0,5 m og 0,8 m meget mere grovkornet og indeholder store mængder forvitrede grus og sten sammen med et højt organisk indhold.

Et 0,1-0,2 m tykt lag af morænesand underlejrer mulden. Sandet er gulbrunt eller lyst olivenbrunt, ofte plettet, og kalkholdigt. Stedvis og især midt i profilet indeholder det mange sten og gruskorn. Rodgange krydser morænesandet.

Til bunden af profilet findes sandet og siltet moræneler, almindeligvis gulbrunt og olivenbrunt, kalkholdigt og undertiden med store mængder grus og sten. Kalkfri lag findes også. I den nedre del af profilet findes indeni moræneleret isolerede legemer af sandet silt og fint sand, hvorfra der sivede grundvand ud i udgravningen.

Rodgange når ned i moræneleret, hvor de ender indenfor profildybden. Hverken morænesand eller moræneler synes at være gennemskåret af markante sprækker på tværs af udgravningsretningen. Nedskridningen langs flader på langs af udgravningen tyder på



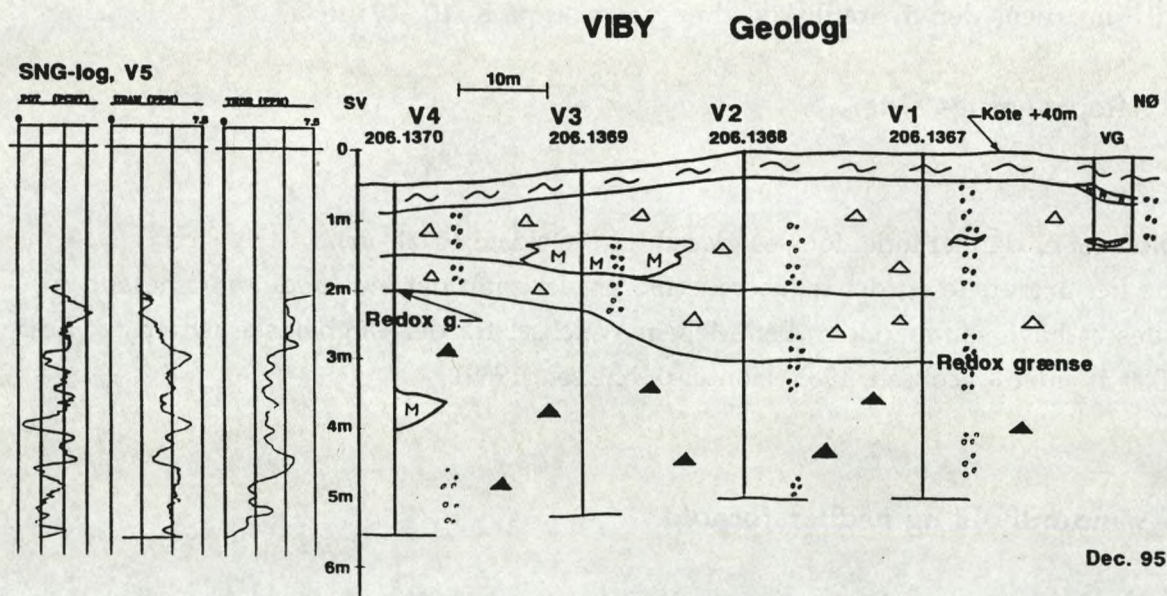


Fig. 32. Viby. Geologisk tværprofil gennem boringer og graverende. Signaturforklaring på fig. 5.

**VIBY Geologi, Uran i ppm, Radium i Bq/kg og Radon i Atomer/(s·kg)**

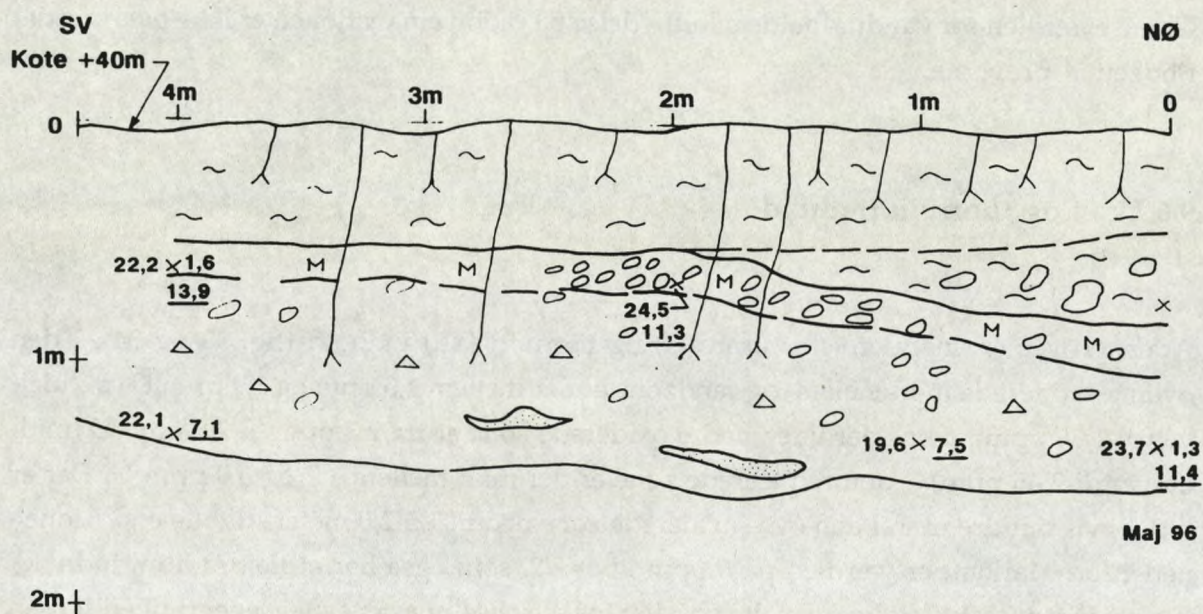


Fig. 33. Profil i graverenden, Viby. Der er angivet prøveudtagning med kryds, radiumværdier til højre, uranværdier til venstre, radon emanations rater med streg under.



sprækker i denne retning: nordøst-sydvest. Den samlede permeabilitet er vurderet til  $k=10^{14}-10^{15} \text{ m}^2$ , mens den hydrauliske ledningsevne er på  $K=10^{-7}-10^{-8} \text{ m/s}$ .

#### 9.4 Aflejringeres alder

Muldlaget er dannet indenfor Postglacial tid (de sidste 10.000 år).

Både det oxiderede og det reducerede moræneler samt det indlejrede morænesand formodes at have samme alder: Sen-Mellem Weichsel fra det Ungbaltiske isfremstød (ca. 15.000 år siden)(Jacobsen, 1985, Houmark-Nielsen, 1989).

#### 9.5 Vandindhold og nedbørsforhold

På denne lokalitet er målt vandindholdet på moræneler og morænesand, dækkende et interval fra 0,4-5,0 m. u.t.

Morænelerets vandindhold varierer mellem 6,7 og 17,8 %, medens morænesandet varierer mellem 11,3 og 13,5 %.

Efter en lang tørkeperiode fra 21/4 til 7/5-95, faldt der mellem d. 8/5 og d. 15/5, hvor prøverne blev udtaget, 25,5 mm, de sidste 3 dage dog kun 1 mm.

Grænseværdien for vandindholdets indflydelse på radon emanationen er ikke overskredet i nogen af prøverne.

#### 9.6 Uran og thorium indhold

Atten prøver er analyseret for uran (U) og thorium (Th) indhold (fig. 33 og 34). I den øverste oxiderede morænelers- og sandzone er der mellem 1,3 ppm og 1,9 ppm U (middelværdi 1,66 ppm), mens der i den nedre oxiderede zone er fra 2,3 ppm til 2,6 ppm U (middelværdi 2,45 ppm). I den reducerede zone er der målt mellem 1,7 og 6,0 ppm U. Der er tydeligvis mindre uran i den øvre oxiderede zone ned til 1,5-2,0 meters dybde end i zonen nedenfor. Markant er værdien på 6 ppm i bor V2, som også har et højt radium indhold. U-niveauet svarer til tidligere målte værdier for Weichsel-moræneaflejringer (Engell-Jensen et al., 1984, Skov-og Naturstyrelsen, 1987).

Thoriumindholdet ligger mellem 5,1 og 8,8 ppm.



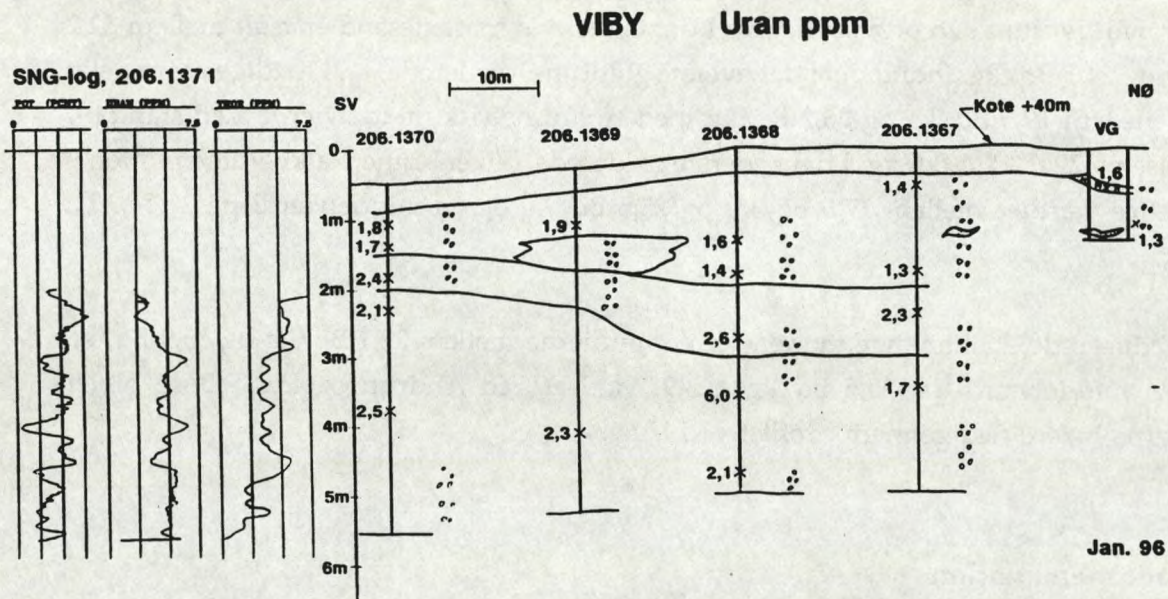


Fig. 34. Tværprofil med uranværdier. Viby. Se geologi fig. 32.

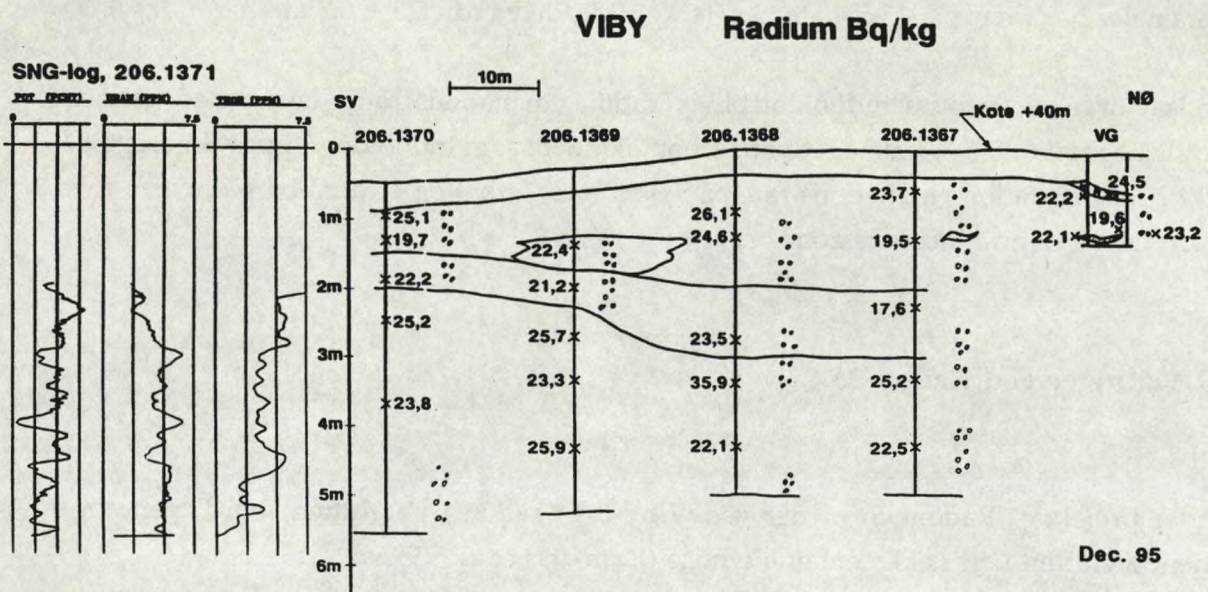


Fig. 35. Tværprofil med radiumværdier. Viby. Se geologi fig. 32.



## 9.7 Radium indhold

Der er målt radium i 25 prøver (fig.35). I det oxiderede morænesand er målt mellem 22,2 Bq/kg og 24,5 Bq/kg. Indholdet i det øverste gulbrune, oxiderede, kalkholdige moræneler ligger mellem 19,5 Bq/kg og 26,2 Bq/kg med en aritmetrisk middelværdi med standard afvigelse på  $22,6 \pm 2,4$  Bq/kg. I det nederste oxiderede, olivenbrune, kalkholdige moræneler træffes værdier mellem 17,6 Bq/kg og 23,5 Bq/kg og en middelværdi på  $21,1 \pm 2,2$  Bq/kg.

I det reducerede, kalkholdige moræneler er værdierne mellem 22,1 Bq/kg og 35,9 Bq/kg med en middelværdi på  $25,5$  Bq/kg  $\pm 3,9$ . Modsat ved Andrup og Lundeborg bliver værdierne højere ned gennem profilet ved Viby.

## 9.8 Radon emanation

Radon emanations rater er målt i 25 prøver (fig.36). I det oxiderede morænesand er der fra 7,9 til 13,9 atomer/(s\*kg) (Middelværdi  $11,0 \pm 2,5$  atomer/(s\*kg)). Det oxiderede, gulbrune, kalkholdige moræneler har rater fra 6,1 til 12,4 atomer/(s\*kg) med en middelværdi på  $8,9 \pm 1,8$  atomer/(s\*kg). Det oxiderede, olivenbrune kalkholdige moræneler har værdier på 6,9 til 9,2 atomer/(s\*kg) (Middelværdi  $6,7 \pm 1,1$  atomer/(s\*kg)). Det reducerede, kalkholdige moræneler har rater på 4,5-5,4 atomer/(s\*kg) (Middelværdi:  $5,3 \pm 0,7$  atomer/(s\*kg)).

Modsat uran og radium indholdet bliver radon emanations raten lavere ned gennem profilet. Prøven i 3,0-3,5 meters dybde i bor 206.1368, som indholder 6 ppm uran og 35,9 Bq/kg, har en radon emanations rate på 5,3 atomer/(s\*kg) og er dermed på niveau med andre rater i den reducerede zone.

## 9.9 Målinger ved Radon-95

Under projektet "Radon-95" er der ved Viby målt radon i poreluften i jordlagene og i indendørsluften i en række enfamilie huse (Damkjær et al., 1995a).

Der er blevet målt i 100 huse ialt. Der var en middelværdi på  $91$  Bq/m<sup>3</sup>. Minimum var  $0,3$  Bq/m<sup>3</sup>, mens de to højeste årsmiddelværdier var på  $260 \pm 80$  Bq/m<sup>3</sup> og  $290 \pm 80$  Bq/m<sup>3</sup>.



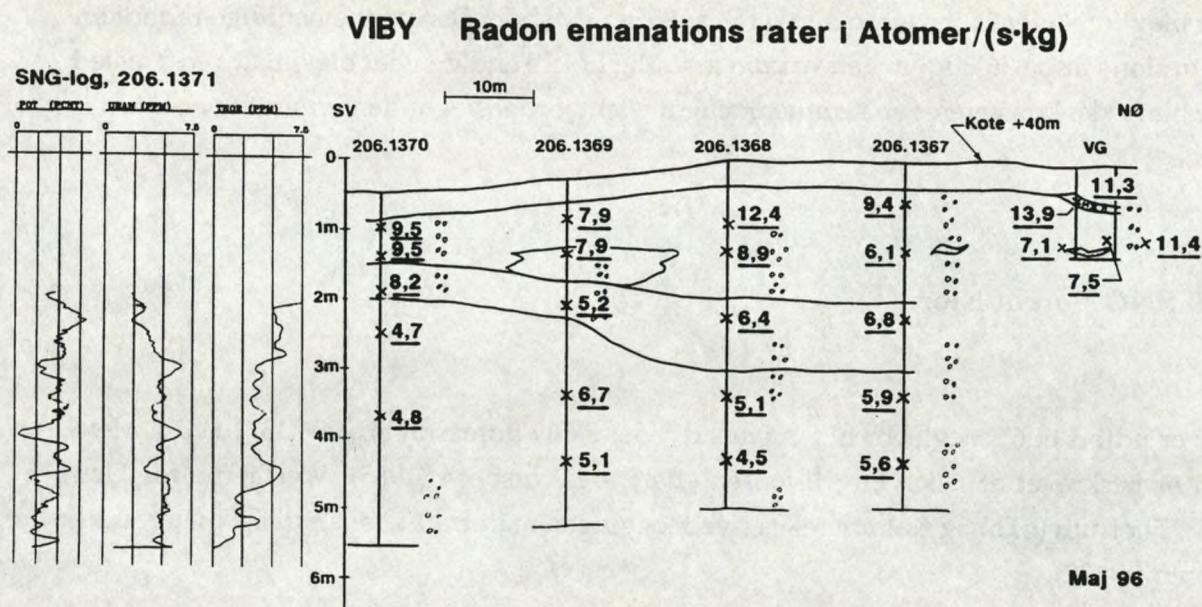


Fig. 36. Tværprofil med radon emanations rater. Viby. Se geologi fig. 32.

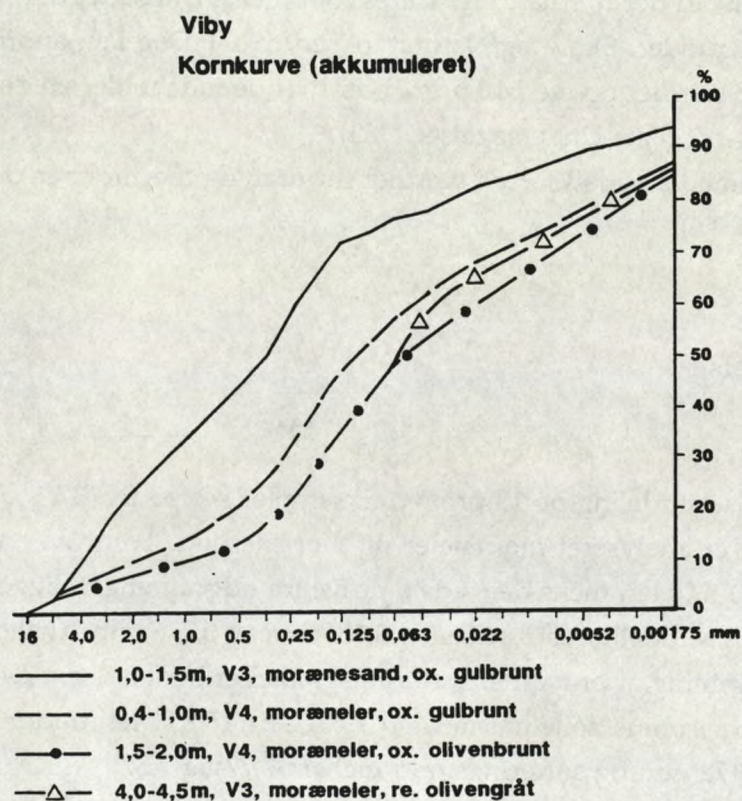


Fig. 37. Eksempler på kornstørrelsesfordelinger. Viby.



De højeste værdier i stuen var henholdsvis  $390 \pm 40 \text{ Bq/m}^3$  og  $400 \text{ Bq/m}^3$ . I alt 8 huse havde værdier over  $200 \text{ Bq/m}^3$  radon.

Der blev foretaget 18 jordgasmålinger i ca. 85 cm's dybde. Den gennemsnitlige radonkoncentration var på  $36 \text{ kBq/m}^3$ , en værdi væsentlig højere end den der blev målt ved Thisted. Der blev ikke konstateret en sammenhæng mellem jordgas og indendørsluft koncentrationerne.

### 9.10 SNG-borehulslog

Der er udført et 6" sneglebor til 5 meters dybde (DGU Borearkiv nr. 206.1371 (V5)). Metoden er beskrevet af f.eks. Engell-Jensen (1981) og Korsbech (1985). Værdierne for Uran (eU), Thorium (eTh) og Kalium (eK) er ved loggingen målt fra 1,7 meter til 5,7 meter under terræn (fig.32).

I profilet ligger værdierne generelt over 2,5 ppm, i store dele af profilet over 5 ppm og i to toppe (ca. 2,7-3,0 meter og ca. 3,7-4,0 meter) på over 6,0 ppm.

Disse værdier ligger langt over, hvad der normalt registreres for danske istidsaflejringer, som har værdier på 3 ppm og derunder (Skov- og Naturstyrelsen, 1987). Dog kan andre kvartære leraflejringer godt have værdier op mod 10 ppm, især hvis de indeholder en del organisk materiale (Danmarks Geologiske Undersøgelse, 1983).

Sammenholdes loggens værdier med de analyserede værdier for uran og thorium, ses de at være generelt højere (se afsnit 9.6).

### 9.11 Kornstørrelsesundersøgelser

Der er analyseret for kornstørrelsesfordeling på 13 prøver. Eksempler ses på fig. 37.

Fra den øverste oxiderede zone er analyseret moræneler og morænesand. To prøver af morænesandet har fra 7,0% og 11,5 % ler, mens den sidste prøve fra udgravningen ligger på grænsen til at være moræneler. Middelkornstørrelsen er 0,156 mm og 0,778 mm, hvilket viser en helt forskellig sammensætning af prøverne. Sorteringsgraden er henholdsvis 2,42 og 4,72. Tre morænelersprøver fra samme zone har mellem 13,0 % og 18,8 % ler, middelkornstørrelse på 0,098 mm til 0,172 mm og sorteringsgrad mellem 2,77 og 7,87.



I den nedre oxiderede zone er der tre morænelersprøver med mellem 14,3 % og 18,8 % ler, middelkornstørrelse på 0,092 mm til 0,128 mm og sorteringsgrad på 6,66 til 8,44.

I det reducerede moræneler findes en kile af morænesand, hvorfra en prøve indeholder 11,7 % ler, d.v.s meget tæt på grænsen til at være moræneler (middelkornstørrelse: 0,129, sorteringsgrad: 5,1). Fire morænelersprøver fra zonen har mellem 13,8 % og 19,7 % lerindhold. Middelkornstørrelsen er fra 0,093 mm til 0,136 mm og sorteringsgraden på 5,59 til 8,44. Alt i alt må aflejringerne siges, at være meget ensartet sammensat.

## 9.12 Lermineralogi og specifik overflade

Der er foretaget måling af specifik overflade på fem prøver fra Viby udtaget fra graverenden (0,7 m (1), 1,3 m (2), 0,7 m (5), 1,3 m (8), 1,3 m (10)). Der er desuden analyseret med røntgen for anden mineralogi og lermineralogi på to prøver (1,3 m og 2,0-2,5 m fra bor V4).

### Specifik overflade

De fundne overflade størrelser på denne lokalitet varierer mellem 9 m<sup>2</sup>/g og 13 m<sup>2</sup>/g uden nogen påfaldne forskelle relateret til dybden.

### Anden mineralogi

Begge prøver er kalkholdige. Desuden indeholder prøverne kvarts samt nogen feldspat (mikroklin og plagioklas), glimmer og lerminerale.

### Lermineralogi

Prøven fra 1,3 m indeholder betydelige mængder smectit (18Å, Mg-glycerol) samt vermiculit (Mg-glycerol), illit (10Å-Mg-luft), kaolinit (7Å, Mg-luftrør) samt illit-smectit (10-14Å, Mg-luftrør). Prøven fra 2,0-2,5 m indeholder foruden de allerede nævnte mineraler tillige chlorite (7Å, K-300 C), der typisk findes ved eller under grænsen mellem den oxiderede og reducerede zone (Ernstsen, 1990, Ernstsen et al., 1990). Indeholdet af vermiculit er lidt lavere for denne prøve end for prøven højere oppe.

## 9.13 Grusindhold

Grusindholdet er ens i den oxiderede og reducerede zone. Gruset indeholder meget gnejs/-granit og kun lidt flint og kvarts. Indholdet af palæozoiske kalksten er dobbelt så stort som indholdet af Maastrichtien/Danien kalksten, hvilket indikerer, at moræneleret er aflejret af en baltisk isstrøm.



### 9.14 Organisk indhold

Det organiske indhold er meget beskedent i både moræneler og morænesand i Viby området. Der ser ud til at være forskelligt indhold over (ca. 0,1 Wt%) og under redoxgrænsen (ca. 0,2 wt%) (fig.32). Dette afspejler således den oxidation i jordlagene ned til den nuværende redoxgrænse, som er sket siden sidste istid (ca. 13.000 år siden). Det oprindelige, meget beskedne organiske indhold i de reducerede moræneler må antages at stamme fra ældre aflejringer: Interglaciale-interstadiale-ældre glaciale eller prækvartære, som isen har bevæget sig henover i slutningen af Weichsel istiden.

Fordelingen med lave værdier over redoxgrænsen og høje under genfindes ikke i morænelerslagene hos Ernstsen (1989), hvor der ikke synes at være nogen markant forskel.

### 9.15 Sammenfatning

Moræneaflejringerne ved Viby er alle overvejende kalkholdige, men opdelt i en oxideret og reduceret del. I det oprindelige moræneler, som stadig er reduceret, er uran og radium indholdet højere end i de oxiderede lag, mens radon emanations raterne ligesom ved de andre lokaliteter er højest i den oxiderede zone. Dog er radon værdierne for reducerede zone højere end for de tilsvarende reducerede lag ved de andre lokaliteter med ældre moræneaflejringer. Prøven med det høje uran og radium indhold i den reducerede zone har ikke højere radon emanation end de andre prøver i zonen.

Ved denne lokalitet er redox og forvittringsforhold også styrende for radon emanations raterne, men alderen synes også at have betydning for værdierne.



---

## 10. NORDBORNHOLM

---

På Nordbornholm er der udført feltarbejde og samlet prøver på to lokaliteter d. 17 og 18 oktober 1995. Lokaliteterne er valgt ud efter, hvor husene med de højeste indendørs radon-niveauer er registreret under Radon-95 projektet (Damkjær et al., 1995a) (fig.38).

### 10.1 Allinge -Sandvig

I området omkring Nørregade i Allinge, blev det valgt at udtage prøver, hvor der er en skæring ned i jordarter og Hammer Granit. Dette var tilfældet i Kampeløkke Å, som løber ud til Østersøen lige nord om Nørregade (fig.39). Åbunden er fyldt med store sten og blokke, og vandføringen er moderat.

### 10.2 Geologi

Fra åbunden og opad er opmålt et ca. 3,80 m tykt profil, hvor fire enheder er fundet (fig.40). Nederst lige over åbunden ses næsten uforvitret Hammer Granit, som er mellem til grovkornet og lys rødgrålig med en karakteristisk rødprækning. Graniten er gennemsat af sprækker. Herover følger forvitret, mellem til grovkornet Hammer Granit med mange tynde sprækker, hvor der på sprækkefladerne er udfældet gulbrune, oxiderede jernmineraller. Det er især de sorte mineraler, som har været udsat for forvitring med jernafgivelse som følge.

Over den forvitrede granit følger et gulbrunt lag af stærkt forvitrede, kantede og delvis knuste granitstykker, som er svagt lerblandede. Der er ikke tale om faststående Hammer Granit, men om en lokal glacial moræneaflejring bestående af sand og grus med sten, som er dannet under istiderne. Moræneaflejringerne er oxiderede og kalkfrie.

Øverst i profilet ses en stærkt sandet, brun muldaflejring med et stort humusindhold, som er gennemsat af mange små og store rødder. Desuden indeholder mulden mange finfordelte planterester og frø.



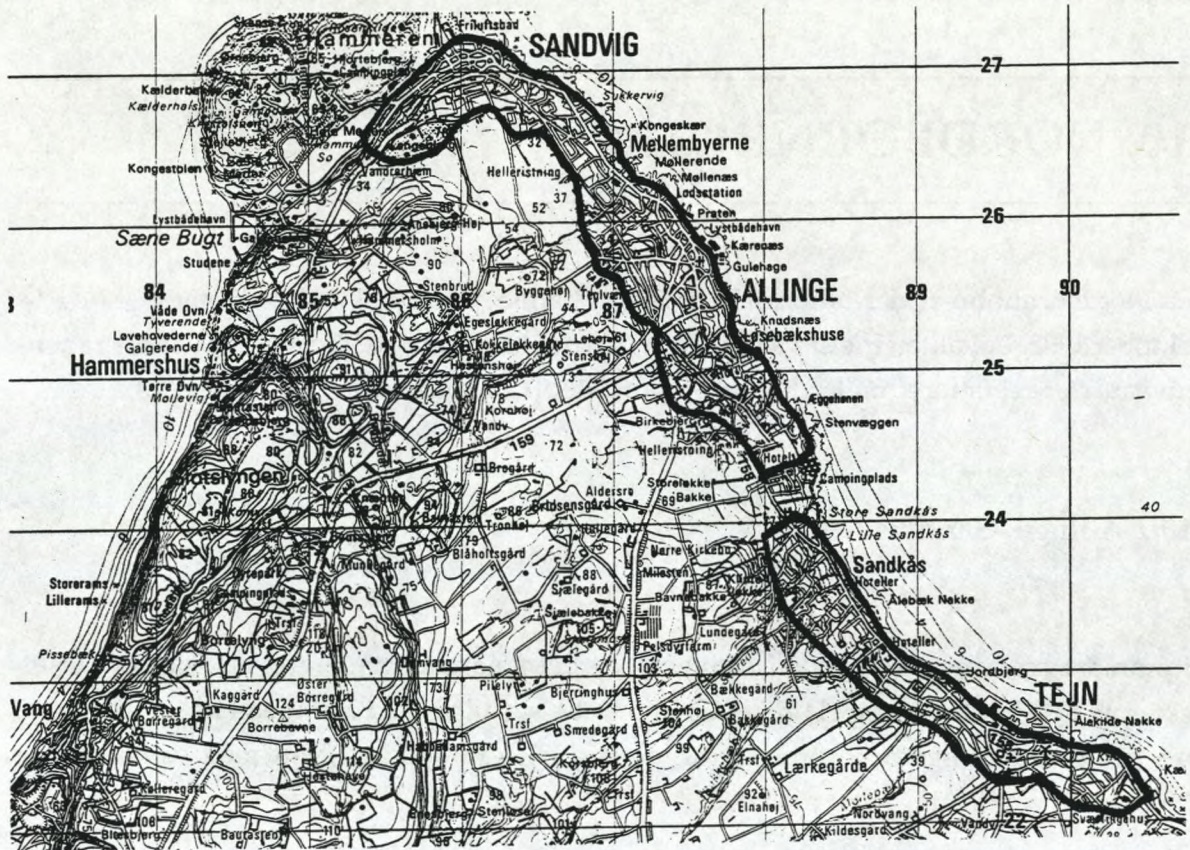


Fig. 38. Undersøgelseslokaliteterne på Nordbornholm: Allinge-Sandvig og Sandkås-Tejn i 1:50.000 (Med tilladelse fra Kort- og Matrikelstyrelsen).

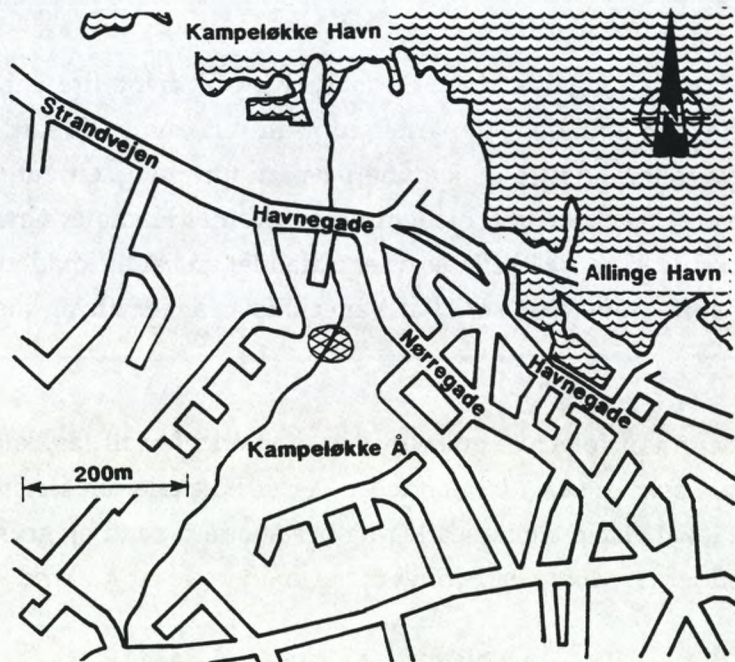


Fig. 39. Skitse over lokaliteten ved Allinge. Angivelse af profilets beliggenhed med krydskravering.



### Uran i ppm, Radium i Bq/kg

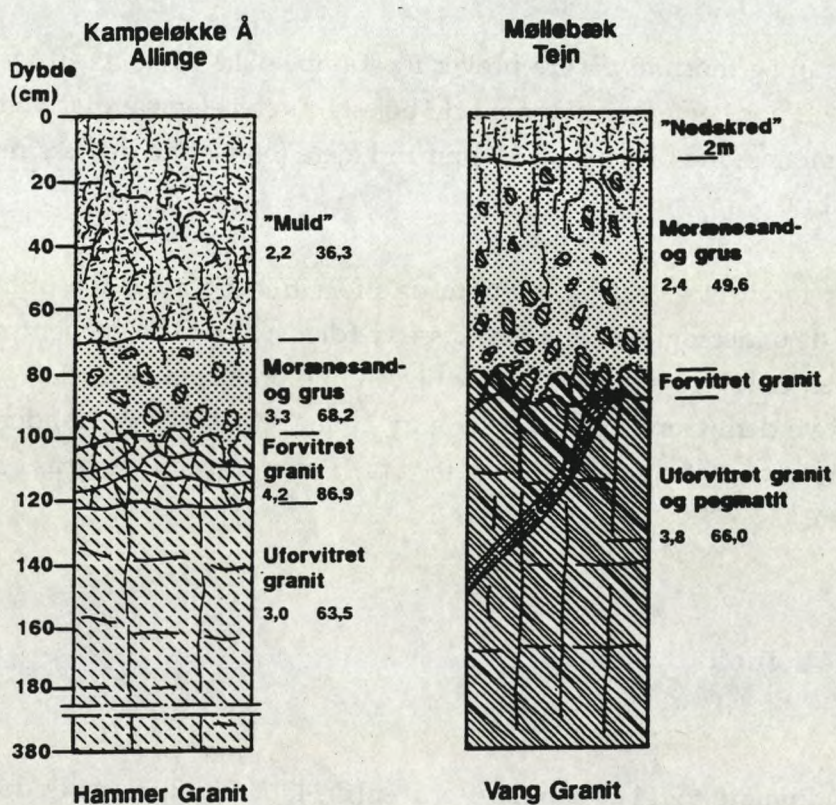


Fig. 40. Geologiske profiler ved Allinge og Tejn. (Beliggenhed fig. 39 og 42). Angivelse af uranværdier i ppm (til venstre) og radiumværdier i Bq/kg (til højre).



### 10.3 Bjergarternes alder

Muldlaget er antagelig dannet indenfor Postglacial tid (de sidste 10.000 år).

Det overliggende morænesand-, grus- og sten er dannet under sidste istid, Weichsel, hvor Bornholm var isdækket flere gange (Gravesen, 1996b). En tidsmæssig mere præcis placering er ikke mulig.

Hammer Graniten er Bornholms yngste granit, og den blev dannet i Prækambrium for ca. 1400 mio. år siden. Opsprækning og forvitring af Hammer Graniten er startet efter dens dannelse og er forsat op til nutiden.

### 10.4 Uran og thorium indhold

Der er målt uran og thorium på fire prøver fra Kampeløkke Å (se fig.40). Værdierne for "mulden" på 2,2 ppm er på niveau med de højeste morænelersværdier ved Viby, mens værdien for morænesand og grus på 3,3 ppm er højere (bortset fra den ekstreme værdi på 6 ppm ved Viby).

Værdierne for forvitret granit på 4,2 ppm og uforvitret granit på 3,0 ppm ligger over værdierne for de undersøgte sedimenter. Disse værdier svarer til de gennemsnitlige værdier i fig. 41, men er lavere end værdier for tilsvarende prækambriske eller yngre graniter andre steder i verden (Gundersen, 1991, Henry et al., 1991, Gates & Gundersen, 1992). Thorium indholdet er 6,6 ppm i mulden, 20,9 ppm i morænesand -og grus og 20,0 og 21,2 ppm i graniten.

### 10.5 Radium indhold

Der er målt radiumindhold i de samme 4 prøver (fig.40). I muldprøven er der 36,3 Bq/kg, hvilket er en høj værdi for denne type jordart, og højere end for andre muldprøver i undersøgelsen. Dog er der en muldværdi ved Andrup på 31 Bq/kg. Indholdet svarer godt til uranindholdet. I morænesand-gruset er målt 68,2 Bq/kg, og den værdi bærer tydelig præg af, at være på materiale omlejet fra den lokale underliggende Hammer Granit.



	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
<b>Accessory Minerals</b>			
Allanite		30-700	500-5000
Apatite		5-150	20-150
Epidote		20-50	50-500
Monazite		500-3000	2,5x10-20x10
Sphene		100-700	100-600
Xenotime		500-3.4x10	Low
Zircon		300-3000	100-2500
<b>Basalt</b>			
Alkali basalt	0.61	0.99	4.6
Plateau basalt	0.61	0.53	1.96
Alkali olivine basalt	<1.4	<1.4	3.9
Tholeiites (orogene)	<0.6	<0.25	<0.05
(non orogene)	<1.3	<1.5	<1.5
<b>Carbonates</b>			
Range (average)	0.0-2.0 (0.3)	0.1-9.0(2.2)	0.1-7.0 (1.7)
Calcite, chalk, limestone, dolomite (all pure)	<0.1	<1.0	0.5
<b>Clay Minerals</b>			
Bauxite		3-10	10-130
Glauconite	5.08-5.30		
Bentonite	<0.5	1-20	6-50
Montmorillonite	0.16	2-5	14-24
Kaolinite	0.42	1.5-3	
Illite	4.5	1.5	
Mica			
Biotite	6.7-8.3		<0.01
Muscovite	7.9-9.8		<0.01
<b>Feldspars</b>			
Plagioclase	0.54		<0.01
Orthoclase	11.8-14.0		<0.01
Microcline	10.9		<0.01
Gabbro (mafic igneous)	0.46-0.58	0.84-0.9	2.7-3.85
Granite (silicic igneous)	2.75-4.26	3.6-4.7	19-20
Granodiorite	2-2.5	2.6	9.3-11
Oil Shales, Colorado	<4.0	up to 500	1-30
Phosphates		100-350	1-5
Rhyolite	4.2	5	
Sandstones, range (av.)	0.7-3.8 (1.1)	0.2-0.6 (0.5)	0.7-2.0 (1.7)
Silica, quartz, quartzite, (pure)	<0.15	<0.4	<0.2
<b>Shales</b>			
"Common" Shales	1.6-4.2	1.5-5.5	8-18
Schist (biotite)		2.4-4.7	13-25

Fig. 41. Skema med gennemsnitlig K, U og Th værdier i forskellige bjergarter (Efter Nielsen et al., 1987).



I den forvitrede Hammer Granit er målt den højeste værdi på 86,9 Bq/kg. Denne værdi ligger på linie med de værdier fra Svaneke Graniten, som blev målt på prøver fra boring DGU arkiv nr. 247.121. Den uforvitrede Hammer Granit har en lavere værdi på 63,5 Bq/kg, hvilket også var tilfældet med uranindholdet. SIS (1996) angiver radium værdier for Hammer Graniten på 80 og 119 Bq/kg, mens den beslægtede Almindig Granit har en værdi på 117 Bq/kg.

Forvitringen af Hammer Graniten i det oxiderede miljø har antagelig medvirket til at frigive uran og koncentrere radium i den smuldrende bjergart og eventuelt afsætte den i sprækker, hvor bl.a. ler og jernforbindelser er registreret.

### 10.6 Tejn-Sandkås

I Tejn-Sandkås (fig.38) findes der bl.a. på vejen Smedeløkken huse liggende direkte på Vang Granit med forhøjede radonniveauer (Damkjær et al., 1995a). Et ca. 2,0 meter tykt profil er opmålt i Møllebæk. Møllebæk løber under Smedeløkken og videre ud i Østersøen (fig.42). I bæklejet ligger store sten og blokke.

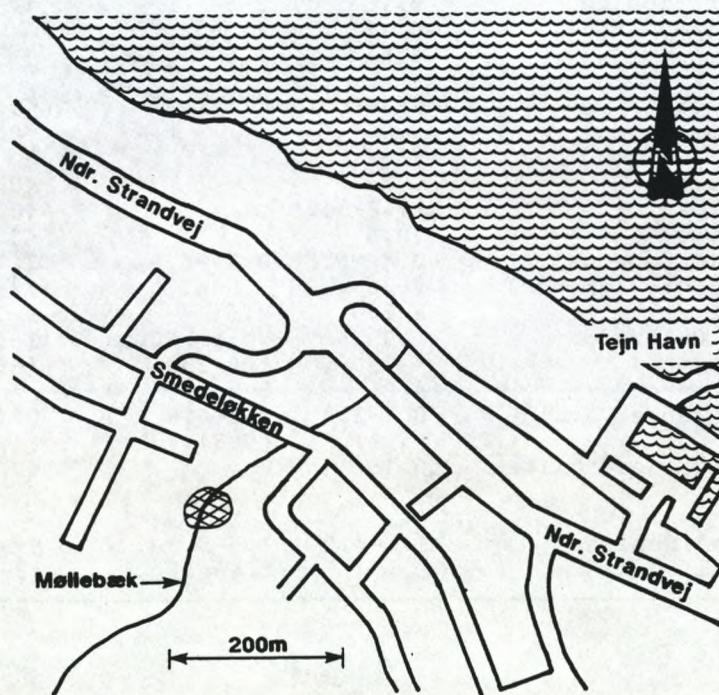


Fig. 42. Skitse over lokaliteten ved Tejn. Angivelse af profilets beliggenhed med krydskravering.



## 10.7 Geologi

Det lille profil, som udgøres af tre enheder, består nederst af uforvitret Vang Granit, som er grovkornet, rødgrå til brungrå, med de mørke mineraler samlet i hobe (fig.39). Det giver bjergarten et plettet udseende. I graniten findes meget grovkornede pegmatiter med rød feldspat og glasklar kvarts. Granit og pegmatit er gennemsat af sprækker.

Derover følger et tyndt lag af forvitret Vang Graniten. Endelig følger øverst en blanding af knust, forvitret Vang Granit og ler, som er en lokal glacial morænesandsaflejring med grus, der er dannet under istiderne. Moræneaflejringerne er oxiderede og kalkfrie. Over profilet er der 2 meter nedskredet materiale.

## 10.8 Bjergarternes alder

Morænesand og morænegrus er dannet under den sidste istid, Weichsel.

Vang Graniten fra Prækambrium er ældre end Hammer Graniten, men hører stadig til de yngste graniter på Bornholm, som er dannet for ca. 1400 mio. år siden.

## 10.9 Uran og thorium indhold

Der er undersøgt 2 prøver for uran og thorium indhold (fig.39). Morænesand og grus indeholder 2,4 ppm U, som svarer til morænelersværdier ved Viby. Uforvitret Vang Granit indeholder 3,8 ppm U, hvilket svarer til gennemsnitsværdier i fig. 41, men iøvrigt er en relativt lav værdi for en granit (Gates & Gundersen, 1992).

Thorium værdierne ligger på 14,5 ppm i morænesand -og grus og 20,5 ppm i granit.

## 10.10 Radium indhold

De to undersøgte prøver viser, at morænesand-grus indeholder 49,6 Bq/kg, og det høje indhold skyldes, at den lokale Vang Granit er omlejret i morænematerialet (fig.39). Den uforvitrede Vang Granit og pegmatit indeholder 66,0 Bq/kg, en værdi der er højere end



den for den uforvitrede Hammer Granit. SIS (1996) angiver en radium værdi for Vang Granit på 264 Bq/kg, der således er væsentlig højere.

### 10.11 Radon forhold

Der er ikke målt radon emanations rater for prøverne fra Bornholm, men ved "Radon-95"-undersøgelsen er der blevet målt radon i indeluften i 80 huse og i jordluften rundt om husene (Damkjær et al., 1995a). I indeluften var der en gennemsnitlig middelværdi på 122 Bq/m<sup>3</sup> med et minimum på 8 Bq/m<sup>3</sup> og et maximum på 1090 Bq/m<sup>3</sup>. I alt havde 9 huse over 200 Bq/m<sup>3</sup>. Den højeste målte værdi i en stue var 1800 ± 150 Bq/m<sup>3</sup>.

Der er blevet foretaget 20 jordgasmålinger fordelt på de to områder, og den gennemsnitlige radon værdi var 55 kBq/m<sup>3</sup> hvilket er højere ned der er målt ved Thisted og Viby. Der var ingen klar sammenhæng mellem indeluft og jordluft niveauerne.

### 10.12 Sammenfatning for begge bornholmske lokaliteter

De to granittyper har et radiumindhold, der ligger på linie, med hvad der tidligere er målt for bornholmske graniter. Det er interessant, at den forvitrede Hammer Granit har en højere værdi end den uforvitrede, og det skyldes det større transportpotentiale i sprækkerne. Morænesand-og grusjordarterne har høje radium værdier, der tydeligt afspejler, at de er dannet af den underliggende granit. Mulden ved Kampeløkke Å har et radiumindhold, der er på højde med de højeste værdier for moræneler i det øvrige land, men den indeholder også både et højt organisk indhold og rester af de underliggende graniter.

Alle jordarter og bjergarter har et højt radon potentiale, især da de også er relativt højpermeable, og det svarer godt til de høje indeluft værdier som er målt i de nærliggende huse.



---

## 11. DISKUSSION

---

### 11.1 Betingelser for radon emanation og transport

Mængden af radon i de undersøgt danske jordarter og muligheden for transport gennem lagene afhænger af følgende faktorer (Damkjær & Korsbech, 1985, Tanner, 1991, Nazaroff, 1992):

- a. Jordarterens oprindelse og dannelsesbetingelser herunder oxidations og reduktionsforhold.
- b. Jordarternes sammensætning herunder mængden og typen af mineraler og bjergarter der indeholder uran og/eller radium.
- c. Redoxforhold i de øvre jordlag i tiden efter sidste istid.
- d. Mineralernes emanation af radon (fra radium).
- e. Transportmuligheder. Porøsitets- og permeabilitetsforhold. Umættede og mættede forhold.
- f. Transportmåder. Diffusion, konvektion og medietransport (vand eller gas).

### 11.2 Uran, radium og radon

Den radioaktive luftart radon (Rn-222) med en halveringstid på 3,8 dage, bliver overvejende dannet ved naturligt henfald fra radium (Ra-226) (halveringstid 1600 år). Radium bliver igen dannet ud fra uran (U-238) (halveringstid 4,5 milliarder år). Radon er en kemisk inaktiv ædelgas, som kan opløses i vand. Radon henfalder yderligere til fire radioaktive stoffer, som kaldes radondatterprodukter (Polonium, Po-218, Bly, Pb-214, Vismut, Bi-214, Polonium, Po-214) med meget korte halveringstider.



Uran indgår ikke som væsentlig bestanddel i bjergarternes hovedmineraller, men ligesom thorium indgår det som sporelement i accessoriske mineraler som f.eks. tungmineraller. Uran dannes især i forbindelse med grundfjeldsbjergarter som gnejser og graniter og findes heri, samt opkoncentreret i mineraliseringer dannet i disse bjergarter. Ved forvitring og nedbrydning transporteres uranmineraller og aflejres i sedimentære bjergarter på landjorden, søer og floder eller havet. Her påbegyndes en yderligere nedbrydning og udvaskning af uran i oxideret miljø ( $U^{4+}$  status) og en udfældning og dannelse i reduceret miljø ( $U^{6+}$  status). Uran danner ion-komplekse bindinger med Fe, Ca og P og er ofte positivt korreleret med deres forekomst. Desuden absorberes uran til organiske forbindelser og sætter sig på kolloidale Fe-oxider og hydroxider som overtræk på andre mineralkorn.

En oversigt over uran og thorium i bjergarter og mineraler ses i fig. 41 (efter Nielsen et al, 1987). Når uran fjernes lades radium tilbage i mineralers struktur eller på overfladen af mineraler, fordi radium er meget mindre opløselig og mobil i oxideret miljø end uran. Radium har f.eks. stor evne til at adsorbere på ferrioxihydroxider som goethit ( $FeOOH$ ) og hæmatit ( $Fe_2O_3$ ), der findes i størst mængde i jordlagenes oxiderede zone (Ames et al., 1983). Radium indholdet i danske jordarter er målt ved flere undersøgelser (Korsbech, 1985, Damkjær & Korsbech, 1985, SIS, 1996), hvoraf sidstnævnte angiver værdier for Bornholm (se også bilag A).

I mange geologiske jordarter og bjergarter er der en ligevægt mellem de enkelte elementer i henfaldskæden: U-239, Th-230, Ra-226, Rn-222, men en uligevægt opstår, når der fjernes et element eller dele af det fra dets oprindelige position. Når uran udvaskes og transporteres væk opstår en uligevægt i forhold til thorium, og der opstår en uligevægt når radon genereres og transporteres væk fra radium. Radiumindholdet er udtrykt som Bq/kg ekvivalent til den totale produktions rate af radon i jorden. Et indhold på 1 Bq/kg radium vil forårsage en total emanation af radon på 1 atom/s\*kg.

Forholdet mellem uran og thorium i de undersøgte prøver fordelt efter lokaliteter ses i fig. 43. Her ses en retlinet sammenhæng mellem de to stoffer. Relationerne mellem uran og radium fordelt delt efter lokaliteter ses i fig. 44. For disse stoffer ser der også ud til at være en rimelig korrelation med en lille overvægt i uran indholdet i jordarterne og en lille overvægt i radium indholdet for de bornholmske bjergarter og jordarter. På fig. 45. er vist uran-radium indholdet fordelt efter jord-bjergartstype.

Radongenereringen (emanationen) ud fra de radiumholdige mineraler sker ud i jordarterners porer eller ind i andre mineraler (Nazaroff, 1992, Tanner, 1991). Den mængde radon der emaneres og forlader de faste korn til porerne er almindeligvis lav i forhold til den potentielle mængde, der kunne dannes, og det er således kun en mindre radonmængde, der deltager i den videre transport i vandfase eller gasfase. Det har stor betydning for



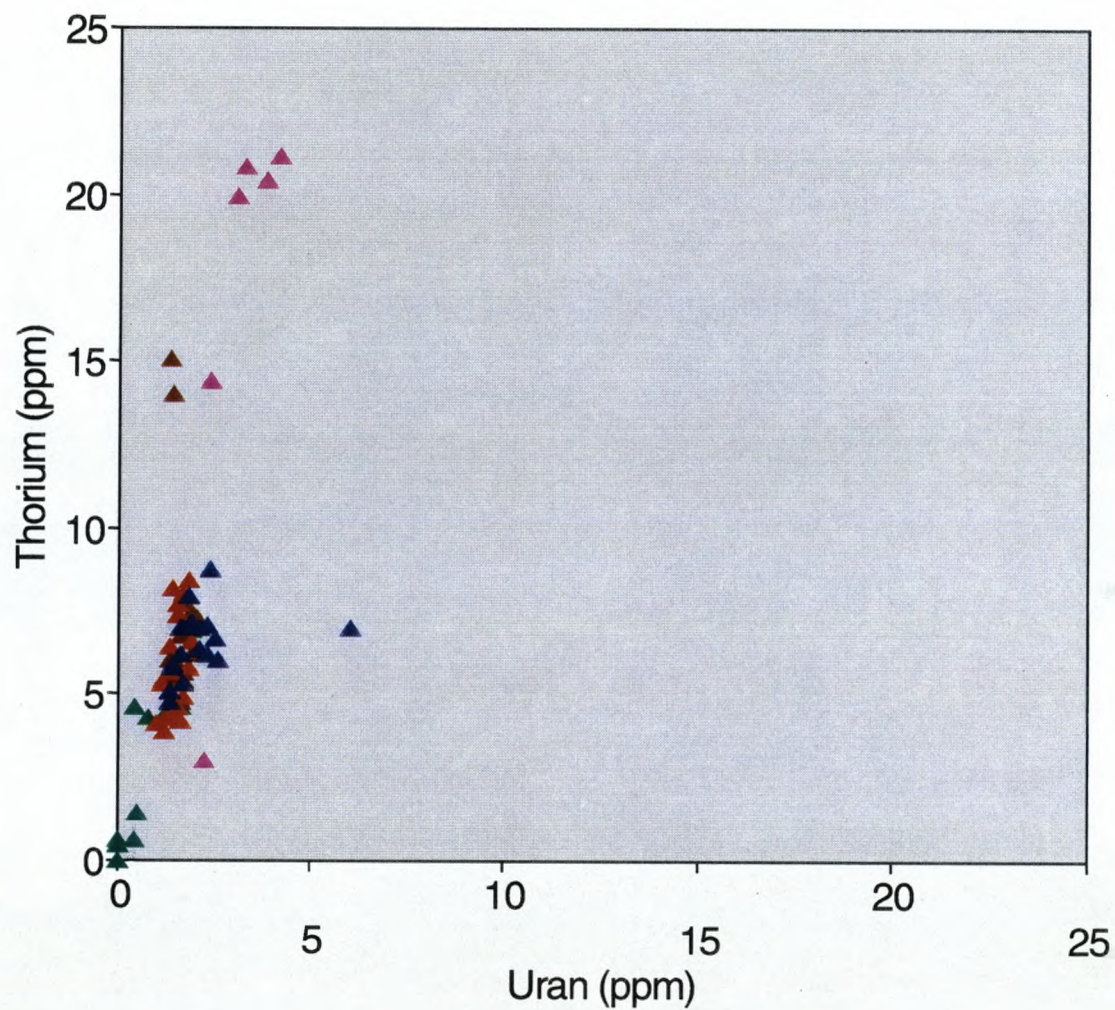


Fig. 43. Relationerne mellem uran og thorium i alle bjergarter fordelt efter lokaliteter.



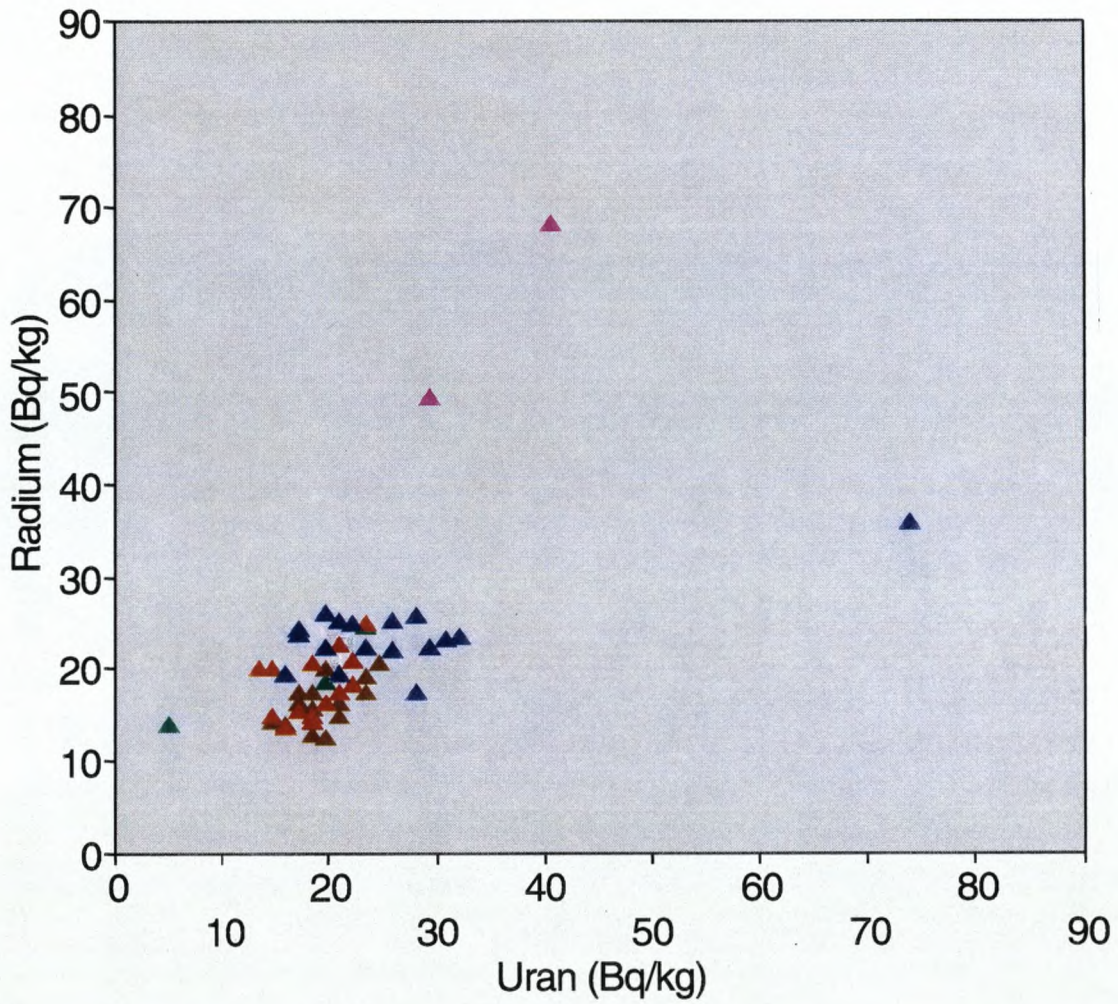


Fig. 44. Relation mellem uran og radium i alle bjergarter fordelt efter lokaliteter.



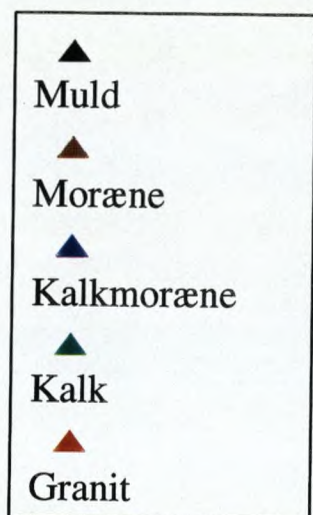
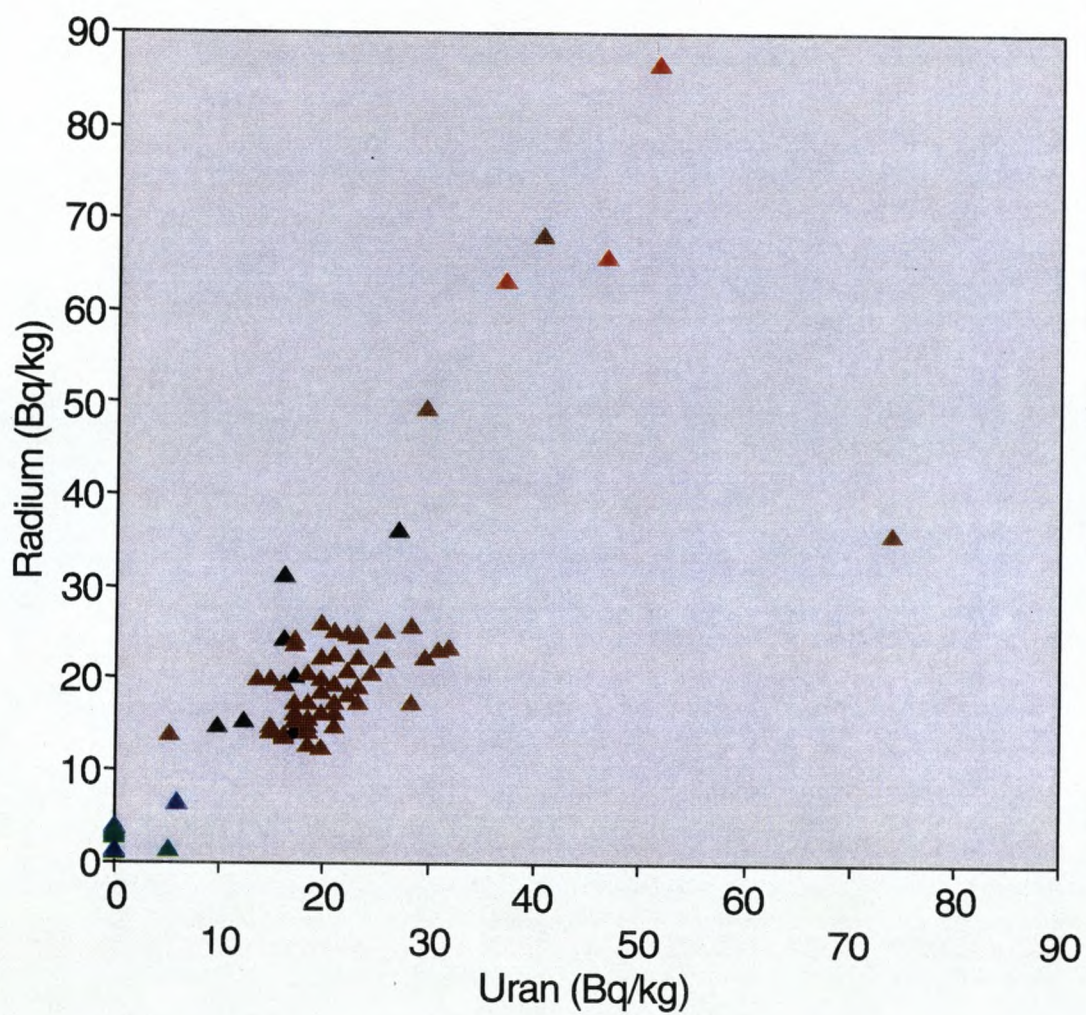


Fig. 45. Relationer mellem uran og radium fordelt efter bjergartstype.



emanationen, om radium sidder i mineralernes gitterstruktur eller på overfladen af mineralerne, f.eks. lerminerale eller jernhydroxider. I sidstnævnte tilfælde er der en særlig exponering for radon emanation. Forholdet mellem radiumindholdet og det emanerede radon kaldes for emanations forholdet eller koefficienten.

Relationerne mellem radium og radon fordelt efter lokaliteter ses på fig. 46. Generelt kan siges, at de fleste værdier ligger under den ideelle radon emanations linie, hvilket er almindeligt, da ikke alt radium sidder placeret, så der kan ske en emanation.

Radon kan transporteres opløst i vand eller i gasfase ved diffusion, advektion eller konvektion, og de aktuelle permeabilitetsforhold er styrende i denne sammenhæng. Advektion og konvektion dominerer i høj-permeable jordarter (permeabilitet generelt større end  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>), mens diffusion er den dominerende radon transport i lav-permeable jordarter (permeabilitet generelt mindre end  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>). Transport af radon er begrænset i lav-permeable jordarter på grund af den korte vej radon kan bevæge sig, inden den henfalder. I dobbelt porøse aflejringer som moræneler og kalk betyder det en del, om der er tale om transport i matrix eller i porer. Søgaard-Hansen & Damkjær (1987) har vist at radon transporteres ved diffusion omkring 1 cm i ler (vådt), men 160-190 cm i silt, sand og grus (tørt).

Den opadgående transport til bygninger på jordoverfladen sker kun i jordgasfasen, og et højt indhold af vand i den umættede zone nedsætter både emanation og transport af radon, dog giver et indhold på mellem 15 og 20 % vand en øget mulighed for at radonatomerne forbliver i porerummet (Schumann et al., 1992), mens et højere indhold giver af-tagende emanation (Damkjær & Korsbech, 1985). Transport med grundvandet kan have betydning ved vandindvinding.

Vandindholdet i jordlagene varierer med årstiden og generelt er indholdet større i vinter halvåret end i sommerhalvåret. De sæsonmæssige og klimatiske variationer påvirker radon emanationen (Schumann et al., 1992).

### 11.3 Bjergarterne: Dannelse, mineralogi og geokemi

Ved denne undersøgelse er fire danske bjergartstyper blevet undersøgt: 1. Postglacial muld med udfældningshorisonter, 2. Glaciale morænejordarter d.v.s. morænesand-grus-sten og



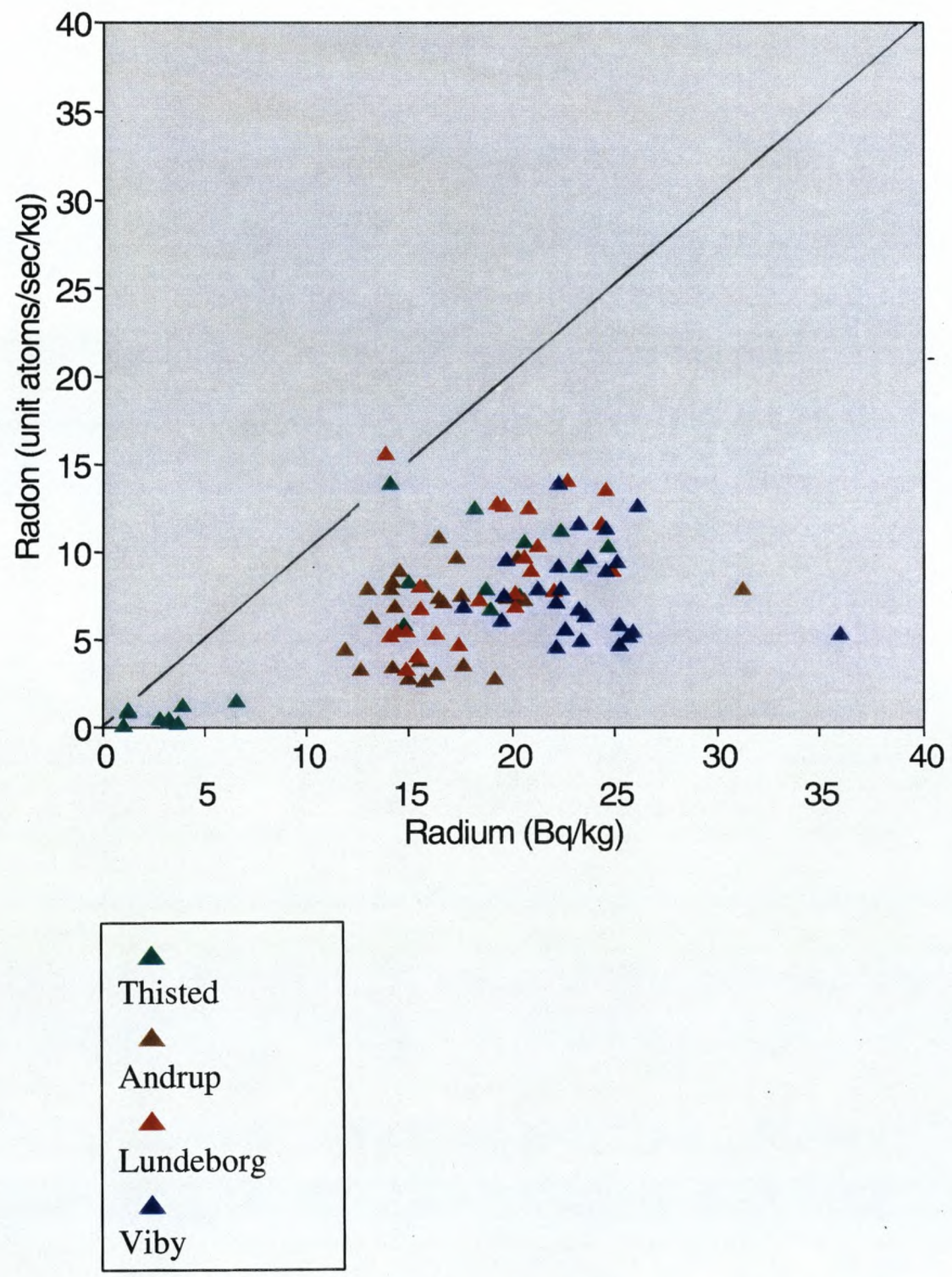


Fig. 46. Relationerne mellem radium og radon i alle bjergarter fordelt efter lokaliteter. Linien angiver ideel radon emantion.



moræneler, hvor moræneler har været den centrale jordart for hele undersøgelsen, 3. Danien slamkalk, 4. Prækambrisk granit.

### 11.3.1 Postglacial muld og udfældningshorisonter

Mulden er et organisk sediment, hvor plantemateriale i større eller mindre grad præger dets sammensætning. Den er en residualjordart (rest), der findes fra jordoverfladen og et stykke ned, men normalt ikke meget dybere end 50 cm. Mulden er dannet ved jordbundsdannende processer, som den øverste del af af et jordbundsprofil (Bridges, 1970, Madsen, 1984). Jordbundsudviklingen er sket ved påvirkning af en række faktorer: Klima, organismer, terræn, udgangsmateriale og tiden.

Mulden er dannet ved, at den øverste jordart eller bjergart forvitrer, gennemvaskes af nedsivende vand og opblandes af plantemateriale fra bevoksning. Udgangsjordartens sammensætning er med til at bestemme, om mulden er domineret af sand eller ler. Ved omdannelsen fjernes mange af de mineralske komponenter, mens det organiske indhold forøges. Det betyder også, at der kan ske en koncentration af stoffer som bindes til det organiske indhold, som f.eks. uran eller radium, hvis de geokemiske forhold iøvrigt er optimale. Omdannelsen af plantematerialet producerer humus. Det sker især ved påvirkning af mikrofauna- og flora samt gennemgravning af større dyr (orme, insekter, muldvarpe).

I jordbunden, hvor der er højt organisk indhold, er der ofte et højt indhold af jordvand på grund af plantresternes evne til at holde på fugtigheden. Denne fugtighed varierer gennem året fra lav om sommeren, hvor der er høj fordampning, til måske helt vandmættet om vinteren, hvor der er en høj nedbør. Indholdet af vand påvirker radon genereringen betydeligt (Ball et al., 1991).

Ved nedsivning af vand kan letopløselige stoffer opløses og transporteres ned i jordprofilet for derefter at blive genudfældet i en udfældningszone (illuvialzone). I denne zone træffes ofte en koncentration af jern og aluminiums-forbindelser samt ler. Dette kan f.eks. ses ved Thisted og Lundeborg. I Danmark har de øverste jordlag i Postglacial tid (de sidste 10.000 år) det meste af året haft en umættet zone, hvor der har været oxiderende forhold, som har påvirket de kemiske komponenter.

Målinger af uran og radium i muldprøver fra Thisted, Andrup, Lundeborg og Allinge giver høje eller lave værdier, der afspejler de underliggende lag (Allinge) eller afviger helt fra disse niveauer (Thisted). Jordbunden ved Allinge er dannet ved jordbundsprocesser ud fra de underliggende morænejordarter og Hammer Graniten, som begge har et højt



indhold af uran og radium. Det er derfor ikke overraskende, at jordbunden også har det, og værdien ligger over alle andre jordarters i det øvrige land. Processer i de øvre oxiderede jordlag har skabt en opløsning og udvaskning af uran og fixering af radium på det organiske materiale. (Agard & Gundersen, 1991).

På fig. 47 ses relationerne mellem uran og radium for muld, mens forholdet mellem radium og radon i mulden ses på fig. 48. Selvom radon emanationen er relativt høj i mulden, ligger den dog lavere end den ideelle.

Ved Thisted er forholdene noget anderledes. Værdierne i mulden ligger på niveau med dem, der er målt i det underliggende morænesand. For begge jordartstyper gælder, at de har langt højere værdier end den underliggende Danien kalk og kalkmorænen (fig.8 og 9). Indholdet af uran og radium bevares ved jordbundsudviklingen i morænesandet med en senere opløsning af uran og bevarelse af radium, mens bidrag ikke umiddelbart er kommet fra kalken. Radon emanations rater fra mulden ved Thisted ligger sammen med radium indholdet på niveau med det underliggende morænesand, og meget højere end raterne i kalkmorænen og Danien kalken (fig.10). I de tilfælde, hvor mulden ligger direkte på kalken, som det kendes i Thisted området, må andre processer være aktive (Se under kalk).

Muldlagene ved Andrup og Lundeberg har samme uran og radium niveau, bort set fra en enkelt høj værdi ved Andrup, er de begge steder på niveau med de umiddelbart underliggende morænejordarter. Radon emanations raterne er af størrelsens orden som ved Thisted, dog noget højere ved Lundeberg. Værdierne er generelt lavere end for det underliggende moræneler. Der er alle steder tale om middel høje rater, og lignende værdier er målt for jordbunden ved en undersøgelse ved Risø (Majborn et al., 1988, appendix I, table 1).

De middel høje emanations rater i muld viser, at det opkoncentrerede radium har mulighed for at afgive radon i det relativt høj permeable muldlag. Der er derfor muligheder for videre transport af radon til atmosfæren eller til bygninger.



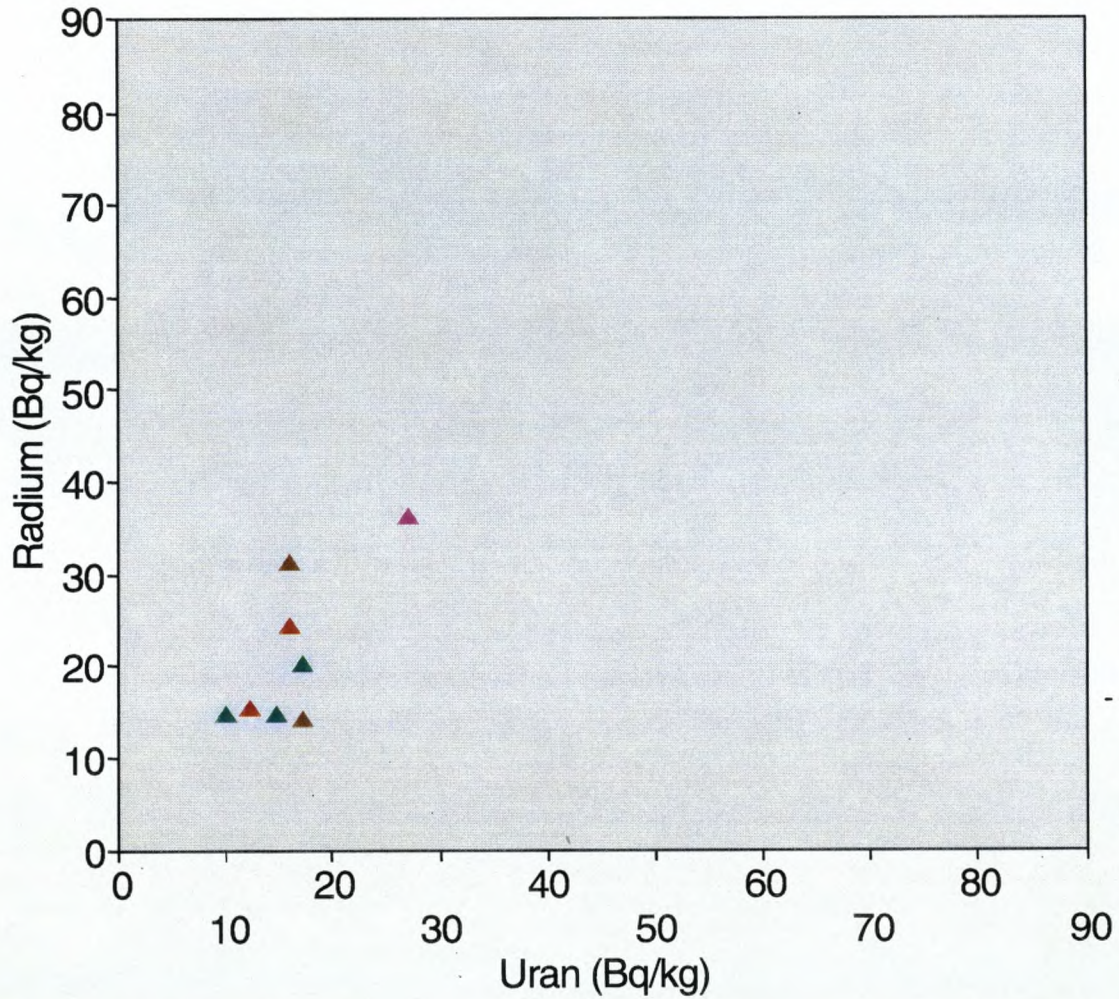


Fig. 47. Relation mellem uran og radium i muld fordelt efter lokaliteter.



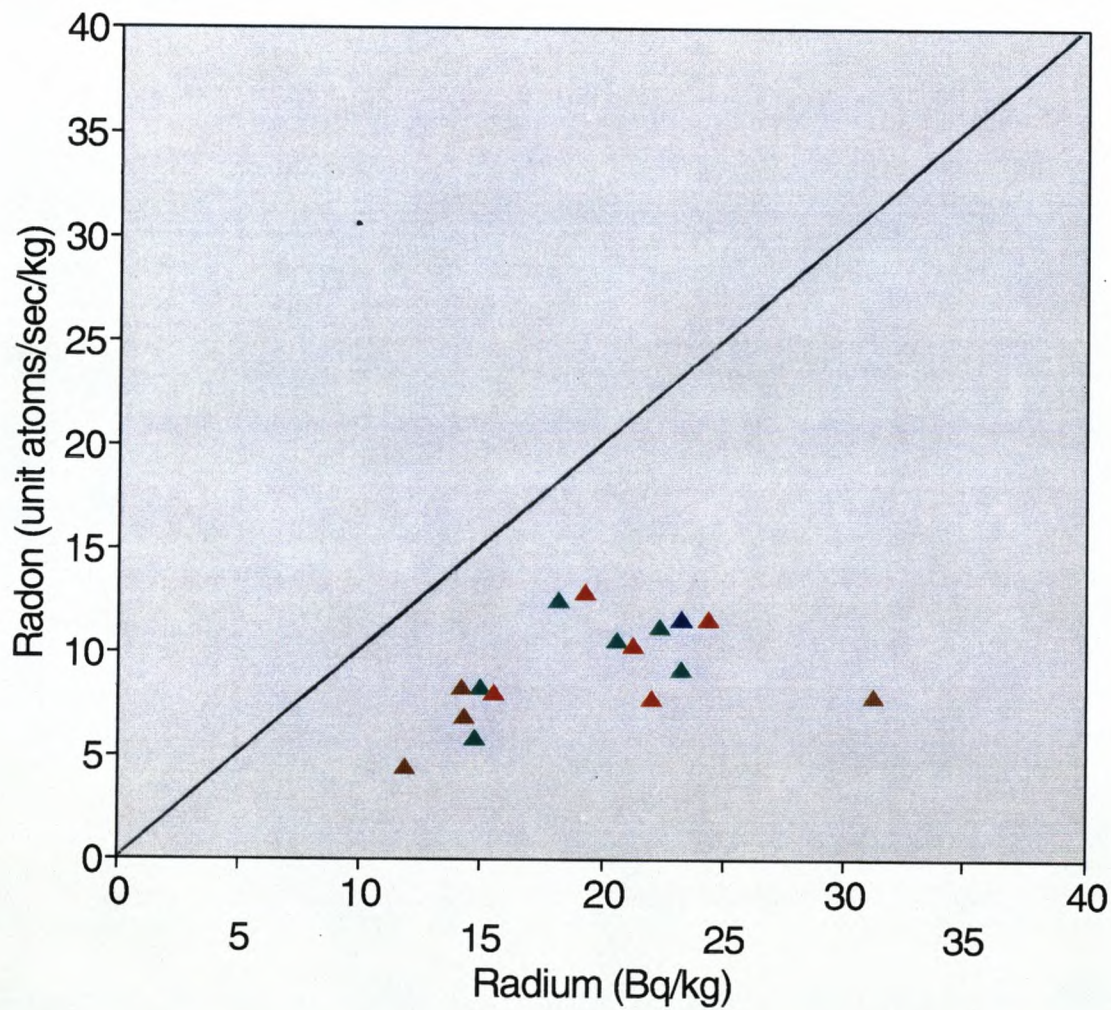


Fig. 48. Relation mellem radium og radon i muld fordelt efter lokaliteter. Linien angiver ideel radon emanation.



### 11.3.2 Glaciale morænejordarter

Moræneler og morænesand er dannet ved aflejring fra en gletscher. Det er dårligt sorterede jordarter med indhold af både ler, silt, sand, grus og sten i forskellige mængdeforhold. Moræneler indeholder mindst 12 % materiale i lerfraktionen, men morænesand har mindre end 12 % ler og mere end 45-50 % i sandfraktionen (Larsen et al., 1988).

Aflejringen er principielt sket tre forskellige steder: Enten fra gletscherens bund (bundmoræne, lodgement till), ovenpå gletscheren (afsmeltningmoræne, ablation till) eller foran gletscheren (flydemoræne, flow till). Foruden disse hovedmorænetyper, dannes moræneaflejringer også i andre miljøer som f.eks i havet. Derudover kendes dårligt sorterede jordarter som undertiden beskrives som morænejordarter, men som i virkeligheden er dannet på ander måder. Disse andre typer indgår ikke i undersøgelsen.

Morænejordarterne er dannet indenfor Kvartær Perioden, som strækker sig ca. 2 millioner år tilbage i tid. Denne undersøgelse omfatter imidlertid kun aflejringer, hvis alder er fra tidsrummet 150.000 år til 10.000 år omfattende Saale og Weichsel istiderne. Under disse istider var Danmark ikke dækket af gletscheris hele tiden, men tidsafsnit uden is blev flere gange afløst af tidsafsnit, hvor gletschere kommende fra Norge, Sverige og Finland dækkede landet. Gletscherne bevægede sig fra det højere liggende Baltiske Grundfjeldskjold med forskellige retninger over disse lande samt undertiden syd om Sverige (Baltisk is). Isen bragte materiale frem fra disse områder til Danmark bestående af især grundfjeldsbjergarter, men også af de overliggende sedimenter. Dette fjerntransporterede materiale er blevet nedknust og omfordelt under transporten. I selve Danmark er det fjerntransporterede materiale blevet opblandet med det lokale danske materiale, som især har bestået af aflejringer fra Kridt, Tertiær og ældre Kvartær samt på Bornholm en række andre bjergarter fra Prækambrium til Kridt.

Morænejordarterne indeholder således en blanding af lokalt materiale og materiale som kommer længere væk fra, alt sammen mere eller mindre nedknust og opblandet med hinanden. Indholdet i en morænejordart på et givet sted afspejler derfor ikke direkte, hvad der findes neden under de kvartære aflejringer, dog undtaget aflejringer over bornholmske grundfjeldsbjergarter. Dette afhænger imidlertid af, hvilken kornstørrelsesfraktion der ses på. Der findes en række metoder til at bestemme indholdet, og sandsynliggøre hvor morænejordarternes oprindelse er fra (Binzer, 1974, Sjørring & Frederiksen, 1980, Holm, 1981, Houmark-Nielsen, 1987, Langtofte, 1994).

Ved geologiske undersøgelser, hvor både moræneaflejringers indhold og strukturelle forhold er blevet undersøgt, har det været muligt at henføre moræneaflejringerne til Saale eller Weichsel, samt bestemme hvilke isfremstød indenfor perioderne lagene tilhører. Disse



isfremstød har haft deres egen bevægelsesretning over Skandinavien og Danmark, og dermed fået deres egen sammensætning.

Permeabilitetsforholdene har stor betydning for radons muligheder for at blive transporteret opad i jordgassen (Lindmark & Rosen, 1984, Burkhart & Huber, 1993). De to typer permeabilitet i morænejordarterne: Matrix og makropore permeabilitet har helt forskellig bidrag til transporten i den umættede zone, hvor også vandindholdet spiller ind (Tanner, 1991). Høj fugtighed nedsætter generelt radon transport.

Morænesand har bl.a. på grund af det lavere lerindhold og bedre sorteringsgrad en højere matrixpermeabilitet end moræneler, og den kan nærme sig smeltevandssands. Moræneaflejringerne kan have en høj sprække-makropore permeabilitet, men sprækker optræder spredt, uforudsigeligt og med varierende orienteringer, men de påvirker og styrer alligevel bulkpermeabiliteten.

Der er foretaget en del målinger af permeabilitetsforholdene i moræneler i den umættede og den mættede zone (Fredericia, 1990), der ofte udtrykkes ved den hydrauliske ledningsevne ( $K$  i m/s). Undersøgelsen af den hydrauliske ledningsevne har vist, at når både porer i matrix og makroporer indgår (især sprækker i de øvre lag), har moræneler tit en højere  $K$ -værdi end tidligere antaget, som ligger omkring  $10^{-6}$  m/s. I dybere liggende morænelag, hvor der er færre sprækker og makroporer, aftager  $K$  værdien til omkring  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  m/s (Fredericia, 1990, Jacobsen & Jensen, 1990). Jordgas permeabilitet og ledningsevne vil især være knyttet til de grove porer i moræneler, såsom sprækker, ormehuller og rodgange hvor radon kan migrere ved advektion eller konvektion. Jordgas ledningsevne i den umættede zone ligger tæt på den hydrauliske ledningsevne. I matrix, med de mange, små porer, bevæger radon sig især ved diffusion, som er en langsommere process, hvor transportlængden ikke er nær så lang som ved advektion og konvektion (Tanner, 1991), og et centralt punkt er derfor radons muligheder for at nå fra genereringsstedet ud til de groveste porer. Kornene i moræneler (og ler), har en stor specifik overflade, hvorpå radium kan være fixeret, men på grund af det delvis lukkede poresystem i matrix vil en effektiv radon emanation ske, hvor der er kort transportvej til makroporerne.

Vandindholdet i porerne i morænelererne ligger ved denne undersøgelse mellem 10 og 20 volumen %, og det vurderes som relativt lave værdier i forhold til en f.eks. vintersituation med meget nedbør og lav fordampning. Denne procentfordeling er ideel for radon emanation, så de målte emanations rater må repræsentere et relativt højt niveau set ud fra mulige sæsonfluktuationer.

Indholdet af uran, radium, og radon i moræneaflejringer findes i forskellige bjergarter og mineraler, hvoraf grundfjeldsfragmenter, tungmineraler og lermineraler er de vigtigste.



Der er undersøgt morænejordarter på alle lokaliteter, og de fremstår som eksempler på nogle af de typer, der forekommer i Danmark. De lokale morænesand-grusjordarter ved Allinge og Tejn på Bornholm har et stort indhold af de underliggende graniter, og dermed påvirker indholdet af uran og radium i graniterne også de overliggende jordarter. Det er derfor at forvente, at morænejordarter over graniter på Bornholm har et højere indhold af uran og radium end morænejordarter andre steder i landet, og da de samtidig er relativt højerpermeable på grund af kornstørrelsen, er de sammen med graniterne meget potentielle radonkilder. Dette bekræftes da også ved undersøgelser, der er foretaget inde i huse i de to byer, hvor landets højeste niveauer er målt i indendørsluften.

Ved Thisted består morænejordarterne af to typer. Kalkmorænen, som er lokal og dannet primært ud fra de underliggende kalkbjergarter, har lige så lavt et indhold af uran og radium som kalken. Den overliggende, jævndrende morænesand (og ler) (Mellem Mellem Weichsel, 18.000 år siden) har delvis et lokalt kalkindhold, men den største mængde materiale er kommet med isen nordfra (Gry, 1979, Houmark-Nielsen, 1987). Indholdet af uran og radium er på niveau med Lundborg og dele af Viby.



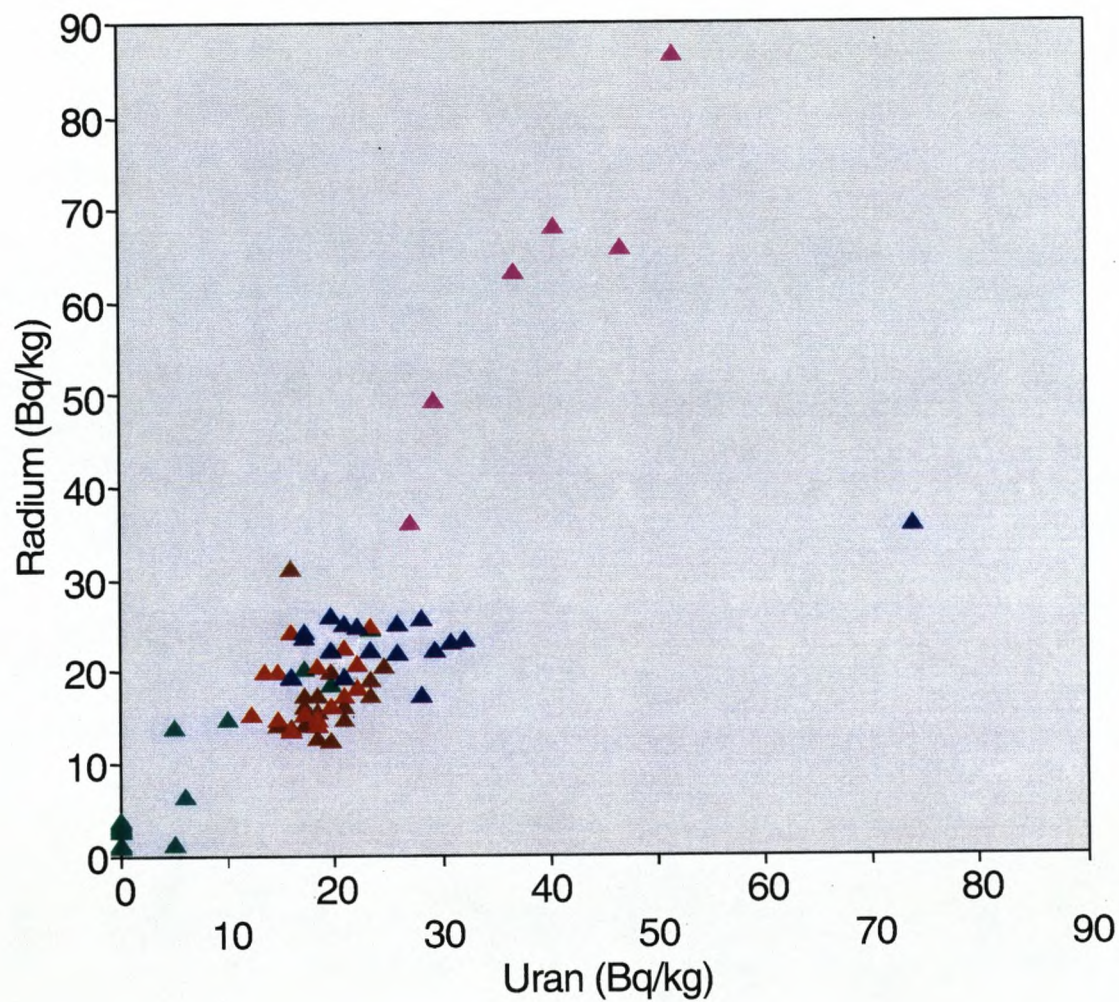


Fig. 49. Relation mellem uran og radium i morænejordarter fordelt efter lokaliteter.



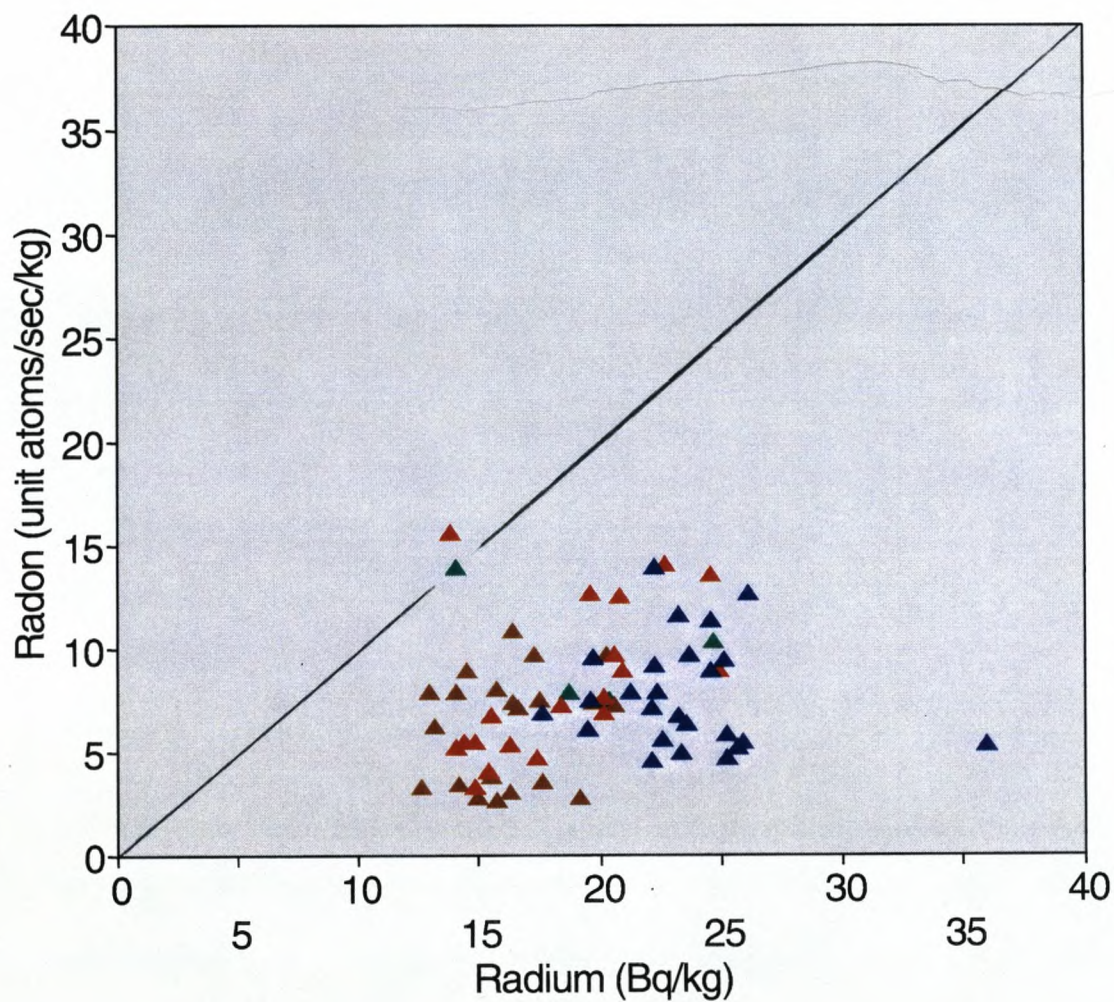


Fig. 50. Relation mellem radium og radon i morænejordarter fordelt efter lokaliteter. Linien angiver ideel radon emanation.



Relationerne mellem uran og radium i morænelerene på alle lokaliteter ses på fig. 49. Korrelationen mellem stofferne er relativ god. Forholdet mellem radium og radon ses på fig. 50. Radon emanationen er lavere end det ideelle.

Radon emanations rater fra det oxiderede, kalkholdige morænesand er på mellem niveau og liggende på højde med oxideret morænesand på de andre lokaliteter. Det oxiderede, kalkholdige moræneler har værdi på linie med Lundeborg og Viby, mens kalkmorænen ligger nede på det lave niveau.

Ved Andrup er moræneaflejringerne fra den sidste del af Saale-istiden (ca. 130.000 år siden). Redoxgrænsen ligger i 2,5-3 meters dybde. Det oxiderede kalkfrie og kalkholdige moræneler har ens uran og radium niveauer, mens det har lidt lavere værdier i den reducerede zone (fig.17 og 18). Niveauerne ligger lavere end hvad der er målt for danske Weichsel morænejordarter (Damkjær & Korsbech, 1985, Korsbeck, 1985), og lidt lavere end Lundeborg og en del lavere end ved Viby (fig. 49 og 50). Dette forhold kan skyldes forskellige årsager. Kalkudvaskningen er foregået ned til ca. 2,5 til 3 meters dybde. Andrup-moræneleret er ca. 130.000 år gammelt og mere end 100.000 år ældre end de andre morænejordarter i undersøgelsen. Der har derfor været et meget langt tidsrum gennem Eem interglaciertid, Weichsels isfrie tidsrum og postglaciertiden, hvor der har foregået udvaskning og mobilisering.

Radon emanations raterne er klart delt op i zoner med værdier i det oxiderede moræneler, der ligger lidt lavere end ved de andre lokaliteter, men med værdier i det reducerede, kalkholdige moræneler, som er meget lavere og nede i det lave klassifikation niveau (fig.19). Værdierne er også lavere end hvad der er målt af Korsbech (1985), Damkjær & Korsbech (1985) og Majborn et al. (1988), selv om en enkelt værdi herfra også er på dette niveau. Årsagerne til disse forhold kan ligge i permeabilitetsforhold (sprækker), hvor det øvre moræneler er mere permeabelt end det nedre, men det kan også skyldes redoxprocesser eller forskellig oprindelse. Der er ikke fundet mineralogisk dokumentation for at morænelerene skulle være af forskellig alder. Redoxprocesser må derfor anses for at være væsentlig årsag til forskellene i zonerne, men uran og radiums geokemiske optræden under forskellige redox forhold i jordlagene er kun lidt undersøgt og dermed sparsomt kendt.

Uran-radium (fig.51) og radium-radon (fig.52) indholdet på alle lokaliteterne er opdelt efter den oxiderede og reducerede zone.

På fig. 51 ses at generelt er uran indholdet højere i det reducerede moræneler end i det oxiderede. Fig. 52 viser en bemærkselseværdig fordeling, hvor det ses at radon emanations rate værdierne i det reducerede moræneler er en væsentlig lavere end i det oxiderede moræneler, også hvor der er det samme indhold af radium.



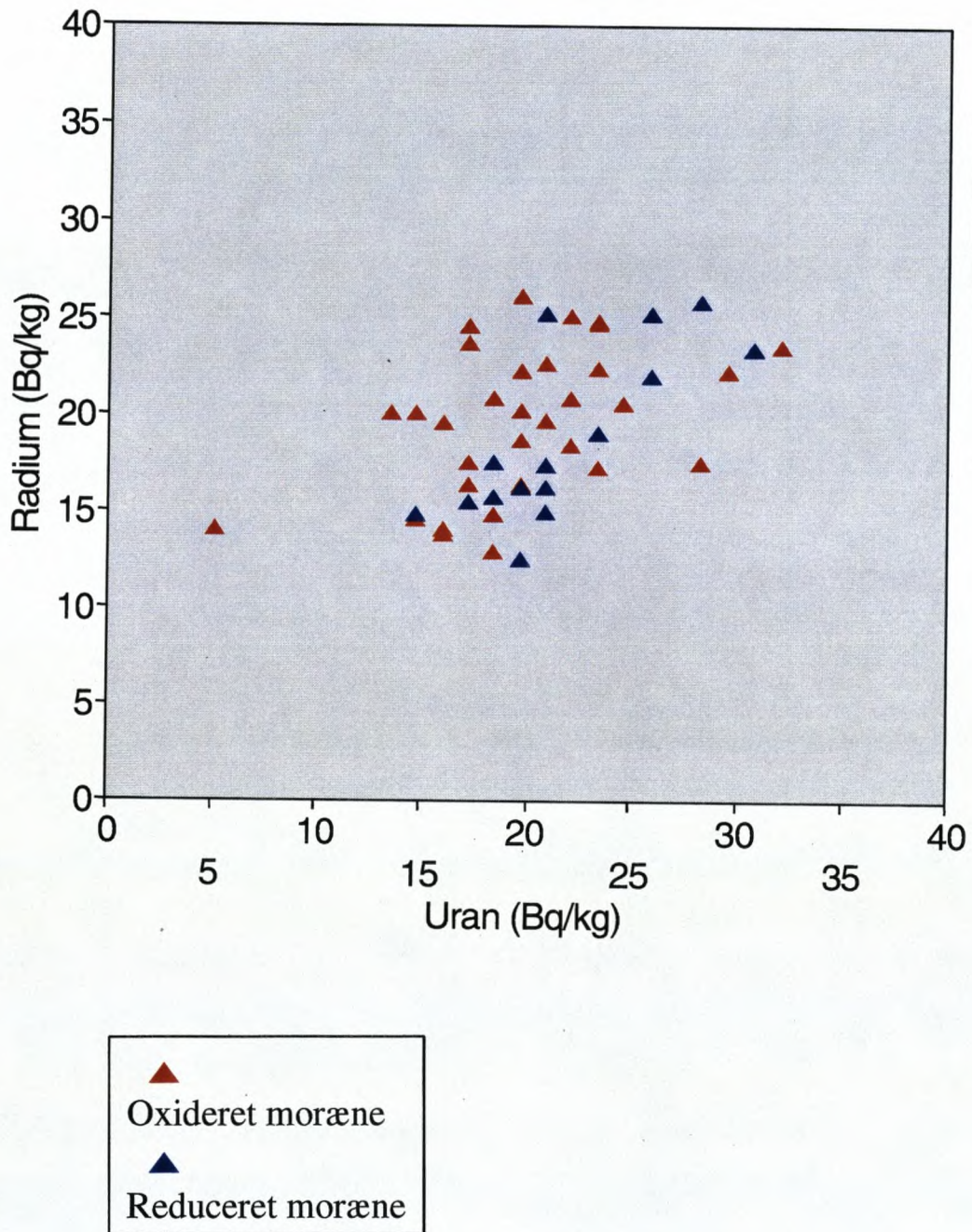


Fig. 51. Relation mellem uran og radium i morænejordarter fordelt efter oxideret-reduceret zone.



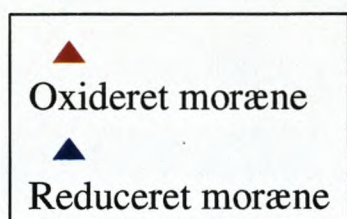
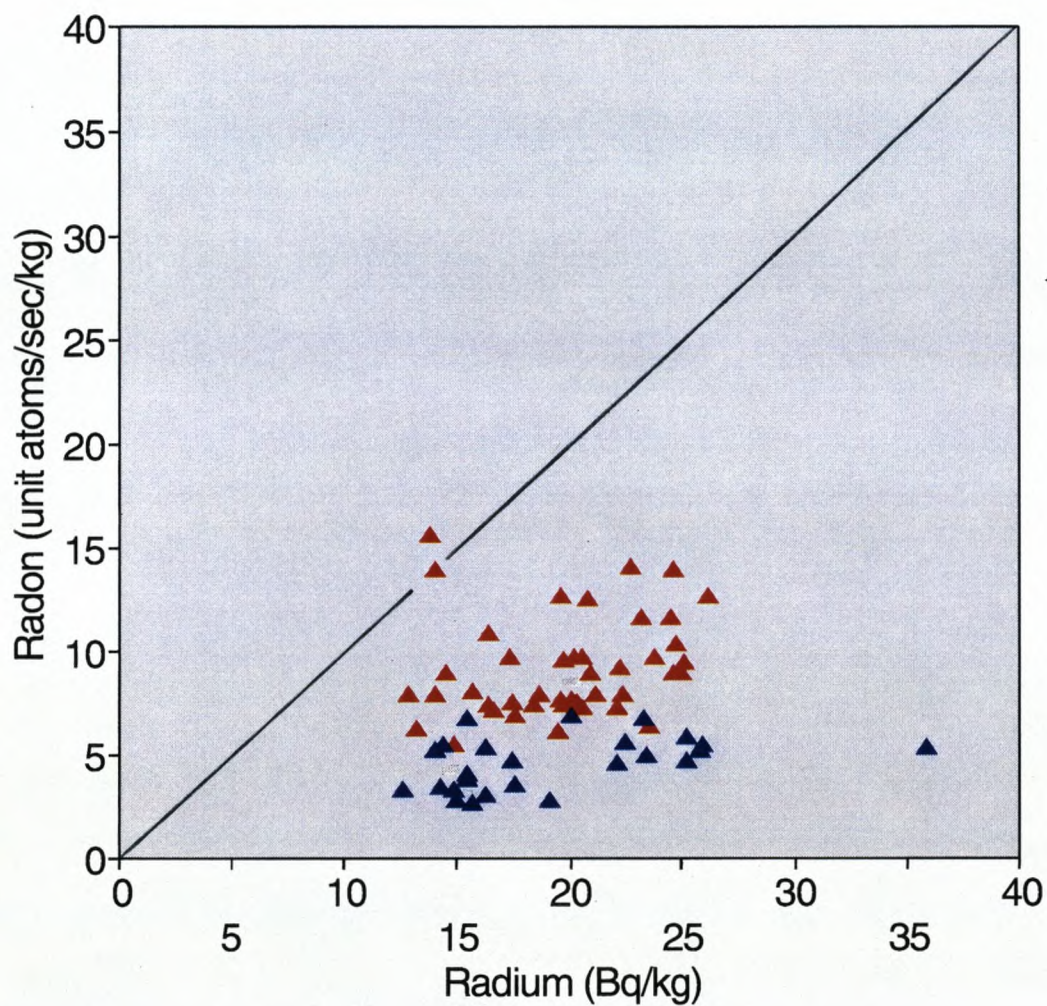


Fig. 52. Relation mellem radium og radon i morænejordarter fordelt efter oxideret-reduceret zone. Linien angiver ideel radon emanation.



Moræneaflejringerne ved Lundeborg, som er opdelt i tre redoxzoner, ser ud til at indeholde aftagende mængder uran og radium ned gennem profilet (fig.26 og 27). Aflejringerens alder er ca. 60.000 år (Nedre Mellem Weichsel) for den nedre moræneler og evt. 18.000 eller 15.000 år for den øvre moræneler. Kalkudvaskningen er nået 3-4 meter ned, og redoxgrænsen ligger i 3 meters dybde, d.v.s mindst lige så dybt som i de ældre morænelere ved Andrup. Udvasningen i de øverste oxiderede lag har mobiliseret uran, men det ser dog ikke ud til at blive genudfældet i det reducerede miljø. Uran og radium niveauerne i den oxiderede zone ligger i Lundeborg på linie med Andrup, mens de i den reducerede zone ligger lavere (fig.49 og 50). Disse forhold kan også skyldes oprindelsen, hvor den nederste Lundeborg moræneler er kommet fra sydøst og den øverste muligvis også fra sydøst eller fra nordøst.

Radon emanations raterne ved Lundeborg er generelt også zoneret med højeste værdier i det oxiderede, kalkfri, moræneler, hvorefter værdierne bliver lavere nedad i det oxiderede, kalkholdige moræneler og det reducerede, kalkholdige moræneler (fig.19). Værdierne ligger højere end ved Andrup i alle zoner og er også højere end ved Viby i de oxiderede zoner, mens de i den reducerede zone her er på linie. Forholdene er opbygget som ved Risø (Majborn et al., 1988), men med højere værdier og større variation i dem.

Forklaringen på, at redoxgrænsen og kalkudvaskningsfronten ligger dybere i moræneleret ved Lundeborg fra Weichsel end i Saale moræneleret ved Andrup, kan være de ændringer, der er forgået på bakkeøerne gennem ca. 130.000 år. Bakkeøerne har nu et relativt fladt terræn, som må være opstået ved omfattende erosion forårsaget af vind og vand. Det vil sige, at betydelige mængder materiale kan være flyttet og dermed er den oxiderede zone og kalkudvaskningszonen blevet reduceret i tykkelse. Samtidig kan der have været et højtliggende grundvandsspejl, som har dækket de nuværende reducerede lag og dermed har modvirket redox og udvaskningsprocesserne.

Morænelersaflejringerne ved Viby, som er ca. 15.000 år gamle (Sen Mellem Weichsel), har de højeste af de fundne radium værdier, bortset fra Bornholm (fig.34 og 35). Disse værdier ligger på linie med værdierne i andre undersøgte Weichsel morænelere (Damkjær & Korsbech, 1985, Andersen, 1992), som stort set er jævnaldrende med Viby lagene. Kalkudvaskningen er ikke løbet til ende i profilet, og kalkholdigt moræneler findes helt til toppen. Redoxgrænsen ligger i tre meters dybde. De sidste 10.000 års nedsivning og opløsning har tilsyneladende kun forårsaget mobilisering af uran i beskedne mængder, måske på grund af morænelerets lave permeabilitet.

Radon emanations rater ved Viby er bemærkelsesværdige af to grunde (fig.36). For det første er de ikke højere end ved Lundeborg på trods af højere radium indhold. For det andet er det påfaldende, at emanations raterne falder i værdi nedad i profilet modsat



radiumindholdet, og Viby er det eneste sted, dette forhold er konstateret. Værdierne svarer til dem fra Risø undersøgelsen indenfor de oxiderede zoner (Majborn et al., 1988). Dette kunne tyde på forskellige permabilitetsforhold, fordi moræneleret i den reducerede zone har vanskeligt ved at afgive og transportere radon, men sammenfaldet med redoxgrænserne er også tydeligt.

Transportforholdene i moræneaflejringen kan beskrives ved permeabilitets værdier og hydraulisk ledningsevne. Generelt er permeabiliteten i moræneleren i graverenden vurderet til at have værdier på  $k=10^{-14}$  m<sup>2</sup>, mens morænesand er vurderet til  $k=10^{-12}$  m<sup>2</sup>. Andersen (1992) har f.eks. målt morænesand til  $k=1.4 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup> og moræneler til  $k=2 \cdot 10^{-15}$  m<sup>2</sup> til  $3,7 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup> indenfor de øvre to meter ved et forsøgsanlæg ved Risø. Variationerne i de målte værdier antyder forskellig permeabilitet i matrix og makroporer.

Den hydrauliske ledningsevne i de opsprækkede morænelerslag er vurderet til at ligge på  $K=10^{-6}-10^{-7}$  m/s, hvilket må antages at være højere værdier end fra de uforvitrede reducerede morænelerslag (mindre end  $10^{-7}$  m/s). Transport i porer i matrix ved primært diffusion er en relativ langsom proces, hvor transportlængden i ler er kort. Transporten i jordluften ved advektion eller konvektion i makroporerne er hurtig i de øvre 2 meter, hvor den hydrauliske (luft) ledningsevne er høj, mens den derimod må forventes at være langsom længere ned i morænelersprofilerne, hvor diffusionsprocesserne dominerer.

### 11.3.3 Danien slamkalk

Danien Etagen er den nederste del af Tertiær Perioden (Nedre Palæocæn), og aflejringerne er ca. 65 millioner år gamle. Slamkalken består af fint kalkslam og mikroskopiske dyre- og planterester. Den indeholder desuden flintlag, som tænkes dannet ved genudfældning af kisel fra tidligere opløste kiselsvampe, der voksede på havbunden. Kalken er således aflejret i havet; et hav som dækkede det meste af Danmark i Danien tid.

Det har vist sig, både ved tidligere undersøgelser og nærværende udført ved Thisted, at danske kalkbjergarter har et lavt indhold af uran og radium (Engell-Jensen et al., 1984, Damkjær & Korsbeck, 1985), og de synes derfor umiddelbart at have et ringe potentiale for radon generering. Uranholdige mineraler dannes og bevares i reducerende havmiljø, hvilket ikke er typisk for de danske kalkbjergarters dannelse, hvor oxiderende forhold har været dominerende, bortset fra i tynde horisonter med nedbrydning af organisk materiale.

Lignende forhold, hvor uran ikke er jævnt fordelt i bjergarterne, er også kendt i udlandet, men der træffes kalkbjergarter med høje radonværdier, som kan relateres til uran-radiumholdige mineraler koncentreret i tynde horisonter. Der er f.eks. tale om fosforholdige eller jernholdige mineraler som fosforit (flourapatit), glaukonit eller hæmatit. Disse mineraler



findes også i tynde horisonter, ofte hærdningshorisonter i danske kalkbjergarter (Knudsen et al., 1995), men de er få, meget spredt geografisk og tidsmæssigt og ikke fundet ved Thisted.

Uranminerale i den umættede, oxiderede zone i kalken vil ofte forvitte og uran vil opløses og transporteres væk i komplekse forbindelser til den mættede zone. Hermed lades radium tilbage i uopløselige komplekser med sulfat og karbonat, og det udfældes og absorberes eventuelt på overfladen af karbonatminerale, udfældede jernoxider eller på overfladen af ler, der findes i kalken. Den umættede kalkzone kan, hvor den er opsprækket, have en høj permeabilitet, hvorfor den ovennævnte proces kan løbe hurtigt.

Huse ved Thisted, der er bygget direkte på kalken eller på et tyndt lag af Kvartære aflejring over kalken, har imidlertid relativt høje radon niveauer (for Danmark) i indendørsluften, selv om der umiddelbart skulle forventes et lavt indhold (jævnfør ovenfor). Damkjær & Korsbech (1988) har desuden ved en undersøgelse på Mors påvist højere radonniveauer i huse liggende på kalken med eventuelt tynd moræne over end i huse liggende på tyk moræneler ovenpå Palæocæn ler med højt radium indhold og stor radone-manation.

Forklaringen på radon forholdene i Thisted området er derfor mere kompleks end for de andre områder, hvor der findes jordarter med mere åbenlyse radonkilder.

Efter at kalklagene blev aflejret for ca. 60 millioner år siden har de været påvirket af en række processer. I perioden efter kalkdannelsen, d.v.s i det meste af Tertiær Perioden, blev der aflejret marine lere (Palæocæn, Eocæn, Oligocæn), og først i slutningen af perioden blev der også aflejret sand og grus både på land og i havet (Miocæn). En del af disse aflejring blev lagt ovenpå kalken for senere at blive næsten helt eroderet bort af istidernes gletschere i Kvartær Perioden, således at kalken nu stort set er den øverste aflejring ældre end de Kvartære lag. Desuden er kalken blevet gennemstrømmet af nedsivende surt regn og grundvand, som har opløst dele af den og eventuelt koncentreret de ikke-kalk dele, der fandtes. Opløsningen er sket i større lodrette sprækker og findes også nu som gruber i kalken.

Opløsningsstrukturerne er et kendt karstfænomen. Fænomenet er tydeligt i graverenden ved Thisted (fig.6 og 7), og kendes også andre steder i Danmark, hvor kalken ligger lige under de kvartære lag som f.eks. ved Limfjorden (Gry, 1979) og på Møn. Karsten er ofte markeret på jordoverfladen som jordfaldshuller. I selve gruberne i overfladen kan findes restmateriale fra den opløste kalk med koncentration af minerale og metaller samt af yngre materiale, der kan være gledet ned i gruberne. Det fede, sorte ler fra Øvre Palæocæn er således bevaret i gruberne og sprækkerne.



Kalklagenes opsprækning har betydning for transport af vand og jordgas. Mange af sprækkerne er opstået på grund af dybereliggende tektoniske bevægelser i kalklagene. En del af sprækkerne er desuden opstået ved istidernes gletscheres påvirkning på de øverste meter af kalken, og undertiden er disse lag helt opknust. I sprækkesystemerne kan findes udfældet materiale som f.eks. gule jernoxider, og der kan også træffes tynde lerlag på sprækkefladerne, som kan være dannet ved residualopløsning, nedvaskning fra oven, udfældning eller ved tektoniske bevægelser. Eksempler på opsprækning, jernoxider og tynde lerlag som ses ved Thisted, er tre parametre som er vigtige for radiumfixering og radon generering.

Mineraler med en stor specifik overflade er særligt velegnede til at adsorbere radium på overfladen, og dermed til at være potential radon generator. Jernoxider og lermineraler er gode eksempler herpå. Organisk materiale vil også kunne indeholde uran og radium og organiske hinder på f.eks. mikroskopiske coccolither kunne teoretisk binde uran.

Undertiden er de øverste kalklag blevet helt opknust og transportéret af gletscherisen, så selv om de ligner primære kalklag umiddelbart, er der tale om en lokal moræneaflejring som ved Thisted. En analyse viser et stort indhold af ikke-kalk materiale, men iøvrigt er radiumindholdet på niveau med kalken. Kalk, der er aflejret af gletscherisens smeltevand, kendes også i Limfjordsområdet, hvor kalksilt fremstår som en omlejret kalkbjergart, der godt kan have andet materiale indlejret i sig (Stenestad, 1968).

Radon emanations raterne er meget lave, som det også tidligere er konstateret for danske kalkbjergarter (Korsbech, 1985, Damkjær & Korsbech, 1985), og det virker ikke umiddelbart sandsynligt, at kalklagene i sig selv kan være radonkilde. Radon emanations raten i det sorte ler fra sprækkezoner og opløsningsgruber i kalken er på 42,4 atomer/(s\*kg), og det har også en høj specifik overflade. Dette forhold peger på potentiel radonkilde.

Forkastninger er en åbenlys transportvej for radon, hvis der er radongenerende mineraler i nærheden af dem.

I lagene over kalklagene træffes således istidens moræneler og morænesand i mere gængs forstand samt muld. Disse lag har alle et højere radiumindhold, som kan tænkes opstået ved residualprocesser ud fra kalken. Sådanne forhold kendes også fra udlandet, hvor et lavt uran-radium indhold i kalklag bliver til en væsentlig radonkilde ved opkoncentrering i ovenliggende lag (Schulz et al., 1992).



### 11.3.4 Hammer og Vang Graniter fra Prækambrium.

Hammer Graniten på Nordbornholm er den yngste granit på øen, som er dannet for ca. 1400 mio. år siden, mens Vang Graniten antages for at være noget ældre. Begge graniter har i smeltet tilstand banet sig vej op gennem de ældre graniter og gnejser, hvis strukturer de tydeligt skærer. Graniterne kaldes intrusive på grund af denne dannelsesmekanisme (Gravesen, 1996b).

Den mellem til grovkornede Hammer Granit med de røde hæmatitprikker ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) har følgende mineralogiske sammensætning: 41 % alkalifeldspat (mikroklin), 18 % plagiklasfeldspat (albit-oligoklas), 33 % kvarts, 1 % hornblende, 4 % biotit (mørk glimmer), 2% Ti-magnetit, samt apatit, epidot, allanit og flusspat i mindre mængder (Callisen, 1934, Michelsen, 1961). I forbindelse med U-Th forholdene er det især allanit, der er interessant.

ALLANIT  $(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Ce}, \text{La}, \text{Y}, \text{Th})_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti})(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O} \cdot \text{OH}[\text{Si}_2\text{O}_7] [\text{SiO}_4]$  (Troger, 1969, Mange & Maurer, 1992) hører til epidot gruppen af mineraler, og blev tidligere kaldt for orthit. Det findes ofte som en kerne i epidot. Det kan ses af formlen, at mineralet også indeholder andre sjældne grundstoffer. Allanit er udbredt i de bornholmske grundfjeldsbjergarter (Jørgart, 1982), men er typisk for Hammer Graniten og mest udbredt i denne. Mineralet må betegnes som svagt radioaktivt, og tilstedeværelse af U og Th i allanit ødelægger mineralets krystalstruktur.

Uregelmæssige pegmatitlegemer med meget grovkornede krystaller findes udbredt i Hammer Graniten. Pegmatiterne består af rød feldspat og glasklar kvarts, ofte inddelt i zoner. Ved Dalegård i Olsker er der fundet en række andre mineraler i en stor pegmatit; mineraler som ellers ikke er almindelige i Hammer Graniten: Lys glimmer (muskovit), violet flusspat, magnetit, zirkon, blyglans og sort gadolinit.

GADOLINIT  $(\text{Y}, \text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Er}, \text{Yb}, \text{Th})(\text{FeBe}_2)[\text{O} \cdot \text{SiO}_4]_2$  (Noe-Nyegaard, 1966, Tröger, 1969) er et svagt radioaktivt mineral, der hører til andalusit-silikatgruppen af mineraler. Mineralet kan findes som cm-store sorte krystaller. På grund af radioaktiviteten nedbrydes mineralets krystalstruktur og det fremtræder glasagtigt. Radioaktiviteten har også sprængt pegmatiten, hvilket viser sig som radierende sprækker ud fra krystallerne (Sørensen, 1967) (fig.53).

ZIRKON  $\text{ZrSiO}_4$  hører også til silikatgruppen. Mineralet kan også være svagt radioaktivt ved at indeholde små mængder U og Th i krystalstrukturen. Det forekommer som små underordnede krystaller i pegmatiterne.



Vang Graniten er ældre end Hammer Graniten, men hører til den yngste intrusive gruppe af graniter på Bornholm. Den grovkornede granit består mineralogisk af: 33 % alkali-feldspat (mikroklin), 22 % plagioklas feldspat, 27 % kvarts, 5 % hornblende, 6 % biotit, 3 % Ti-magnetit, 1 % titanit, 1 % apatit samt fluspat og allanit. Allaniten findes bl.a. i biotiten (Callisen, 1934, Michelsen, 1961). Udover allaniten kan også titanit og apatit indeholde uran og thorium i krystalstrukturen. Begge mineraler kan have et meget lavt indhold af radioaktive stoffer.

TITANIT  $\text{CaTi}[\text{SiO}_4](\text{O}, \text{OH}, \text{F})$  silikaternes olivin gruppe.

APATIT  $\text{Ca}_5(\text{PO})_3\text{F}$  (flourapatit) hører til fosformineralerne.

Vang Graniten er ligesom de andre graniter og gnejser på Bornholm gennemsat af pegmatitgange og årer. Hvor omfattende udbredelsen af radioaktive mineraler, især gadolinit, er i pegmatiterne på Bornholm, vides ikke. På det seneste er der konstateret store, sorte gadolinit krystaller i zonare pegmatiter i Rønne Graniten (fig.53). Rønne Graniten er den ældste granit på Bornholm, men dannelsen af fleste pegmatiter i grundfjeldet tænkes at være foregået stort set samtidig med eller lige efter Hammer Granitens dannelse. Hvis pegmatiterne er dannet ud fra det samme smeltede granitiske restmateriale, er en udbredelse af radioaktive mineraler en mulighed over hele grundfjeldets område. Der træffes dog også lave radiumindhold i pegmatiter som f.eks målt af SIS, (1996)





a.



b.

Fig. 53. a. Sort gadolinit i en grovkornet pegmatitåre i Rønne Granit. b. Gadolinit i tydelig zonar pegmatit med kvartskerne.



Tidligere er der i forbindelse med en undersøgelse af radon i grundvand på Bornholm (Sundhedsstyrelsen, 1987c) konstateret høje radium værdier i Svaneke Granit (mellem 40 og 99 Bq/kg) og i grundvandet ved Listed (1100 Bq/l)(SIS, 1996, DGU ark. nr. 247.121). Svaneke Graniten hører også til de yngre intrusive graniter på Bornholm. Ved Radon-95 projektet blev der også målt radon i huse i Gudhjem, der ikke havde nær så høje niveauer som ved Allinge og Tejn. Desuden angiver SIS (1996) en række værdier for de bornholmske graniter og gnejser, der varierer en hel del i niveauer (se bilag A).

Niveauerne for uran og thorium indenfor hele grundfjeldsområdet er ikke kendt i detaljer. Ud fra kendskabet til bjergartstypernes udbredelse og mineralogiske og kemiske sammensætninger kan man vurdere uran og thorium indholdet til at være relativt lavt, d.v.s. med under 5 ppm U i gennemsnit, men i bestemte zoner vil indholdet være højere på grund af en koncentration af radioaktive mineraler (Gundersen, 1991). En måling af gamma strålingen ved flyvning over Bornholm kunne hjælpe til at fastsætte niveauerne for hele øen (Linden & Åkerblom, 1976, Walker, 1994).

Radon målinger i husluften og i jordluften er foretaget for både Hammer og Vang Graniterne under Radon-95 projektet. Det er de højeste målte værdier i landet (op til 1800 Bq/m<sup>3</sup>), men de er relativt beskedne i forhold til udenlandske områder med graniter og gnejser.

Graniterne er gennemsat af talrige sprækker og sprækkezoner med forskellige orienteringer, og pegmatitgangene er ofte parallelle med disse sprækkezoner. I zonerne kan graniterne være stærkt forvitrede og omdannet til ler eller kaolin.

Radon emanationen sker fra blottede granitflader og fra ikke-vandfyldte høj permeable sprækkezoner over grundvandspejlet. Emanationen og koncentrationen af radon er helt afhængig af tilstedeværelsen af de U og Th holdige mineraler, og at transportforholdene er tilstede. Uran kan være kraftigt koncentreret omkring forvitrede biotitkorn og adsorberet på lermineraler i sprækkezoner (Wanty & Schoen, 1991). Radium er desuden fixeret og adsorberet på ferrioxihydroxider registreret på sprækkeflader.

Det målte lave indhold af U og Th i graniterne, og det beskedne indhold af de lavradioaktive mineraler (allanit, gadolinit, zirkon, titanit, apatit) stemmer godt overens med de målte radonniveauer i husluft og jordluft.

Radiumindholdet i de to graniter er væsentligt højere end for alle andre jordarter i undersøgelsen og en del højere end de målte uran værdier (omregnet fra ppm til Bq/kg). Den højeste værdi er fra forvitret Hammer Granit, som også har det højeste uran indhold. Uranindholdet er lavere end radium indholdet i alle de bornholmske bjergarter, og en



opløsning af uran i det oxiderede miljø har været igang siden graniterens dannelse, og fixering af radium har f.eks. forekommet i leret på sprækkefladerne i de forvitrede graniter. De høje værdier i den forvitrede granit viser da også, at denne tilstand ved graniten er særlig radonpotentiell på grund af mineraltilgængelighed og permeabilitetsforhold.

### 11.3.5 Kortlægning og feltarbejde

De geologiske forhold omkring hver lokalitet er beskrevet i Gravesen (1996a). Basis for forståelsen af lagenes sammensætning og udbredelse er de geologiske kortlægninger, som GEUS har udført både ud fra feltarbejde og fra boringsdata ved Thisted (Gravesen, 1990, Pedersen et al., 1989), Andrup (Jessen, 1922, Gravesen & Bruun-Petersen, 1983), Lundeberg (Madsen, 1902, Milthers, 1959, Gravesen, 1991, Gravesen et al., 1988), Viby (Rørdam, 1889, Salinas, 1993) og Bornholm (Grönwall & Milthers, 1916, Gry 1960, Gravesen & Rasmussen, 1988).

Geologiske kortlægninger er helt centrale og indgår i alle tilfælde, når der udarbejdes f.eks. radonrisikokort som f.eks. i Sverige (Åkerblom, 1987, 1995) og i USA (Schumann, 1993). Begrundelsen herfor er muligheden for at korrelere uran, radium og radon punktobservationer i jord/bjergarterne i både vertikal og horisontal retning ved at sammenligne ensartet dannede og sammensatte lag.



---

## 12. KONKLUSION

---

Projektet er et metodestudie for at undersøge radon niveauer i morænebjergarter (samt i muld, kalk og granit) i både geografisk, horisontal retning og geologisk, vertikal retning. De opnåede resultater kan samles i faglige konklusioner og metodemæssige konklusioner:

### Faglige konklusioner

1. Sammenhængen mellem indhold af uran og radium samt radon emanations rater sat i relation til moræneaflejringeres alder viser en variation, der afspejler alderforholdene.

I det uforvitrede, reducerede moræneler, som repræsenterer det oprindeligt, aflejrede ler, er der generelt det laveste radiumindhold i de ældste lag ved Andrup (130.000 år) og Lundeborg (60.000 år) og de højeste i de yngste ved Viby (15.000 år)(fig.54). For radon emanations raterne er den aldersmæssige forskel også tilstede med 3,2 atomer/(s\*kg) ved Andrup, 4,6 atomer/(s\*kg) ved Lundeborg og 5,3 atomer/(s\*kg) ved Viby. I de forvitrede, oxiderede lag af morænesand og moræneler er denne fordeling knapt så udtalt (fig.55), men i disse horisonter spiller også andre faktorer ind, da senere processer har påvirket aflejringerne efter deres dannelse (se nedenfor).

2. Der har vist sig at være væsentlige forskelle i radon emanations rater i de forskellige redox zoner og forvittringszoner i morænelersaflejringerne (fig.55).

I den forvitrede, oxiderede zone ligger værdierne langt højere end i den uforvitrede, reducerede zone for de samme enheder, d.v.s. af samme alder og sammensætning. De fysiske og kemiske processer, der har præget de øverste aflejringer siden deres dannelse og frem til nutiden, har således medvirket til at åbne op for exponering af radium på især lermineralers overflader i moræneleret og skabe øgede transportmuligheder for radon i makroporerne i den umættede zone. Dette forhold må ligesom alderafhængigheden indtages ved bedømmelse af radonpotentialet på de enkelte lokaliteter.

3. De klare relationer mellem alder og redoxforhold, hvor afledede parametre beskriver aflejringeres sammensætning og struktur, gives et billede af niveauer for radon emanations raterne i moræneaflejringer. Det giver baggrund og mulighed for, at udforme et radon risikokort. Metoden udgør således et "indikatorværktøj", selv om det kun ved målinger kan konstateres, hvad den konkrete radon emanation er.



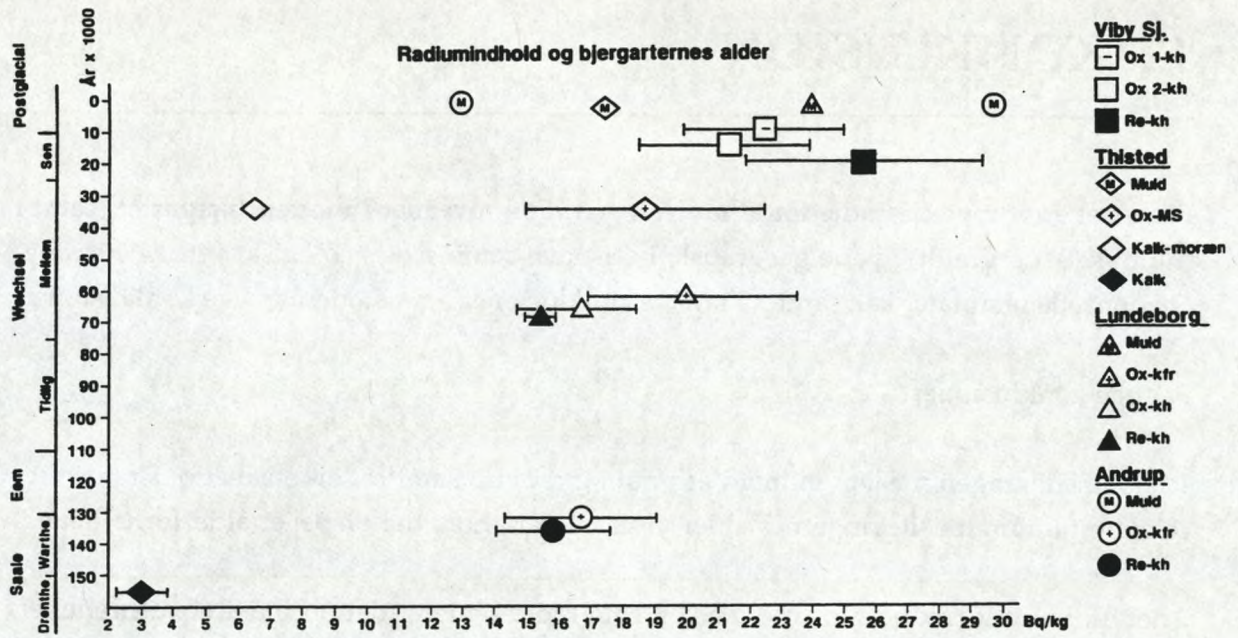


Fig. 54. Radiumindhold (aritmetriske middelværdier med standardafvigelse) sat i forhold til aflejringerens alder. Signaturer: MS=morænesand, muld, kalk samt resten moræneler. Værdien for kalk er placeret i nedre venstre hjørne, og kalkens alder er ca. 65 mio. år.

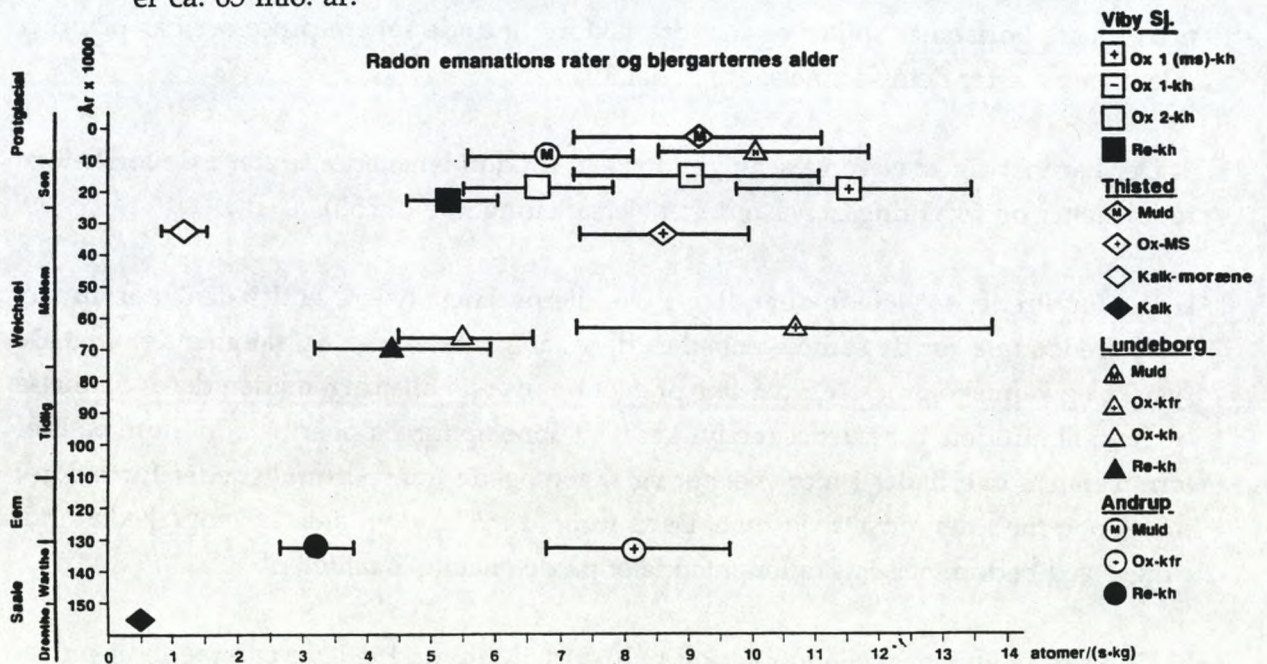


Fig. 55. Radon emanations rater (aritmetriske middelværdier med standardafvigelse) sat i forhold til aflejringerens alder. Signaturer: MS=morænesand, muld, kalk samt resten moræneler. Værdien for kalk er placeret i nedre venstre hjørne, og kalkens alder er ca. 65 mio. år.



4. Muldaflejringerne har i mange tilfælde lige så høje værdier som moræneaflejringerne, og dette er betinget af urans og radiums absorption på planteresterne samt de relativt højerpermeable, ukonsoliderede forhold, der hersker i disse øvre jordlag.

5. Radonforholdene i kalkbjergarterne er vanskelige at forklare bl.a. fordi der er målt høje værdier i huse på kalk ved Thisted selv om radon emanations raterne (og uran og radium indholdet) er meget lave i selve kalken. I de tilfælde hvor kalken overlejres af muld og/eller moræneaflejringer, vil disse jordarter som i det øvrige land være radonkilde. Hvis der ikke er andre aflejringer over kalken, viser nærværende undersøgelser, at Tertiært ler med stor specifik overflade og organisk indhold beliggende i sprækker og gruber i kalken kan have meget høje emanations rater og dermed være en væsentlig radonkilde.

6. Bornholmsk granit er en radon kilde i sig selv på grund af det høje radium indhold, der er påvist ved denne og andre undersøgelser. Desuden indeholder jordluft og indeluft store radon mængder. Radon emaneres både fra rene granitflader og fra forvitret granit i f.eks. sprækker, og der opstår måske især en øget mulighed for radon emanation gennem forvitringen.

#### Metode konklusioner

7. Undersøgelsermetodikken med en kombination af feltundersøgelser (boringer og gravninger), laboratorieanalyser (kemi, mineralogi, tekstur) og alderbestemmelser i horisontal og vertikal retning ser ud til at give nye muligheder for at forklare radons optræden i jordlagene.

8. Anvendelse af metodikken har ført frem til at vise at både alders og lagrelationer, forvitring og redoxforhold har betydning i morænejordarter. Anvendelse af metodikken har desuden hjulpet til at give en forklaring på radons optræden i kalk og til at bestemme radon niveauer i muld. Især har udgravninger kunne angive mere præcist, hvordan lagrelationerne er, og hvorfor radon kan genereres fra disse lag.

8. Metodikken med at vælge aflejringer af kendt alder med en regional udstrækning og undersøge deres radon emanations rater giver grundlaget til at tolke forholdene på landsbasis. Den geografiske fordeling af forskellige jordarter kan dermed sættes i relation til variationer i radonniveauerne i Danmark.



---

## 13. FORSLAG TIL VIDERE ARBEJDE

---

Denne rapport har gjort rede for nogle grundliggende karakterer ved radons tilstedeværelse i morænejordarter, muld, kalk og graniter. For at få en mere indgående forståelse af radons generering og transport vil følgende forhold skulle undersøges:

-Undersøgelse af redoxforholdenes betydning for radon niveauer i danske morænejordarter samt i andre jordarter dannet under istiderne (smeltevandsler-og sand). Undersøgelse af hvad det er ved redoxforholdene, der betinges høj radon emanation.

-Undersøgelse af hvad der er afgørende for radon i muld/morjardarter gennem lermineralogiske og organokemiske analyser.

-Nærmere analyse af alderens betydning for radon forholdene i morænejordarterne.

-Undersøgelse af radon forholdene i andre jordarter (især ældre) set i relation til deres geografiske og vertikale udbredelse. Især vil det være relevant at undersøge bjergarter med radon potentielle mineraler.

-Undersøgelse af områder med gasudtrængning (Hornsherred, Vendsyssel) og sprækkezoner for at vurdere radonforholdene i sådanne områder.

-Udarbejdelse af radon risiko kort på landsbasis. Kortet skal baseres på de radon niveauer i jordarterne og i indeluft i bygninger, som er indsamlet indenfor de senere år. Et radon risikokort vil kunne bidrage til vurdering af exponeringsrisikoen i Danmark og herunder om visse egne er særligt exponerede for radonpåvirkning.



---

## 14. TAK

---

Vi takker Statens Institut for Strålehygiejne for at have målt radium i prøverne. Desuden takkes Birgit Ahlgreen Pedersen for at have foretaget den tekniske kortudarbejdelse og for at have rentegnet figurerne, samt til Gitte Dalsgaard Jensen for at have deltaget i den tekniske færdiggørelse af rapporten.



---

## 15. REFERENCELISTE

---

Ames, L.L., McGarrah, J.E., Walker, B.A. & Salter, P.F., 1983: Uranium and Radium sorption on amorphous Ferric Oxihydroxide.- *Chemical Geology*, 40, side 135-148.

Andersen, C.E., 1992: Entry of Soil Gas and Radon into Houses.- Risø National Laboratory, Risø-R-623 (EN), 85 sider.

Andersen, C.E., Søgaard-Hansen, J. & Majborn, 1992: Radon entry into a simple test structure.- *Radiat. Prot. Dosim.*, vol 45,, side 407-410.

Andersen, C.E., Søgaard-Hansen, J. & Majborn, B., 1994: Soil gas and radon entry into a simple test structure: Comparison of experimental and modelling results.- *Radiat. Prot. Dosim.*, vol. 56, side 151-155.

Agard, S.S. & Gundersen, L.C.S., 1991: The Geology and Geochemistry of Soils in Boyertown and Easton, Pennsylvania.- I: Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water. *Bull. U.S. Geol. Surv.* 1971, side 51-63.

Ball, T.K & Miles, J.C.H., 1993: Geological and geochemical factors affecting the radon concentrations in homes in Cornwall and Devon, UK.- *Environmental Geochemistry and Health*, 15(1), side 27-35.

Ball, T.K., Cameron, D.G., Colman, T.B. & Roberts, P.D., 1991: Behaviour of radon in the geological environment: a review.- *Quaternary Journal of Engineering Geology*, 24, side 169-182.

Bertollini, R., Dora, C., Krzyzanowski, M. & Stanners, D., 1996: Environment and Health 1.- WHO Regional Pub., European Ser., No. 68 - EEA Environmental Monograph, No. 2, side 22-23.

Binzer, K., 1974: Sedimentological and geochemical features of Weichselian tills and pre-Quaternary sediments in Denmark.- *Danm. Geol. Unders., Årbog 1973*, side 111-131.

Bouma, J., 1977: Soil Survey and the study of Water in Unsaturated Soil. - *Soil Survey papers*, No. 13, 108 sider.



Bridges, E.M., 1970: World soils.- Cambridge University Press, 89 sider.

Burkhart, J.F. & Huber, T.P., 1993: Correlation of Indoor Radon Concentration to Commonly Available Geologic Data.- Environmental Management vol. 17, side 249-256.

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

Damkjær, A. & Korsbech, U., 1985: Measurement of the emanation of radon-222 from Danish soils.- The Science of the Total Environment, 45, side 343-350.

Damkjær, A. & Korsbech, U., 1988: A Search for Correlation Between Local Geology and Indoor Radon Concentration.- Radiation Protection Dosimetry, Vol. 24, No. 1/4, side 51-54.

Damkjær, A., Andersen, C.E., Bredstrup, J., Bergsøe, N.C. & Gravesen, P., 1995a: Radon-95. En undersøgelse af effektiviteten af foranstaltninger til reduktion af radonkoncentration i en række danske enfamiliehuse. Delrapport for perioden 30/8-1994 til 29/8-1995.- RISØ 29 August 1995.

Damkjær, A., Andersen, C.E., Majborn, B., Ulbak, K. & Gravesen, P. 1995b: A search profile for Dwellings with elevated Radon levels.- Paper to the Sixth International Symposium on the Natural Radiatiuon Environment, NRE VI, june 5-9 1995, Montreal, Quebec, Canada, 12 sider.

Damkjær, A., Andersen, C.E., Majborn, B., Ulbak, K. & Gravesen, P., i trykken: A search profile for Dwellings with elevated Radon levels.- The Science of the Total Environment.

Danmarks Geologiske Undersøgelse, 1983: Den spektrale- naturlige-gamma-logs anvendelighed ved kortlægning af kvartære råstofforekomster.- DGU, Råstofgeologisk Afdeling, 74 sider.

Engell-Jensen, M., 1981: Den spektrale, naturlige gamma-log.- Dansk geol. Foren. Årsskrift for 1980, side 47-56.

Engell-Jensen, M., Korsbech, U. & Madsen, F.E., 1984: U, Th and K in Upper Cretaceous and Tertiary sediments in Denmark.- Bull. geol. Soc. Denmark, 32, side 107-120.

Ernstsen, V., 1989: Nitratreduktion i moræneler.- Danm. Geol. Unders., Int. Rap., nr.40, 69 sider.



Ernstsen, V., 1990: Nitratreduktion i moræneler.- NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, Nr. B2, 56 sider.

Ernstsen, V., Gravesen, P., Nilsson, B., Bruschi, W., Fredericia, J. & Genders, S., 1990: Transport og omsætning af N og P i Langvad Å opland.I.- NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, Nr. B6, 62 sider.

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

Gates, A.E. & Gundersen, L.C., 1992: Sensitivity of soil radon to geology and the distribution of radon and uranium in the Hylas zone area, Virginia.- *Geol. Soc. Am. Sp. Paper* 271, side 17-27.

Gates, A.E., Malizzi, L. & Driscoll III, J., 1992: Soil radon distribution in glaciated areas: An example from the New Jersey Highlands.- *Geol. Soc. Am., Sp. Paper*, 271, side 45-51.

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

Gravesen, P., 1991: Geologisk Basisdatakort 1312 II Svendborg og del af 1412 III Lohals i 1:50.000.- Udarbejdet af Danmarks Geologiske Undersøgelse for Fyns Amt.

Gravesen, P., 1995b: Geologisk beskrivelse af DGU ark. nr. 130.1184.- *GEUS*, 1995.

Gravesen, P., 1996a: Radon i danske jordarter I. Baggrund og geologiske forhold.- *Danm. Grøn. Geol. Unders. Rapport* nr. 1996/20, 42 sider.

Gravesen, P., 1996b: Geologisk set- Bornholm. En beskrivelse af områder af national geologisk interesse.- *Skov- og Naturstyrelsen*, 208 sider.

Gravesen, P. & Knudsen, J., 1981: Beskrivelse af boreprøver fra vandforsyningsboringer ved Danmarks Geologiske Undersøgelse.- *Vandteknik* nr. 5, side 111-118.

Gravesen, P. & Bruun-Petersen, J., 1983: Geologisk basisdatakort 1113 III Esbjerg i 1:50.000.- Udarbejdet af Danmarks Geologiske Undersøgelse for Ribe amt.

Gravesen, P. & Fredericia, J., 1984: ZEUS-geodatabase system. Borearkivet. Databeskrivelse, kodesystem og sideregistre.- *Danm. Geol. Unders. Ser. D*, nr.3, 259 sider.



- Gravesen, P. & Rasmussen, L. Aa., 1988: Geologisk kort over Danmark. 1:50.000. Kortbladet 1812 III og IV Bornholm. Geologisk basisdatakort.- Danm Geol. Unders. Kortserie, nr. 4.
- Gravesen, P. & Nyegaard, P., 1990: Vandmiljøplanens overvågningsprogram. Landovervågningsoplande. LOOP 4. Hydrogeologisk kortlægning. Lillebæk (1312 II NØ).- Danm. Geol. Unders. Int. Rep., nr. 26, 21 sider.
- Gravesen, P. & Krasnik, M., 1994: Radon i danske jordarter.- Projektbeskrivelse til Sundhedsministeriet, sept 1994, 14 sider.
- Gravesen, P., Petersen, K.S., Binzer, K. & Rasmussen, L.Aa., 1988: Geologisk kort over Danmark. 1:50.000. Kortblad 1312 II Svendborg. Geologisk basisdatakort.- Danm. Geol. Unders. Kortserie, nr. 6.
- Gry, H., 1960: Geology of Bornholm. Guide to excursions nos A 45 and C 40.- Int. geol. Congress. Norden 1960, 16 sider.
- Gry, H., 1979: Beskrivelse til Geologisk Kort over Danmark. Kortbladet Løgstør. Kvartære aflejringer.- Danm. Geol. Unders., I Rk., Nr. 26, 58 sider samt 3 kort og atlas.
- Grönwall, K.A. & Milthers, V., 1916: Kortbladet Bornholm.- Danm. Geol. Unders., I Rk. 13, 281 sider.
- Gundersen, L.C., 1991: Radon in sheared Metamorphic and Igneous Rocks.-I: Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water. bull. U.S. Geol. Surv. 1971, side 39-50.
- Gundersen, L.C., Schumann, R.R., Otton, J.K., Dubiel, R.F., Owen, D.E. & Dickinson, K.A., 1992: Geology of radon in the United States.- Geol. Soc. Am., Sp. Paper 271, side 1-16.
- Hansen, T.O, Krasnik, M. & Gravesen, P., 1994: Radon.- VVS danvak, 10, 29 årg., aug 199, side 59-62.
- Henry, M.E., Kaeding, M.E. & Monteverde, D., 1991: Radon in Soil Gas and Gamma-ray Activity of Rocks and Soils at the Mulligan Quarry, Clinton, New Jersey.- I: Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water. Bull. U.S. Geol. Surv. 1971, side 65-75.
- Holm, L., 1981: Heavy mineral distribution in Weichselian drift successions in eastern Denmark.-Bull. geol. Soc. Denmark, 30, side 1-10.



Houmark-Nielsen, M., 1987: Pleistocene stratigraphy and glacial history of the central part of Denmark.- Bull. geol. Soc. Denmark, 36, side 1-189.

Houmark-Nielsen, M., 1989: Danmark i istiden. En tegneserie.- Varv, nr. 2, side 43-72.

Jacobsen, E.M., 1985: En råstofgeologisk kortlægning omkring Roskilde.- Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1984, side 65-78.

Jacobsen, O.H. & Jensen, H.E., 1990: Unsaturated Hydraulic conductivity of some Danish Tills. - I: Haldorsen, S. (red.): Hydrogeological Properties of Nordic Tills. NHP Report no. 25, side 99-114.

Jessen, A., 1922: Geologisk kort over Danmark (I målestok 1:100.000). Kortbladet Varde.- Danm. Geol. Unders., I rk, nr. 14, 105 sider.

Jørgart, T., 1982: Hallegård-graniten. Dens mineralogi, petrologi og sammenhæng med de andre bornholmske graniter og gnejser.- RUC, Inst. f. geografi, samfundsanalyse og datalogi, forskningsrapport nr. 27, 186 sider.

Knudsen, C., Andersen, C., Foged, N., Jakobsen, P.R. & Larsen, B., 1995: Stratigraphy and engineering geology of København Limestone.- Proceedings. Eleventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, dgf Bull. 11, vol 5, side 117-126.

Korsbech, U., 1985: Radon exhalation from samples of Danish soils, subsoils and sedimentary rocks.- Depart. of Electrophysics. The Technical University of Denmark, 22 sider.

Langtofte, C., 1994: Danske aflejrings sporelement indhold. En status.- Danm. Geol. Unders. Datadokumentation nr. 7, 1994, 42 sider.

Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J. Gravesen, P., Foged, N., Knudsen, B. & Baumann, J., 1988: Vejledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse.- Dansk Geoteknisk Forening, Bull. 1, 114 sider.

Linden, A.H. & Åkerblom, G., 1976: Method of detecting small or indistinct radioactive sources by airborne gamma-ray spectrometry.- Geology, mining and extractive processing of uranium 1976, side 113-120.

Lindmark, A. & Rosen, B., 1984: Radon i jord.- Statens Geotekniska Institut, Rapport no. 24, 64 sider.



Madsen, H.B., 1984: Kompendium i jordbundsgeografi.- Geografisk Institut, NG 4, 71 sider.

Madsen, V., 1902: Geologisk kort over Danmark. Målestoksforhold 1:100.000. Kortbladet Nyborg.- Danm. Geol. Unders., I rk, nr. 9, 182 sider.

Mange, M.A. & Maurer, H.F.W., 1992: Heavy Minerals in Colour.- Chapman & Hall, 147 sider.

Majborn, B., 1992: Seasonal variations of radon concentrations in single-family houses with different sub-structures.- radiation Protection Dosimetry, vol. 45, no.1/4, side 443-447.

Majborn, B., Sørensen, A., Nielsen, S.P. & Bøtter-Jensen, L., 1988: An Investigation of Factors Influencing Indoor Radon Concentrations.- Risø National Laboratory. Risø-M-2689., 56 sider.

McKeague, J.A., Wang, C. & Coen, G.M., 1986: Describing and interpreting the macrostructure of mineral soils - a preliminary report. - Agriculture Canada, Research Branch, Techn. Bull. 1986-2E, 47 sider).

Micheelsen, H.I., 1961: Bornholms grundfæld.- Medd. Dansk geol. Foren., 14 (4), side 308-349.

Milthers, K., 1959: Geologisk kort over Danmark. Målestoksforhold 1:100.000. Kortbladene Fåborg, Svendborg og Gulstav.-Danm. Geol. Unders., I rk, nr. 21 A, 112 sider.

Nazaroff, W.W., 1992: Radon Transport From Soil to Air.- Reviews of Geophysics, 30, side 137-160.

Nielsen, B.L., Løvborg, L., Sørensen, P. & Mose, E., 1987: Gamma-Ray Analyses for U, TH and K on Bulk Cutting Samples from Deep Wells in the Danish Subbsin and the North German Basin.- Risø-M-2646, april 1987, 80 sider.

Noe-Nygaard, A., 1966: Mineralogi.- Munksgaard, 184 sider.

Pedersen, S.A.S, Petersen, K.S., Salinas, I. & Rasmussen, L.Aa., 1989: Jordartskort over Danmark. 1:200.000.- Danm. Geol. Unders. Særudgivelse, 4 kort.

Petersen, K.S., Rasmussen, L. Aa. & Hamberg, L., 1988: Vandmiljøplanens overvågningsprogram. Landovervågningsopland (LOOP 4). Geologisk jordartskort Lillebæk (1312 II NØ).- Danm. Geol. Unders. Int. Rap., nr. 26, 33 sider.



Pershagen, G., Axelson, O., Clavensjo, B., Damber, L., Desai, G., Enflo, A., Lagarde, F., Mellender, H., Svartengren, M., Swedjemark, G.A. & Åkerblom, G., 1993: Radon i bostäder och lungcancer. En landsomfattande epidemiologisk undersökning.- IMM-Rapport 2/93. Stockholm, 26 sider + tabeller.

Risø, 1994: RADON-95. En undersøgelse af effekten af foranstaltninger til reduktion af radonkoncentrationen i en række danske enfamiliehuse.- Projektforslag til Bygge- og Boligstyrelsen, sept, 1994, 7 sider.

Rørdam, K., 1889: Geologisk kort over Danmark. Kortbladene København og Roskilde.- Danm. Geol. Unders. I rk, nr. 6, 107 sider.

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

Schulz, A., Wiggs, C.R. & Brower, S.D., 1992: Geologic and environmental implications of high soil-gas radon concentrations in the Great Valley, Jefferson and Berkeley counties, West Virginia.- Geol. Soc. Am. Sp. Paper 271, side 29-44.

Schumann, R.R., 1993: Geologic radon potential of the glaciated Upper Midwest.- I: Proceedings: The 1992 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, vol. 2, side 8-33 - 8-49.

Schumann, R.R., Owen, D.E. & Asher-Bolinder, S., 1992: Effects of weather and soil on temporal variations in soil-gas radon concentrations.- Geol. Soc. Am. Sp. Paper 271, side 65-72.

Sjørring, S. & Frederiksen, J., 1980: Glacialstratigrafiske observationer i de vestjyske bakkeøer.- Dansk Geol. Foren., Årsskrift for 1979, side 63-77.

Skov-og Naturstyrelsen, 1987: Geofysik og råstofkortlægning.- Råstofkontorets kortlægningsserie 5, 213 sider.

Stanners, D. & Bourdeau, P. (red.), 1995: Europes Environment. The Dobbris Assessment.- European Environment Agency, side 303 og side 370-374.

SIS, Statens Institut for Strålehygiejne. 1996: Måling af indholdet af naturligt forekommende radioaktive stoffer i bjergartsprøver fra Bornholm. Målt i 1982 og sammenskrevet 21. juni 1996, 1 side.



- Stenestad, E., 1968: Nogle kridtlignende kvartæraflejringer i Nordjylland.- Medd. Dansk. geol. Foren., bd. 18, side 285-293.
- Sundhedsstyrelsen, 1987a: Radon-Boliger-Strålingsdosis-Lungekræftisiko.-SIS-RISØ, 14 sider.
- Sundhedsstyrelsen, 1987b: Naturlig stråling i danske boliger.- Sundhedsstyrelsen, okt 1987, 122 sider.
- Sundhedsstyrelsen, 1987c: Radioaktive stoffer i drikkevand.-SIS, 23 sider.
- Søgaard-Hansen, J. & Damkjær, A., 1987: Determing Rn-222 Diffusion Lengths in Soils and Sediments.- Health Physics, Vol 53, no. 5, side 455-459.
- Sørensen, H., 1967: Grundfjeldets dannelse.- Danmarks natur, bd. 1, Landskabernes opståen, side 33-48.
- Tanner, A.B., 1991: Methods of Characterization of Ground for Assessment of Indoor Radon Potential at a Site.- I: Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water. Bull. U.S. Geol. Surv. 1971, side 1-18.
- Tröger, W.E., 1969: Optische Bestimmung der Gesteinbildende Minerale, Teil 2 Textband.- E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 822 sider.
- Walker, P., 1994: Airborne radon hazard mapping - Løten, Hedmark County, Norway.- Norges Geol. Undersøkn., Rap. nr. 93.046, 50 sider.
- Wanty, R.B. & Schoen, R., 1991: A Review of the Chemical Processes affecting the Mobility of Radionuclides in Naturel Waters, with Applications.- I: Field Studies of Radon in Rocks, Solis, and Water. Bull. U.S. Geol. Surv. 1971, side 183-194.
- WHO, Europe, 1994: Concern for Europes Tomorrow. Summary.- World Health Organisation Publications, European Series, No. 53, 88 sider.
- Åkerblom, G., 1987: Investigations and mapping of radon risk areas.- Norges Geol. Undersøk., Sp. pub. 2, side 96-106.
- Åkerblom, G., 1995: The use of airborne radiometric and exploration survey data and techniques in radon risk mapping in Sweden.- IAEA Proceedings: Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies, Vienna, nov.1993, side 159-180.