Undersökning av karstvittring inom Kristianstadsslättens NV randområde och bedömning av dess betydelse för grundvattnets sårbarhet

Robert von Knorring

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
Magisterarbete, nr 432
(30 hp/ECTS credits)

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2015

Undersökning av karstvittring inom Kristianstadsslättens NV randområde och bedömning av dess betydelse för grundvattnets sårbarhet

Magisterarbete
Robert von Knorring

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2015

Innehåll

1 Inledning **7**
2 Undersökningsområde **8**
3 Syfte **8**
4 Mål **8**
5 Tidigare undersökningar **8**
6 Regionalgeologisk beskrivning **8**
6.1 Kristalin berggrund och tektonik 8
6.2 Kaolinavlagringar 10
6.3 Glaukonitsand 10
6.4 Sand och kalkstenar 11
6.5 Kvartära sediment 12
7 Karst **12**
7.1 Definition 12
7.2 Karstformer 12
7.3 Bildningsätt 13
8 Underlagsmaterial **14**
8.1 Kartor och flygfoton 14
8.2 SGUs brunnsarkiv 14
9 Metoder och teori **15**
9.1 Porositetsuppskattning och permeabilitet 15
9.2 Sprickinventering 15
9.3 Att hitta karstfenomen 15
9.4 Undersökning av grundvattnet i området 15
9.5 Geofysiska metoder 15
10 Resultat och tolkning **16**
10.1 Kalkstenens porositet och sprickighet 16
10.2 Doliner och slukhål i undersökningsområdet 18
10.3 Vattennivån vid dolinen i Vanneberga 18
10.4 Referensmätning av kalkstenens resistivitet 20
10.5 Resistivitetsmätning vid dolinen i Vanneberga 21
10.7 VLF-mätning vid dolinen i Vanneberga 21
11 Diskussion **21**
11.1 Kalkstenens sprickighet och permeabilitet 21
11.2 Doliner, slukhål och underjordiska gångar vid Vanneberga ängar 21
11.3 Grundvattnets strömning och sårbarhet 21
12 Slutsatser **22**
13 Tack **22**
14 Referenser **22**

Omslagsbild: Dolinen vid Vanneberga ängar. *Foto Robert von Knorring*

Undersökning av karstvittring inom Kristianstadsslättens NV randområde och bedömning av dess betydelse för grundvattnets sårbarhet.

ROBERT VON KNORRING

von Knorring, R., 2015: Undersökning av karstvittring inom Kristianstadsslättens NV randområde och bedömning av dess betydelse för grundvattnets sårbarhet. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 432, 24 sid. 30 hp.

Sammanfattning: Under våren 2002 undersöktes ett område vid Vanneberga ängar vid Kristianstadsslättens randområde med målet att ge svar på kalkstenens beskaffenhet och dess betydelse för grundvattnets sårbarhet. I området utfördes resistivitets-, självpotential- och VLF-mätningar i syfte att hitta vattenförande zoner i kalkstenen. Kartering av skärningar och slukhål med avseende på karstfenomen gjordes för en diskussion kring eventuella underjordiska gångar. Resultaten utifrån resistivitetsmätningarna kan tolkas som att det kan finnas koncentrerade vattenförande zoner vid dolinen i Vanneberga. Det går också att tolka resultaten som att det råder risk för att utsläpp transporteras snabbt vidare ut på Kristianstadsslätten. Området runt dolinen är dessutom utsatt för rasrisk. Vidare undersökningar i området är föreslagna.

Nyckelord: Karstvittring, krita, dolin, slukhål, geofysik, resistivitet, självpotential, VLF, Vanneberga, Nävlingeåsen, Kristianstadsslätten, Skåne.

Handledare: Hans Jeppsson

Ämnesinriktning: Berggrundsgeologi

Robert von Knorring, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-mail robert.vonknorring@gmail.com

Investigation of a karst region in the NW Kristianstad basin, Scania, and its hydrological vulnerability

ROBERT VON KNORRING

von Knorring, R., 2015: Investigation of a karst region in the NW Kristianstad basin, Scania, and its hydrological vulnerability. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 432, 24 pp. 30 hp (30 ECTS credits)

Abstract: In the spring of 2002, a region at Vanneberga meadows at Kristianstad Plain peripheral region was examined with respect to provide answers of the limestone nature and its significance for groundwater vulnerability. The area was examined with resistivity-, SP- and VLF measurements in order to find water-bearing structures in the limestone. Mapping of karst phenomena were made for the discussion of underground cavities. The results showed that hydraulic conductive anomalies can be interpreted from resistivity analysis and that there may be conductive cavities at the dolin in Vanneberga. It is also possible to interpret the results as a risk that emissions may be transported quickly out to the Kristianstad Plain. The area around the dolin is additionally exposed to risk of collapse. Further investigations are proposed.

Keywords: Karst, dissolution, Cretaceous, doline, sinkhole, geophysics, resistivity, spontaneous potential, VLF, Vanneberga, Nävlingeåsen, Kristianstadsslätten, Skåne.

Supervisor: Hans Jeppsson

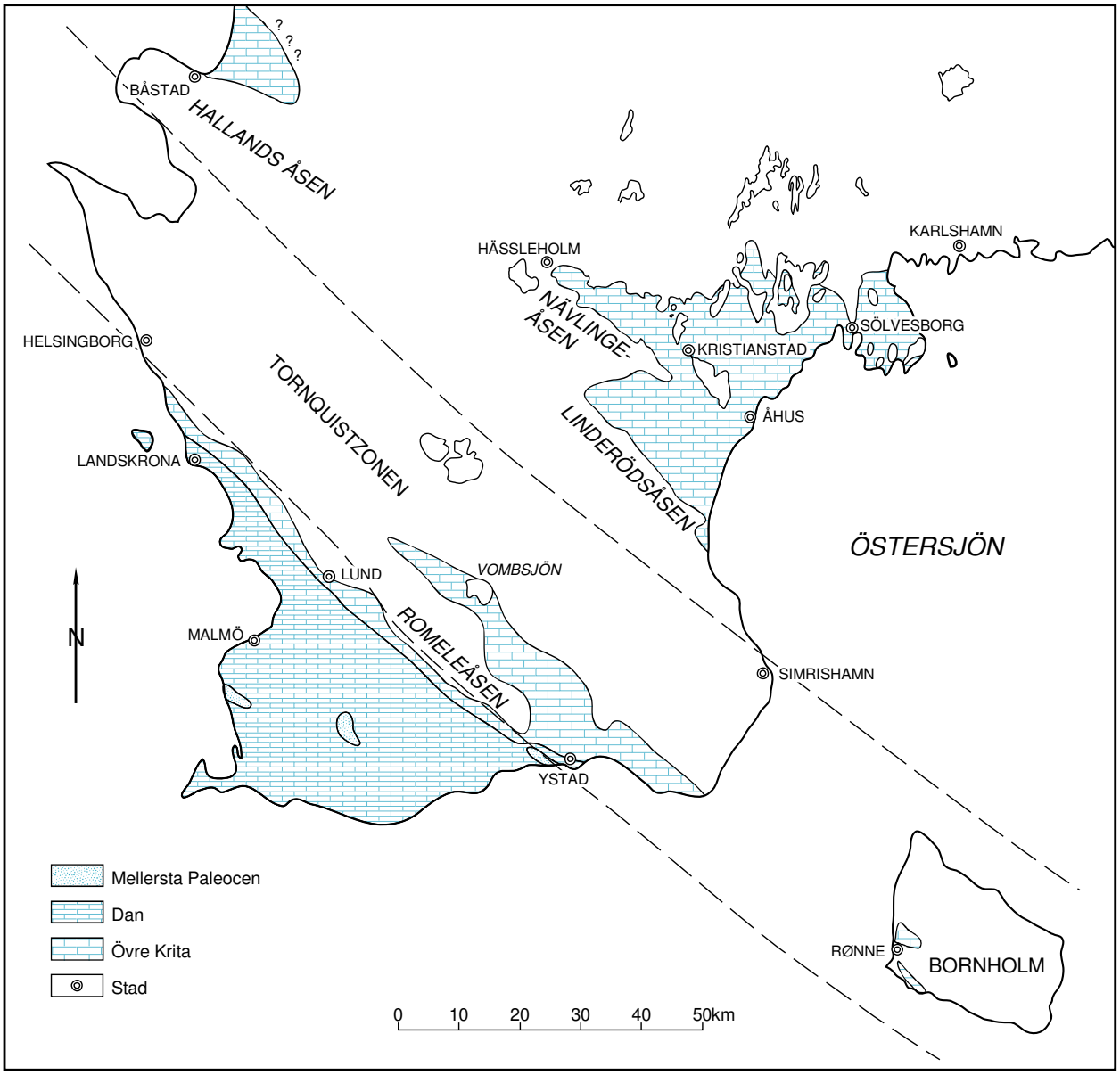
Subject: Bedrock Geology

Robert von Knorring, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail robert.vonknorring@gmail.com

1 Inledning

I Sverige består berggrunden på vissa platser till stor del av kalksten. Denna kalksten har varierande konsolideringsgrad, renhet, kornstorleksfördelning, porositet och sprickighet vilket gör att dess vittringsbenägenhet varierar. Då kalksten vittrar, vid och under markytan, sker detta genom upplösning av kalken tillsammans med mekanisk erosion från vatten med suspenderat material i rörelse. Lösta joner och fragment av kalksten samt klastiskt material transporteras bort för att sedan fällas ut, deponeras och avlagras längre ner i systemet. Befintliga sprickor och porsystem ökar sin vidd vilket medför att de hålrum som finns växer. Hålrum minskar kalkstenens hållfasthet och kan medföra instabilitet i berggrunden.

På platser där vittringen varit omfattande hittas ofta kollapsdoliner av olika slag där taket rasat in i underjordiska gångar. Dessa instörtningar har i vissa fall varit förödande för människor och djur då bland annat vägar och byggnader raserats. Gångar som bildats av vittringen har också stor betydelse för transport av grundvatten och därmed transport av föroreningar. Föroreningar, som förstör värdefulla grundvattentillgångar, transporteras dels lösta men även som lättflyktiga aggregerade ämnen. Dessa ämnen kan, förutom att göra grundvattentillgångarna obrukbara, ansamlas i hålrum där de avger gaser som tränger upp till markytan och ge olägenheter för hälsa om gaserna tränger in i ovanliggande byggnader. Undersökning och utvärdering av berggrundens vittringsgrad i kalkstensområden är därmed befogad.



Figur 1. Utbredning av kalkstenens i Skåne (efter Lundegren 1934, Stanfors & Bergström 1966 samt Gustafsson & Norling

2 Undersökningsområde

Den yngre kalkstenen i sydligaste Sverige är främst från kretaceisk och tertiär tid (fig. 1). De resulterande avlagringarna fördelas på fyra områden där Kristianstadsområdet upptar en tredjedel av arealen (Lundegren 1934). De övriga tre områdena återfinns vid Båstad, Vombsänkan och sydvästra Skåne.

Området som undersökts i detta arbete är beläget vid Nävlingeåsens nordöstra rand mellan Ignaberga by och Ullstorps by i sydvästra kanten av Kristianstadsslätten, Skåne (fig. 2). Detaljundersökningar har skett i området kring byn Vanneberga samt vid Ignaberga kalkbrott och Ringeleslätt kalkbrott.

3 Syfte

Genom att undersöka berggrunden i ett område, som troligen utsatts för karstifiering, med hänsyn till dess heterogenitet och sprickor kan en uppskattning av områdets sårbarhet med avseende på grundvattenförorening göras. De olika metoderna som används vid undersökningen kan också utvärderas vilket ger en viss hjälp vid vidare undersökningar i området eller på annan plats. Vidare kan arbetet medföra att fler människor blir intresserade av att arbeta för att bevara den unika miljö som karstlandskap ger.

4 Mål

Undersökningens mål har varit:

- Uppskatta sprickornas omfattning i kalkstenen, dess utbredning och vidd. Porositeten ska om möjligt uppskattas.
- Doliner och slukhål i undersökningsområdet ska dokumenteras med avseende på geografisk placering, typ och morfologi.
- Eventuella underjordiska gångars utbredning och storlek vid Vanneberga ängar ska beskrivas.
- Grundvattnets strömning och sårbarhet i en miljö där karstvittring skett ska utvärderas.

5 Tidigare undersökningar

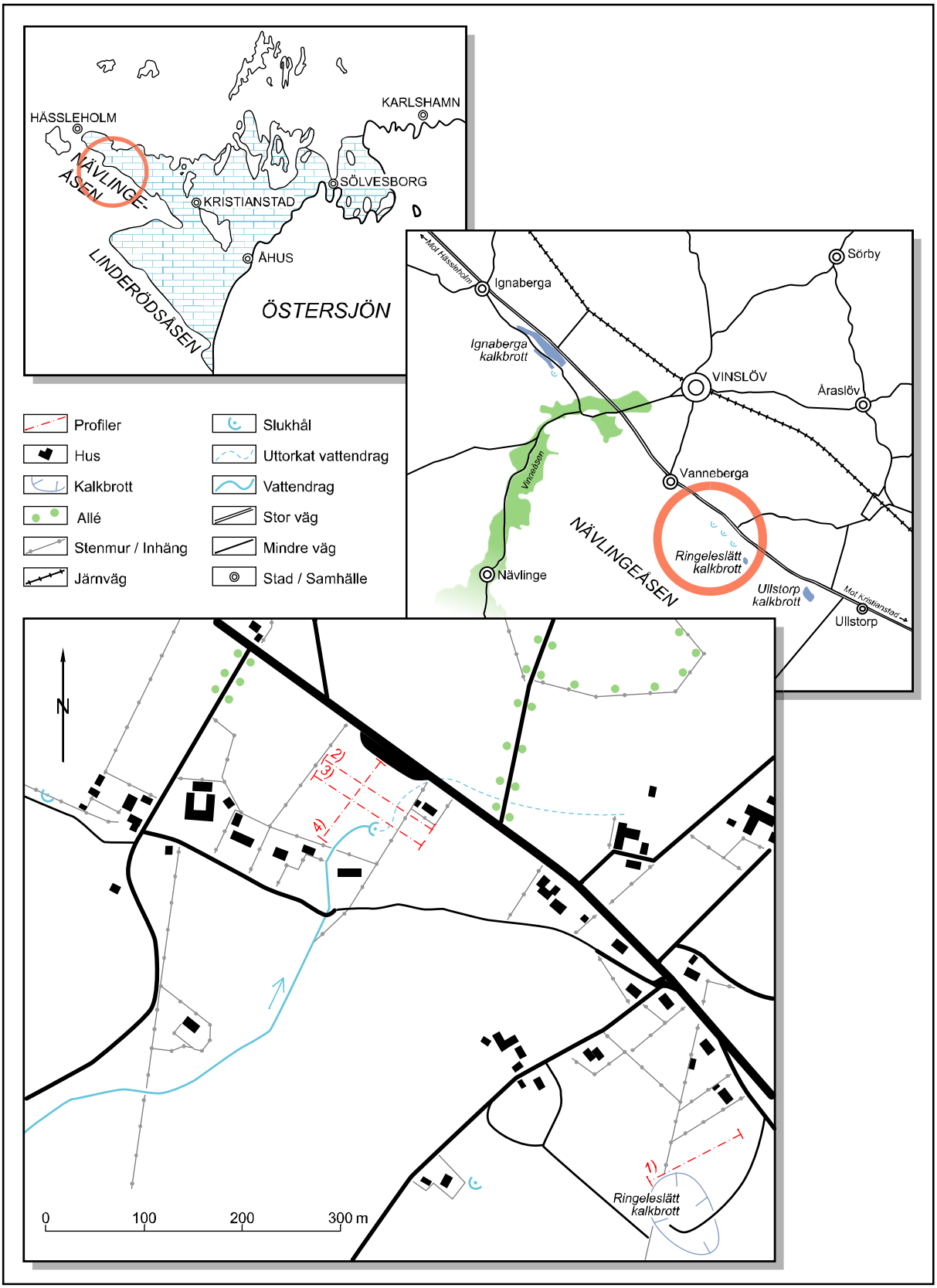
Den kristallina berggrunden, de konsoliderade och okonsoliderade sedimentära avlagringarna samt tektoniken i Skåne är väl beskrivna av Sveriges Geologiska Undersökning, SGU, i beskrivningen till bergrundskartan och flygmagnetiska kartan, Kristianstad SO, serie Af nr. 121, samt beskrivningen till jordartskartan, Kristianstad SO, serie Ae nr. 88. I äldre litteratur beskrevs Kristianstadsbäckenet så tidigt som 1881 av Gerald De Geer i en artikel ur Geologiska föreningens förhandlingar band V där "Lagerföljden inom nordöstra Skånes kritformation" togs upp. En lokalbeskrivning och monografi över Kristianstadsområdets kritbildningar upprättades av Lundegren (1934). Hydrologiska undersökningar har utförts av VIAK (1974). VIAK har även utfört undersökningar av kalkstenens renhet och utbredning vid Ignaberga kalkbrott (VIAK 1986).

Kalkstenens karstifiering är delvis dokumenterad i området. De Geer (1887, 1889) har beskrivit grottor och kalkvittring vid Barnakällegrottan 0,7 km nordöst om Levrasjöns nordöstra ände samt vid Ugnsmunnarna nära Ivöns västra strand. Lindbom (1987) tar åter upp Barnakällegrottan. Hanström (1934) och Freij, Johansson & Tell (1967), har beskrivit Balsbergsgrottan vid Balsbergets sydvästra sluttning väster om Råbelövsjön. Persson (1963) och Hageltorn (1963) har oberoende av varandra beskrivit Hörviksgrottan, belägen på Listerlandet i sydvästra Blekinge. Ugnsmunnarna, Balsbergsgrottan och Hörviksgrottan är också beskrivna av Åkerman (1972). Åkerman (1995) tar upp Hörviksgrottan ur ett speleologiskt perspektiv. Doliner är beskrivna från Mörby backe vid Broeryd (Lundegren 1934; Persson 1963), vid Listerhuvud, 0,7 km sydöst om Getabjärs Torp av Länsstyrelsen i Blekinge län i boken "Upptäck naturen i Blekinge" från 1985 (Kornfält & Bergström 1990) samt i backen mellan Barnakällan och Allarp av Nils-Åke Gabrielsson, skogsvaktare på Trolle Ljungby under 1960-talet (Kornfält & Bergström 1990). Dolinen vid Vanneberga ängar är utsatt på översiktskartan i VIAK (1974) "Geohydrologiska undersökningar inom nordvästra delen av Kristianstadsslätten, Hässleholms kommun 1973-74" och omnämnd i Carserud (1992). Engh (1979) har beskrivit recenta instörtningar i bland annat Skåne där han tar upp grottbildningar i morän vid Röinge, i Anderslöv och i Ignaberga.

6 Regionalgeologisk beskrivning

6.1 Kristallin berggrund och tektonik

Vid Nävlingeåsens nordöstra randzon stupar urberget, huvudsakligen bestående av ögonförande skiffrig gnejsgranit genomsatta av smärre syenitmassiv och permo-karboniska, nordväst-sydostliga diabasgångar, ner under de kretaceiska sedimentära lagren (fig. 3) vilka i sin tur överlagras av kvartära leror, morän och sorterat grövre material (Kornfält et. al. 1978). Urbergsblocken i närområdet delas av en förkastning som stryker N55°V mellan Önnestad och Ignaberga. Sydväst om förkastningen finns Nävlingeåsen som vid Ignaberga troligen höjt sig 125 meter ovanför slättens urbergsyta och ca 200 meter över slättens urbergsyta längre sydost mot N Åsum (Kornfält et. al. 1978).



Figur 2. Karta över undersökningsområdet. Profil 1 – referensprofil resistivitetsmätning Ringeleslätt kalkbrott, profil 2 – Dolinen Vanneberga resistivitetsmätning, profil 3 – Dolinen Vanneberga resistivitetsmätning samt VLF-mätning, profil 4 – Dolinen Vanneberga VLF-mätning.

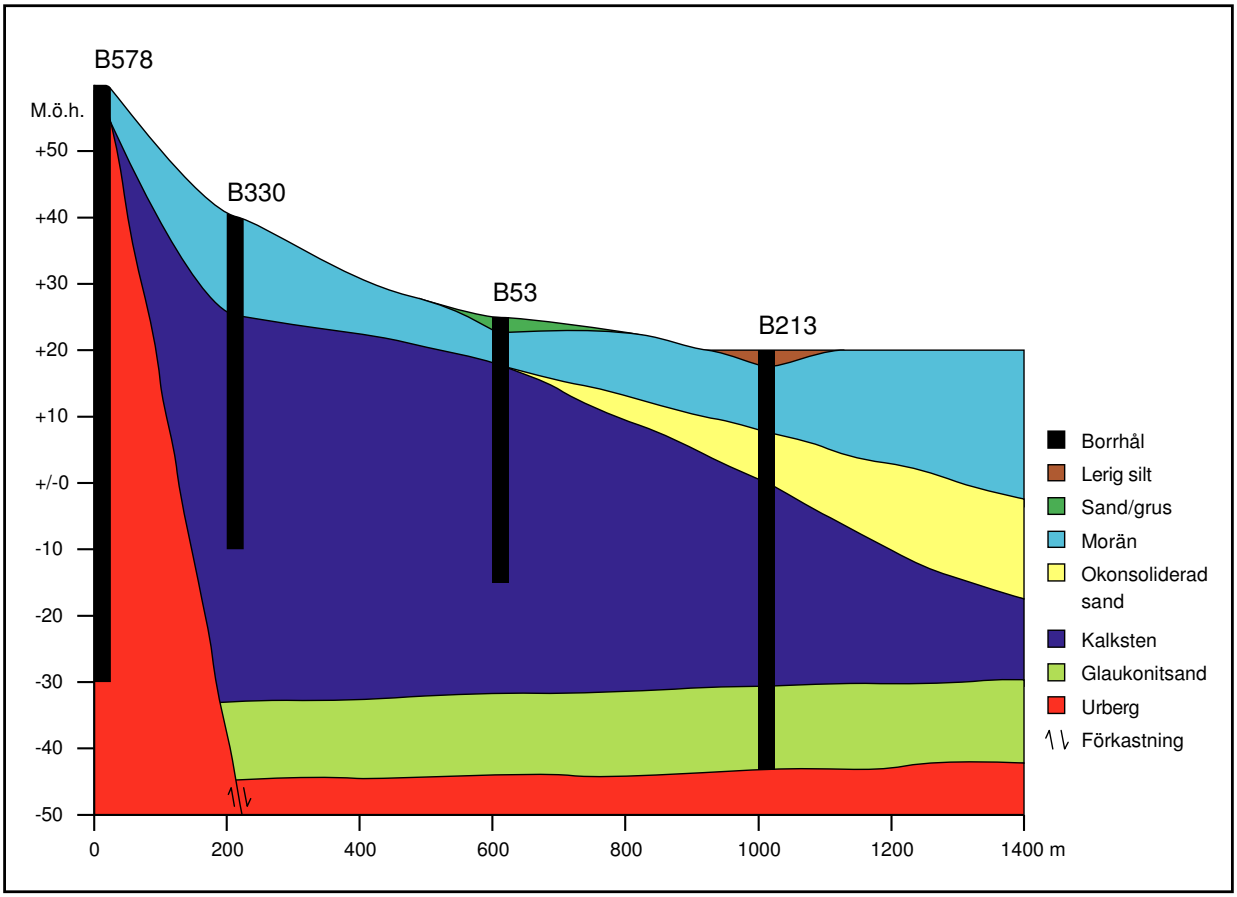
Nordost om förkastningen ut över slätten finns "Vinslövsblocket" vars högsta nivåer är belägna ca 10 m.ö.h. (VIAK 1986). Urberget har här en undulerande yta bildad genom denudation. Urberget bildar på vissa platser långsmala bäcken i nordväst-sydostlig riktning. I trakten kring Ignaberga och Vinslöv är urberget dock relativt flackt med en svag höjning mot norr. Hela blocket har rört sig nedåt i förhållande till Nävlingeåsen under tidig kretaceisk tid (fig. 4). Rörelsen avtog troligtvis i äldre campan (Kornfält et. al. 1978).

6.2 Kaolinavlagringar

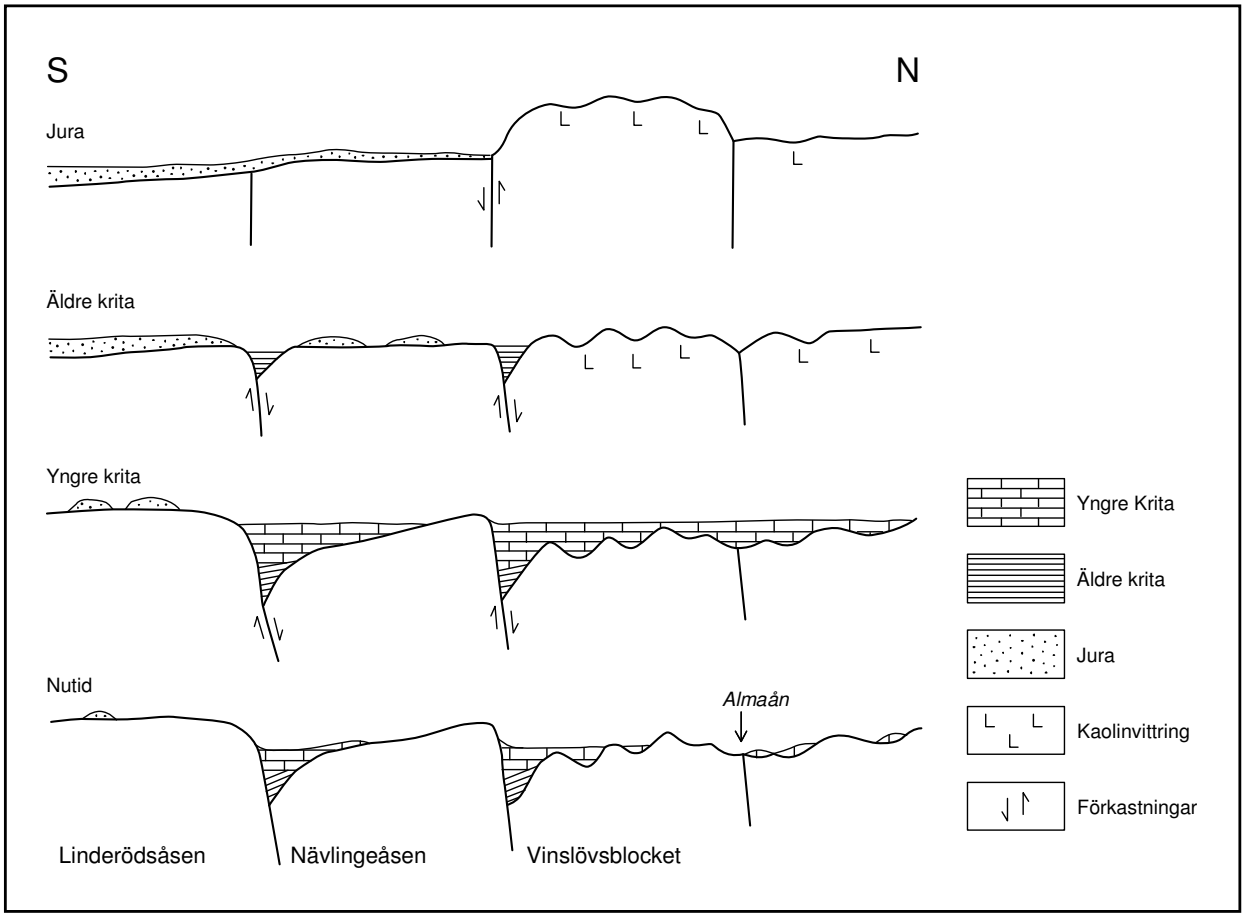
I kontakten mellan urberget och de kretaceiska sand- och kalkavlagringarna finns sedentära och sedimentära kaolinavlagringar. Kaolinet kommer från vittrat urberg och omsluter på vissa platser block av mer eller mindre friskt urbergsmaterial (Kornfält et. al. 1978). Vittringen skedde i varmt, humidt klimat under perioden yngsta rät till krita då havsnivån höjdes. Den understa leran, residualkaolinet, kan skiljas från den överlagrande sedimentära leran genom färganalys och homogenitet. Residualkaolinet är ofta ljus gulröd till röd eller grön och innehåller kvartskorn samt ofullständigt vittrade urbergsmaterial, medan den sedimentära kaolinleran är grå till grönbrun med mer eller mindre enhetlig textur utan inslag av större partiklar. Man kan tänka sig att den sedentära leran på vissa platser i randzonen är bortspolad av strandnära processer.

6.3 Glaukonitsand

Området var i kretaceisk tid beläget på en breddgrad som idag motsvarar Medelhavets läge (cf. Ziegler 1990). Kristianstadsslätten ingick i en stor havsvik och klimatet var varmt och fuktigt (Lindström et. al.1991). Urberget och kaolinlerorna överlagrades på de flesta håll av grön glaukonitsand som avsattes under lugna förhållanden vid en transgression där materialtillförseln kom från omgivande högre belägna urbergsområden under cenoman och santon (Kornfält et. al. 1978). Sanden är porös och normalt lite cementerad vilket gör den till en mycket god grundvattenreservoar (VIAK 1974). Den uppträder som ett reliefutjämnande täcke över det kuperade urberget (VIAK 1986).



Figur 3. Schematisk sektion som visar lagerföljden vid Nävlingeåsens nordöstra randzon i tvärsnitt från Nävlingeåsen ut mot Kristianstadsslätten (utvecklad efter Kornfält et. al. 1978 samt de litologiska beskrivningarna till brunnarna 3D SO 53; 3D SO 213; 3D SO 330; 3D SO 578 ur SGU´s brunnsarkiv).



Figur 4. Tektoniska rörelser vid Nävlingeåsen och Vinslövsblocket under kretaceisk tid (efter Kornfält et. al. 1978).

6.4 Sand och kalkstenar

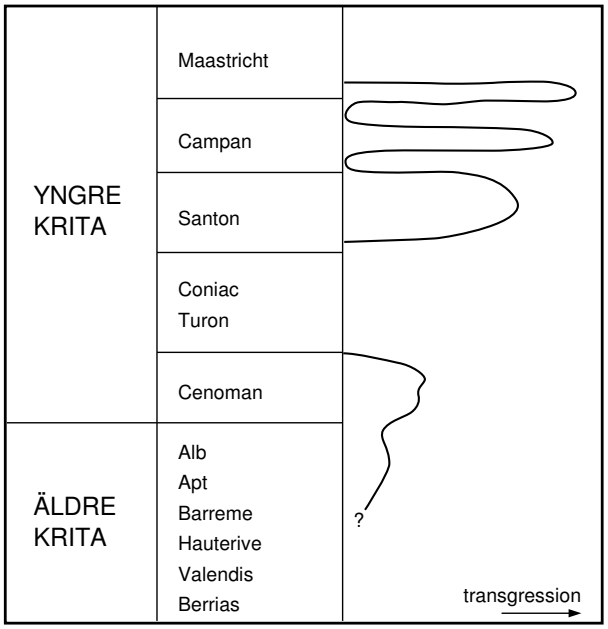
Övriga kretaceiska sediment består av leror, sandstenar och kalkstenar som är mer eller mindre blandade med varandra (Kornfält et. al. 1978). Lerorna och sandstenarna har sitt ursprung från vittrade omgivande högområden. Kalkstenen härstammar från organiska skalrester samt utfälld marin kalcit. Skalresterna kommer bland annat från mollusker, echinodermer, bryozoer och brachiopoder (Lundegren 1934). Kornstorleken varierar beroende på vattnets rörelseenergi i avsättningsmiljön men domineras av sandstorlek, genomgående grövre i de övre lagren (VIAK 1986).

Under kretaceisk tid rådde perioder med relativt lågt vattenstånd varvat med perioder av relativt högt vattenstånd. Fyra omfattande transgressioner gav var och en upphov till lager som kännetecknar denna tid varav den första, som varade under senare delen av äldre krita, endast är känd från borrningar vid Härlöv (Kornfält et. al. 1978). De övriga tre transgressionerna ägde rum under yngre krita i santon, campan och äldre maastricht (fig. 5). Isolerade kritavlagringar nordväst om Kristianstadsslätten vittnar om ett grunt havsbäcken som delade Skåne i en nordostlig och en sydvästlig del och förband Kristianstadsviken med Båstadsbukten marint under en av de kraftiga transgressionerna (Kornfält et. al. 1978). De sistnämnda isolerade avlagringarna har idag, bland annat på grund av den glaciala erosionen under kvartärtiden, liten utbredning.

Försök till biostratigrafisk finindelning av lagerföljderna har gjorts med hjälp av belemniter (Christensen 1975). Dessa är dock oftast för stora och för få för att kunna användas från borrningar. Norling (1974) använde istället foraminiferer då han upprättade ett diagram över foraminiferernas utbredning i de kretaceiska lagren. Denna biostratigrafiska indelning täcker även de äldre lagerföljderna där belemniterna saknas.

I området Ignaberga – Önnestad finns avlagringar av ignabergakalkstenen som har indelats i *Gonioteuthis quarata* scaniensis, *Belemnitella mucronata* och *Belemnellocamax mammillatus* zonerna, vilka ingår i den övre delen av undre campanetagen. Sedimenten utgörs av kalkarenit med ca 85-95 % kalciumkarbonathalt uppdelade i bankar av 0,5-1,5 meters mäktighet. Flinta saknas i området. I kalkareniten finns horisonter med konglomerat innehållande urbergsfragment och belemnitrester. Dessa kan vara avsatta som stormlager (Erlström & Gabrielson 1986). Ignabergakalken uppnår en mäktighet av 0 – 50 meter i randzonen mot Nävlingeåsen (VIAK 1986). Under kalkareniten återfinns ett tunt lager med nästan ren till kalkblandad kvartssand.

Under kvartär tid har de kretaceiska avlagringarna



Figur 5. Transgressioner i Skåne under kretaceisk tid (efter Kornfält et. al. 1978).

utsatts för kompression av inlandsisar samt avlastning vid issmältning varvid horisontella och vertikala sprickor uppkommit samtidigt som de övre kalklagren utsatts för störning. De horisontella sprickorna sammanfaller ofta med bankgränserna i kalkstenen. De vertikala sprickorna, som kan vara upp till 0,1 meter breda förekommer vanligtvis i kalkens översta 2 - 5 meter. Sprickorna är ofta fyllda med kvartärt material (VIAK 1986).

6.5 Kvartära sediment

De kvartära avlagringarna i området består främst av morän (Ringberg, 1991). Under högsta kustlinjen, ca 50-55 m ö.h., är denna moräns övre delar svallad. Mäktigheten varierar från 4-10 meter. Från Krokaröd till Vinslöv finns en markant isälvsavlagring, kallad Vinneåsen, som löper i nordostlig riktning (fig. 2). Vid den första delen, mellan Krokaröd och Nävlinge, är åsen distinkt "getryggformad" och förmodligen bildad subglacialt. Mellan Nävlinge och Nymölla följer ett parti där åsen breder ut sig i lober, innehållande sand, som följer urbergets dalgång (Ringberg, 1991). Loberna är troligtvis bildade vid isranden ovanför kustlinjen. I denna del av sandavlagringarna finns block som tyder på en uppdämning av isen längs Nävlingeåsens sluttning. Blocken kan ha transporterats ut englacialt eller supraglacialt och avsatts som droppstenar. Under högsta kustlinjen, mellan Nymölla och Vinslöv, har åsen bildat 5-15 meter höga kullar med omliggande sandfält som kan vara avsatta subakvatiskt.

Vid vattendragen återfinns ofta svämsediment avsatta under förhållanden med högt vattenstånd. Dessa svämsediment kan bilda decimetertjocka avlagringar av fint material med höga kohesiva krafter och låg permeabilitet vilket ger upphov till små pölar med stagnant vatten.

7 Karst

I vårt land finns stora karstifierade områden. Engh (1980) menar att synlig karstifiering av landskapet förekommer överallt i Sverige där berggrunden består av kalksten som är tillräckligt ren med avseende på kalkhalt och inte täckt med för mäktiga lösa avlagringar. De lösa avlagringarna får inte ha en för hög karbonathalt. Någon annan formbildande process som frostvittring får heller inte dominera över karstifieringen.

7.1 Definition

Ordet karst härstammar från det slaviska ordet kras som betyder naken stenig mark, oftast mindre lämplig ur odlingssynpunkt (Helldén 1974). Normalt menas landskapsformer och dräneringssystem bildade genom upplösning och bortforsling av bergarter i löst form. Liknande lanskapsformer som inte är bildade genom upplösning av berggrunden brukar benämnas pseudokarst. Exempel på dessa är glaciärtunnlar och vulkanogena gångar. Karstformer som fyllts igen eller på annat sätt slutat vara aktiva kan ses i vissa skärningar i kalkstenbrott. Dessa brukar i litteraturen benämnas som paleokarst.

7.2 Karstformer

Karstformer sorteras ofta efter storlek och hur de bildats. Några i litteraturen återkommande termer på former är:

Karren - Karren är den minsta karstformen och är ett samlingsnamn på strukturer som sprickor, gropar eller fåror med en storlek från någon millimeter till några meter. Då dessa förekommer i stor utsträckning bildar de landskapsformen lapies. Karrenstrukturerna som är bildade vid markytan har ofta skarpa kanter medan karrenstrukturer bildade under ett jordlager eller snötäcke oftast har rundade kanter.

Doliner - Doliner är den karstform som vanligast förknippas med karstlandskap. De är symmetriska eller asymmetriska trattliknande depressioner vid markytan bildade genom upplösning av ytnära berggrund, kollaps av underliggande håligheter eller nedspolning av ovanliggande lösa sediment till underliggande håligheter. Dessa tre dolinformer brukar kallas lösningsdoliner, kollapsdoliner respektive alluvialdoliner. De Geer (1889) benämnde de sista som jordfallstrattar.

Karstdalar - I ett karakteristiskt karstlandskap återfinns ofta dalar djupt nedskurna i kalkstenen. Vanligtvis är dessa permanent eller tillfälligt torrlagda (Engh 1980) och kallas då torrdalar. Karstdalar kan börja tvärt och sakna vattendrag i botten vilket kan skilja dem från erosions- eller tektoniskt bildade dalar.

Polje - Den största karstformen är en polje. Denna upp till 10-tals kilometer stora landskapsform är bildad genom depression av underliggande håligheter och har

oftast en flat sedimenttäkt botten (Engh 1980). Ibland kan residualtorn, humer, återfinnas. Under perioder med mycket nederbörd kan poljen svämma över då slukhålen inte förmår att dränera allt vatten på kort tid.

Slukhål och källor - Vattendrag som försvinner ner i berggrunden är vanliga fenomen i ett karstlandskap. Där detta sker bildas ett slukhål som ofta sammanfaller med en dolin. Efter att ha transporterats i gångar, sprickor eller porer i berggrunden kommer vattnet åter fram vid markytan vid källor. Källor med högre vattentryck än omgivande atmosfärtryck benämns artesiska källor.

Karstgrottor - De hålrum som bildas mellan slukhål och källa kan få en diameter på 10-tals meter och utgöra torra, vattenförande eller vattenfyllda underjordiska salar. Storleken på dessa gångar beror framför allt på bergrundens sprickighet, porositet, homogenitet, vattentillförsel och lösbarhet samt hur länge berget utsatts för upplösning. En grotta anses vetenskapligt som en naturlig hålighet med inströmning, som ett slukhål, och utströmning, som en källa, som står i förbindelse med varandra (White 1984). För att dessa hålrum ska få kallas grotta i speleologiska kretsar krävs dock att de är stora nog för en människa att vistas i (Engh 1980).

7.3 Bildningsätt

Utlösningsprocesser - Den nederbörd som faller har normalt en högre koncentration av vätejoner, d.v.s. ett lägre pH, än det vatten som finns i kalkrik bergrund. Då nederbörden perkolerar genom humusskiktet i jorden utjämnas tillfälliga variationer i pH hos nederbörden genom utbyte med jordens väte- och metallkatjoner. Den koldioxid som finns i luften tillsammans med den koldioxid som bildas i humusskiktet av växter och djur diffunderar till vattnet enligt Henrys lag om gasers löslighet i vätskor (reaktion 1 nedan). Lösligheten av koldioxid i vatten minskar med 1,3 % per grad Celsius vid en temperaturökning (Gillison 1996). Den lösta koldioxiden bildar kolsyra tillsammans med vattenmolekylerna (reaktion 2). Kolsyran dissocierar sedan till vätekarbonatjoner och vätejoner (reaktion 3) samt karbonatjoner och vätejoner (reaktion 4) med jämnbördes förhållande beroende på mängden tidigare lösta vätejoner i vattnet.

$$CO_2(g) \quad \Leftrightarrow \quad CO_2(aq) \qquad (1)$$

$$CO_2(aq) + H_2O(l) \quad \Leftrightarrow \quad H_2CO_3 \qquad (2)$$

$$H_2CO_3 \quad \Leftrightarrow \quad H^+ + HCO_3^- \qquad (3)$$

$$HCO_3^- \quad \Leftrightarrow \quad H^+ + CO_3^{2-} \qquad (4)$$

Reaktion (4) sker i huvudsak vid pH>8.

Där berggrunden består av kalciumkarbonat kommer denna att dissociera (reaktion 5) tills jämvikt uppnåtts. Förloppet går mycket fort. Även denna jämvikt är temperaturberoende där en vätska med högre temperatur löser mer kalciumkarbonat. Karbonatjonerna kommer att reagera med vätejoner och bildar vätekarbonat (reaktion 6).

$$CaCO_3(s) \quad \Leftrightarrow \quad Ca^{2+} + CO_3^{2-} \qquad (5)$$

$$H^+ + CO_3^{2-} \quad \Leftrightarrow \quad HCO_3^- \qquad (6)$$

Reaktion (6) medför att mer kalciumkarbonat kan lösas då karbonatjoner bildar vätekarbonat tillsammans med vätejonerna. Bildningen av vätekarbonat kommer att påverka reaktionerna (1-4) vilka uppnår ny jämvikt genom att binda mer koldioxid från atmosfären. Denna nya jämvikt inställes dock mycket långsammare än jämvikten i reaktion (5). Processen fortlöper tills fullständig jämvikt råder i systemet varefter ovanstående reaktioner kan sammanfattas enligt:

$$CaCO_3(s) + H_2O + CO_2(aq) \quad \Leftrightarrow \qquad (7)$$
$$Ca^{2+} + 2HCO_3^-.$$

Där de lösta jonerna kan transporteras bort kommer kalciumkarbonaten fortsätta att gå i lösning varvid systemet benämns aktivt till skillnad från det motsatta passiva systemet. Helldén (1974) hävdar att skillnaden på tropisk och arktisk karstbildning ligger i tidigare nämnda reaktioners temperaturberoende. I ett tropiskt klimat kommer mycket kalciumkarbonat att lösas enligt reaktion (5) medan övervägande reaktion (1-4) verkar i ett arktiskt klimat. Detta leder till mer ytnära upplösningsformer i tropiska områden och mer djupa upplösningsformer i arktiska klimat. Tidigare upplösta subterränga former i tropiska områden kan till och med utsättas för utfällning av kalciumkarbonat varvid eventuella grottbildningar växer igen.

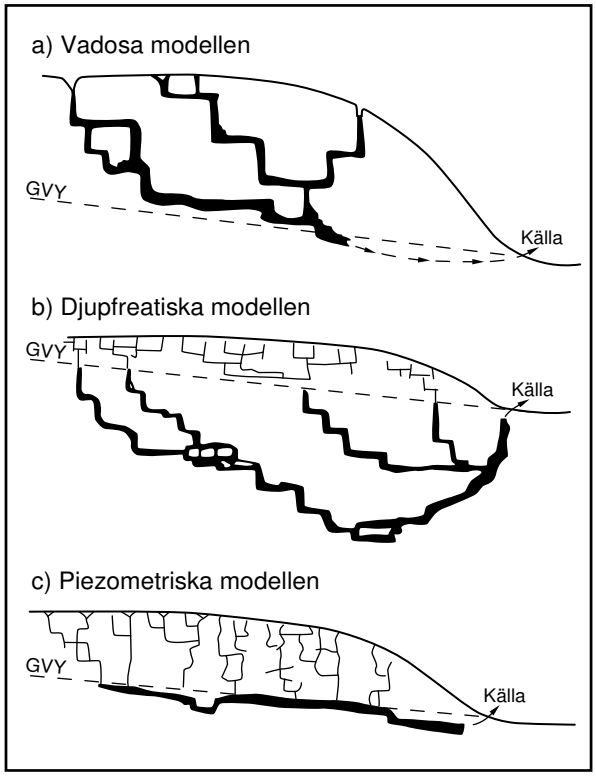
Den vadosa modellen - I tidiga utredningar kring karstbildning lades den vadosa upplösningsmodellen fram (Martel 1921). Martel menade att den huvudsakliga upplösningen skedde i den övre zonen (fig. 6a), ovanför grundvattenytan, där det snabbt rinnande vattnet, med lågt pH, utsatte kalken för både mekanisk och kemisk korrosion.

Den djupfreatiska modellen - Davis (1930) och Bretz (1942) hävdade, i motsats till Martel (1921), att den huvudsakliga upplösningen skedde i den djupfreatiska zonen (fig. 6b) längs Darcys hydrauliska flödesnät. Denna slutsats drogs efter fältundersökningar i Missouri.

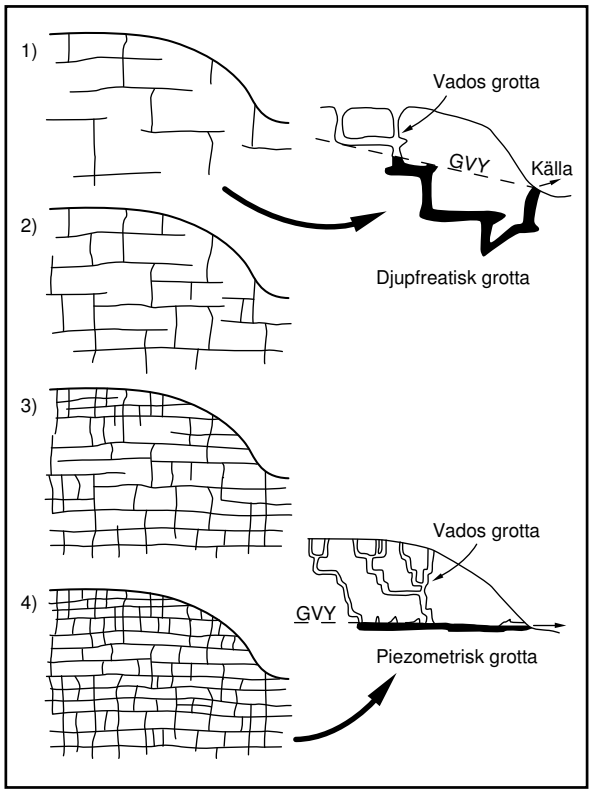
Piezometriska modellen - Swinnerton (1932) menade att Darcys hydrauliska flödesnät inte gällde i kalksten p.g.a. kalkstenens inhomogenitet och anisotropi. Han hävdade att upplösningen skedde i de sprickor och

håligheter som låg närmast den piezometriska nivån (fig. 6c) och att upplösningen prograderade från slukhål till källa. Rhoades och Sinacori (1941) motsatte sig Swinnertons modell och menade att upplösningen följer Darcys hydrauliska flödesnät, men att den främsta upplösningen sker där flödeslinjerna konvergerar mot källan. De fick på så sätt en modell som gav samma resultat som Swinnerton, d.v.s. en piezometrisk modell, men där upplösningen prograderade från källa till slukhål.

Fyrastegsmodellen - Ford och Ewers (1978) sammanfattar ovanstående modeller och påstår att alla tre kan ge upphov till grottbildning beroende på de geologiska och hydrologiska förutsättningarna i ett specifikt område. Där mycket ytvatten samlas och rinner ner i ett fåtal slukhål kommer den vadosa modellen att verka. Den djupfreatiska- och den piezometriska modellen kan enligt Ford och Ewers (1978) ses som ändzonerna i en fyrastegsmodell (fig. 7) där den piezometriska modellen bildas i bergrund med den högsta sprickfrekvensen.



Figur 6. De tre klassiska modellerna för underjordisk karstbildning (efter Ford & Ewers 1978): a) den *vadosa modellen* där upplösningen av berggrunden främst sker ovanför grundvattenytan, b) den *djupfreatiska modellen* där upplösningen av berggrunden främst följer längs Darcys hydrologiska flödesnät under grundvattenytan och c) den *Piezometriska modellen* där upplösningen av berggrunden främst sker nära kontakten av vattenmättad och icke vattenmättad berggrund.



Figur 7. Underjordisk karstbildning enligt fyrastegsmodellen (efter Ford & Ewers 1978). Den djupfreatiska (överst) och den piezometriska modellen (underst) kan enligt Ford och Ewers (1978) ses som ändzoner, där den piezometriska modellen bildas i bergrund med den högsta sprickfrekvensen.

8 Underlagsmaterial

Under förundersökningarna och vid avgränsningen av undersökningsområdet användes tidigare nämnda litteratur från Kornfält et. al. (1978), Kornfält & Bergström (1990), Ringberg (1991) och VIAK (1974) då dessa verk visar att de förutsättningar som krävs för karstifiering bland annat finns i Kristianstadsbäckenet, längs Nävlingeåsens nordöstra randzon.

8.1 Kartor och flygfoton

Det kartmaterial som använts är publicerat av SGU och Lantmäteriet. Det innefattar berggrundskartan Kristianstad SO, serie Af nr. 121, jordartskartan 3D Kristianstad SO, serie Ae nr.88 och topografiska kartan över Sverige 3D SO, samt ekonomiska kartorna 3D 3f Nävlinge, 3D 3g Vanneberga, 3D 3h Önnestad, 3D 4f Ignaberga och 3D 4g Vinslöv.

Flygbilderna 69 Dg 026 15-16, tagna från 4600 meter av Lantmäteriet, användes för morfologisk utvärdering av det avgränsade undersökningsområdet.

8.2 SGUs brunnsarkiv

Vid framställningen av den schematiska geologiska sektionen vid Nävlingeåsens nordöstra randzon (fig. 3) användes data från SGU´s brunnsarkiv av brunnarna 3D SO 53; 3D SO 213; 3D SO 330; 3D SO 578.

9 Metoder och teori

9.1 Porositetsuppskattning och permeabilitet

Porositeten i den fasta berggrunden har beräknats med Archies lag (Archie 1942) enligt:

$$\rho_f = \rho_w * \theta^{m} \Leftrightarrow \theta = (\rho_f / \rho_w) \exp(1/m), \quad (8)$$

där ρ_f är formationens uppmätta resistivitet, ρ_w är vattnets resistivitet, θ är formationens porositet och m är en empirisk konstant beroende av litologin samt jordarternas och berggrundens konsolideringsgrad. I kalksten sätts ofta m till -1,5 vilket använts i denna undersökning. Beräkning av porositet med hjälp av ekvation (8) kräver dock att berggrunden är vattenmättad, d.v.s. resistivitetsvärden tas från den freatiska zonen.

Snow (1968) visar att permeabiliteten i sprickig berggrund är beroende av sprickornas frekvens och bredd enligt:

$$k = (N * b^3) / 6, \quad (9)$$

där N är antalet sprickor över en längdenhet och b är sprickornas bredd. Permeabiliteten får då enheten m^2. Han visar även att bergets porositet beror på sprickfrekvensen och sprickornas bredd enligt:

$$\theta = 3N * b. \quad (10)$$

Porositeten i den karstifierade berggrunden har beräknats från en skärning enligt (10) och jämförts med uträkning av porositeten från resistivitetsvärden över en dolin enligt (8). Detta har legat till grund för tolkningen av porositeten i dolinens närområde. Permeabiliteten har beräknats enligt (9).

9.2 Sprickinventering

Då berggrundens sprickfrekvens har stor betydelse för karstvittring har en sektion i Ignaberga kalkbrott inmätts och avbildats med avseende på sprickor och lagergränser samt dess fyllning. Den avbildade kalkstenen i Ignaberga har jämförts med tidigare undersökningar (VIAK 1986).

9.3 Att hitta karstfenomen

Att karstfenomen förekommer i området längs Nävlingeåsens nordöstra randzon är belagt (VIAK 1974, Engh 1979, Carserud 1992). Genom att följa vattendrag från horsten ned mot Kristianstadsslätten samt genom samtal med lokalbefolkningen har viss inventering av slukhål och doliner möjliggjorts. Försök att hitta större karstformer har gjorts med flygfoton över Nävlingeåsens nordöstra randzon tagna från 4600 meters höjd. Vidare har paleokarst i Ignaberga kalkbrott undersökts. Paleokarsten rensades på lösa avlagringar för färgfotodokumentation.

9.4 Undersökning av grundvattnet i området

Grundvattenytan i berggrunden har mätts upp med hjälp av ljuslod i brunn 3D SO: 330 belägen ca 100 meter söder om dolinen i Vanneberga samt i Ringeleslätt stenbrott. Grundvattenytan i jordlagren har mätts upp i stensatta dagvattenbrunnar belägna i nära anslutning till dolinen i Vanneberga samt i dolinen.

Grundvattnets rörelseriktning över dolinen i Vanneberga har undersökts genom att mäta upp markens självpotential (se nedan). De värden som mättes relativt över en nollpunkt plottades med programmet ”Surfer for Windows, version 7.0” från Golden Software Inc. Data behandlades med interpoleringsmetoden kriging som arbetar enligt en generaliserad, linjär regressionsteknik (Cressie 1990).

9.5 Geofysiska metoder

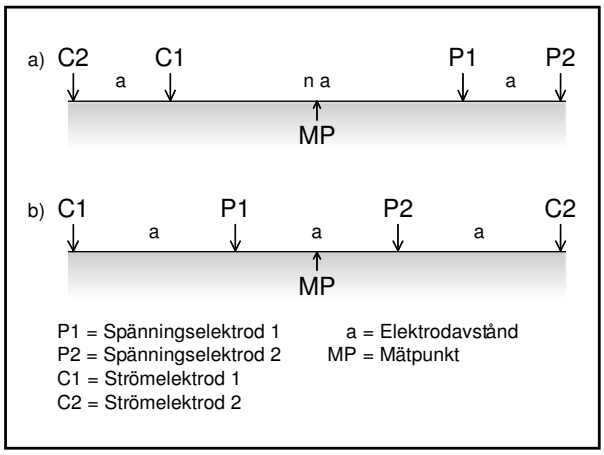
Genom geofysiska mätningar vid markytan kan de underliggande jordlagren och berggrunden undersökas. Vid detta arbete har elektriska resistivitets- och självpotentialmätningar genomförts för att tolka markens heterogenitet och grundvattnets läge samt flödesriktning. Kompletterande mätningar av den elektromagnetiska metoden VLF har också utförts i syfte att finna stora sprickzoner i berggrunden.

Resistivitetsmätning - För närmare undersökning av möjliga zoner med förhöjd porositet under dolinen i Vanneberga uppmättes markens resistivitet med 2-D elektrisk profilering. Teorin bakom elektrisk profilering är bland annat beskriven av Loke (1999). En ström, I, med känd styrka leddes ner igenom två elektroder varefter spänningen, U, mättes i två andra elektroder (fig. 8). Resistiviteten, ρ, i marken kunde därefter beräknas enligt:

$$\rho = G (U / I), \quad (11)$$

där G är en geometrisk faktor. De olika materialegenskaperna i de heterogena jordlagren och berggrunden skulle då ge olika resistivitetsvärden. Förutsättningen var att sprickor och karstgångar under grundvattenytan skulle ge ett lägre resistivitetsvärde än det omgivande icke spruckna berget.

Mätningar gjordes längs två 160 meter långa parallella profiler med en riktning korsande de eventuella gångsystemens antagna riktning från Nävlingeåsen ut mot Kristianstadsslätten. Till profil 2 användes ABEMs Terrameter SAS 4000 tillsammans med LUND Imaging System med elektroduppställning *Dipol-Dipol* (fig. 8a). Elektrodavståndet var 2 meter. Till profil 3 användes samma utrustning med elektroduppställningen *Wenner alpha* (fig. 8b). Elektrodavståndet var även i detta fall 2 meter. Samma uppställning användes vid en referensprofilering, profil 1, vid Ringe-



Figur 8. Resistivitetmätning med elektroduppställning a) Dipol-Dipol och b) Wenner alpha.

leslätt kalkbrott där kalkytan och grundvattenytan var känd. Vid denna mätning begränsades profilens längd till 120 meter. Topografin vid de tre profilerna avvägdes med clinometer och måttstock. Data från de tre profilerna överfördes från mätutrustningen via programmet ”S4Kwin 3.13” från ABEM Instrument AB, Sundbyberg, till programmet ”Res2dinv 3.4” från Geotomo Software, Malaysia, för databearbetning. Den slutliga grafiska behandlingen av profilerna gjordes i programmet ”Erigraph 2.2”, tillverkat av Torleif Dahlin, 1998, vid Lunds Tekniska Högskola.

Självpotentialsmätning – Storleken på markens självpotential, dvs den naturliga spänningsskillnaden mellan två punkter på markytan, beror bland annat på fyra fysikaliska fenomen (Wanfang et. al. 1998). Dessa är (1) redoxprocesser vid metallhaltiga ledare som befinner sig både ovan och under grundvattenytan, (2) diffusion av vätska vid olika lagergränser, (3) temperatur och kemiska gradienter samt (4) flöden av vätskor med lösta joner i porer och sprickor. Samtliga av dessa fenomen ger upphov till en ström. Wanfang et. al. (1998) visar att ett vertikalt flöde av lösta joner i ett slukhål ger upphov till en negativ anomali. De påpekar dock att detta vertikala flöde inte behöver vara helt vertikalt utan bara domineras av den vertikala faktorn.

Markens förmåga att alstra ström genom transport av lösta joner vid dolinen i Vanneberga har mätts med hjälp av ABEMs Terrameter SAS 4000 och två stycken icke självpolariserande elektroder. En elektrod agerade som baselektrod och var placerad i mitten av profil 3 (fig. 2). Värden på markens förmåga att alstra strömmar avlästes allt eftersom den andra elektroden förflyttades i ett rutnät av 50 x 50 meter med 5 meters mätpunktsavstånd. Längsta avståndet från baselektroden till ytterelektroden var 55,9 meter. Data plottades i programmet ”Surfer for Windows”, version 7.0 från Golden Software Inc. och behandlades vid tolkningen med interpoleringsmetoden kriging. Ingen hänsyn togs till topografin i området.

Vid tolkningen av grundvattenflödet antogs vattnets flödesriktning vara perpendikulär mot mätvärdenas isolinjer i riktning från höga värden till låga. Täta isolinjer antogs visa höga och/eller mer vertikala flöden.

VLF-mätning - För kontroll av eventuella stora spricksystem i det undersökta området användes den elektromagnetiska metoden Very Low Frequeny, *VLF*. Metoden bygger på att en fast sändare, belägen på långt avstånd, sänder ut en lågfrekvent radiovåg i frekvensområdet 15-30 kHz. Vågen reflekteras i jonosfären och når sedan markytan med en flack vinkel. Vid markytan refrakteras delar av vågen vertikalt ner i marken. Vågen inducerar strömmar i befintliga elektriska skivformade ledare som i sin tur ger upphov till ett sekundärt magnetiskt fält. Det sekundära magnetfältet är fasförskjutet relativt det primära. Fasförskjutningen beskrivs med realdel och imaginärdel. Det sekundära magnetfältet innehåller, till skillnad från det primära magnetfältet, en vertikalkomponent vilket gör att det sekundära magnetfältet bildar en vinkel mot det primära magnetfältet. Moderna VLF-instrument presenterar, med hjälp av två ortogonala spolar placerade så att den ena är vertikal och den andra horisontell, kvoten mellan det sekundära magnetfälts reella del och primärfältet samt kvoten mellan det sekundära magnetfältets imaginära del och primärfältet i procent. Metoden används vid detektering av sprickzoner i berggrunden då dessa ofta är vattenförande, det vill säga elektriskt ledande, och får formen av en skiva.

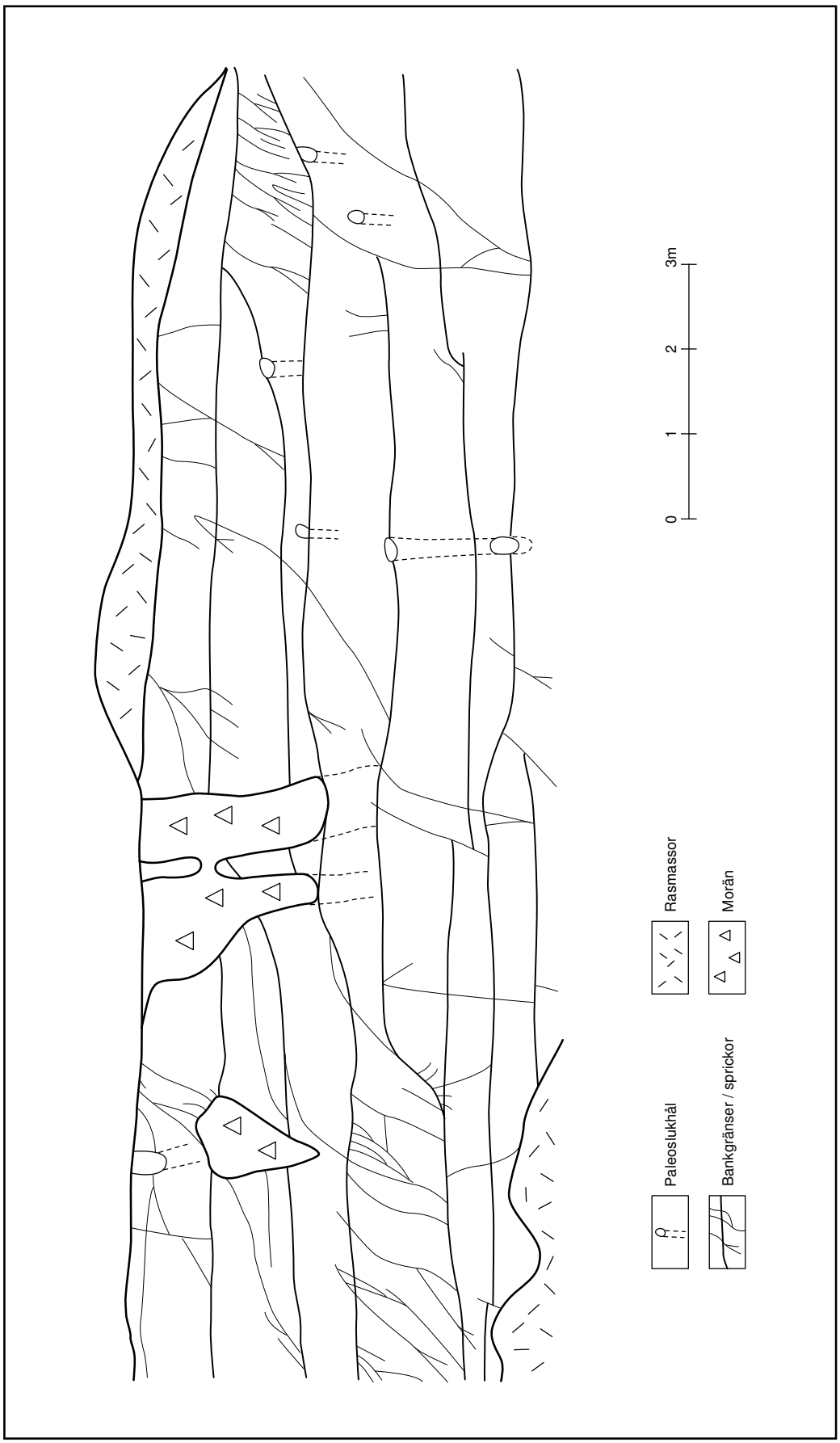
Data längs två korsande profiler över undersökningsområdet mättes med en ABEM Wadi och plottades i diagram med hjälp av programmet ”Excel” från Microsoft Corporation. Diagrammen tolkades grovt genom att fastlägga om anomalier kunde urskiljas.

10 Resultat och tolkning

10.1 Kalkstenens porositet och sprickighet

Den avbildade sektionen från Ignaberga kalkbrott (fig. 9) innehåller sprickor och bankgränser samt paleokarst. Bankgränserna har i stort sett horisontell utbredning och är fyllda med 0-50 mm mäktiga sediment. Dessa sediment har kornstorleken ler till silt och är förmodligen av kvartärt ursprung. Sprickplanen mellan bankgränserna har en stupning på mellan 30° - 90° och har en bredd på 0-30 mm. Även dessa är fyllda med fint material. För porositetsuppskattning, utan hänsyn till fyllningsmaterialet, i de mest sprickiga partierna har en sprickfrekvens på 2,7 st/m tillsammans med medelvärdet 20 mm på sprickornas bredd uppmätts. I partier med få sprickor har motsvarande mätning gett ett sprickfrekvensvärde på 0,4 st/m med medelvärdet 20 mm bredd. Laboratorieundersökningar visar att kalkstenens effektiva porositet är minst 0,1 (VIAK 1974).

Kalkstenens effektiva porositet, θ, har uppskattats genom att tillämpa Archies lag (8) på utvalda resistivi-



Figur 9. Sektion från Ignaberga kalkbrott som visar paleosluk, bankgränser och sprickor.

tetsvärden uppmätta vid dolinens freatiska zon. Partier med tydliga resistivitetsanomalier har ansetts mest intressanta. Det lägsta modulerade värdet vid dolinen var 132 ohmm. Denna punkt mättes upp i dolinens mittpunkt som vid mättillfället stod under vatten. Mätpunkten var då helt omgiven av vatten. Utifrån detta antogs att vattnets resistivitet vid tillfället var 132 ohmm. Anomalier med uppmätt resistiviteter på 200 ohmm, 400 ohmm och 800 ohmm har beräknats vilket gett ett resultat på $\theta_{200} = 0,8$; $\theta_{400} = 0,5$; $\theta_{800} = 0,3$.

10.2 Doliner och slukhål i undersökningsområdet

Hela Nävlingeåsens nordöstra randzon kan anses karstifierad. Då kalkstenen överlagras av okonsoliderade kvartära lager syns karstifieringen endast där doliner bildar avsänkningar i landskapet samt där bäckar upphör och rinner ner i slukhål. Dessa karstformer är i området relativt små och har ej uppfattats på flygfoton.

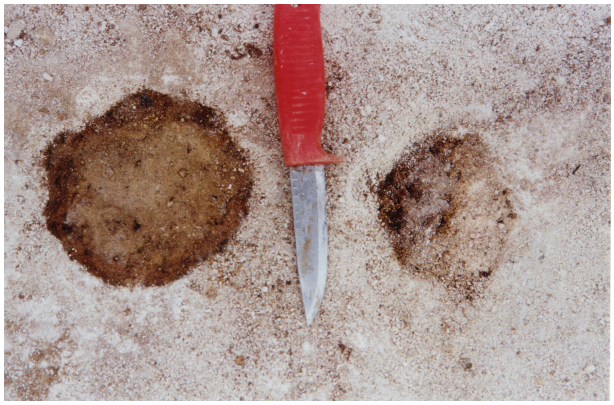
Den enda dolinen som tidigare omnämnts i litteraturen är den i detta arbete undersökta dolinen i Vanneberga. I denna dolin finns två slukhål varav det södra slukhålet bildar ingången till en ca 9 m^3 stor jordgrotta där botten delvis består av kalksten och delvis av lösa material. Knackningar med en spade på kalkstenen resulterade, vid en undersökning av grottan, i ett dovt ihåligt ljud. Vid samma undersökning fördes spaden ner ca en meter i det lösa materialet i grottans djupaste del utan att kalksten påträffades. Slukhålen i dolinen lyckades inte dränera bort allt vatten från den tillrinnande bäcken under vinterregnet i februari till mars 2002 varefter dolinen svämmade över. Under sommartid saknar enligt lokalbefolkningen den tillrinnande bäcken vatten och slukhålen står tomma.

Genom samtal med lokalbefolkningen har ytterligare ett slukhål samt en dolin med slukhål av betydligt mindre storlek än den tidigare kända dolinen påträffats i närheten vid Ignaberga stenbrott (fig. 10). Dolinen observerades ca 150 meter väster om brottet vid Nävlingeåsens sluttning (fig. 2). I området bedrevs dock underjordisk kalkbrytning på 1700-talet vilket kan vara en förklaring.

I Ignaberga stenbrott finns paleokarst i form av slukhål vars diameter varierar från någon decimeter till några meter (fig. 11). Dessa är numera fyllda med material från ovanliggande lager. Kornstorleken varierar från finsilt till sten med inslag av några få block. I paleosluken kan en normalgradering urskiljas radiellt in mot slukhålets centrum (fig. 12). Vissa av paleosluken slutar vid någon av kalkstenens bankgränser där de bildar ”grytor” i underliggande lager. I dessa bankgränser har fint klastiskt material samlats.

Figur 10. Dolin med slukhål observerad ca 100 meter väster om Ignaberga stenbrott vid Nävlingeåsens sluttning. *Foto Robert von Knorring*

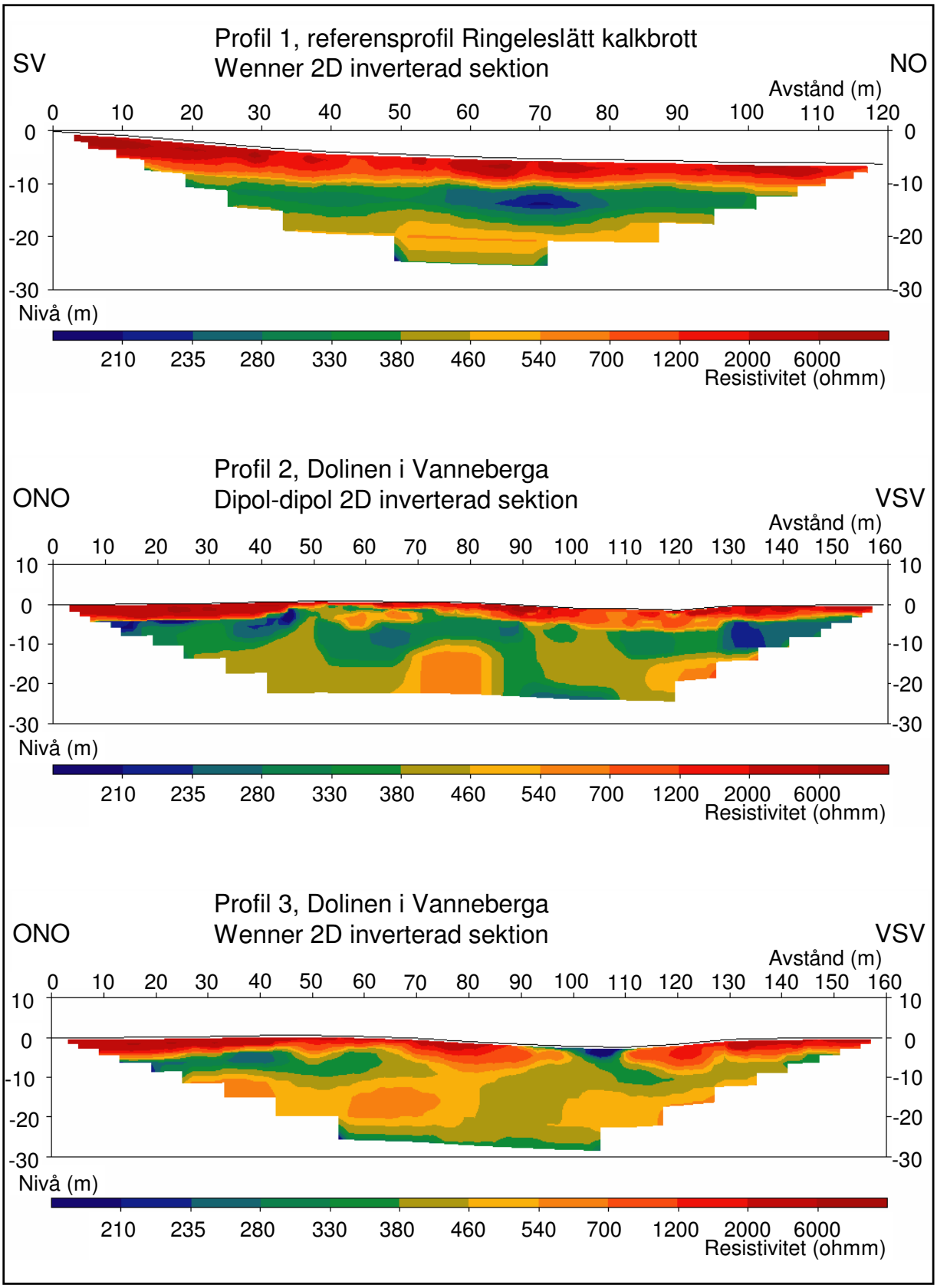
Figur 11. Paleosluk i Ignaberga stenbrott med varierande storlek. *Foto Robert von Knorring*



Figur 12. Paleosluk i Ignaberga stenbrott med radiell normalgradering in mot slukhålets centrum. De mörka partierna indikerar fint material medan de ljusa partierna indikerar grövre material. *Foto Robert von Knorring*

10.3 Vattennivån vid dolinen i Vanneberga

Vattennivån i dolinen i Vanneberga låg under vintern och tidig vår 2002 ovanför markens lägsta punkt. Båda dolinens slukhål var då under vattenytan. Natten mellan den 14-15 mars var kall och vattenytan vid dolinen frös. Vid resistivitetsmätningen av profil 2 den 15 mars kunde, tack vare isnivån, en sänkning av vattennivån mätas till 0,2 meter fram till klockan 11.00 varefter isen helt smält bort. Vattennivån låg vid detta



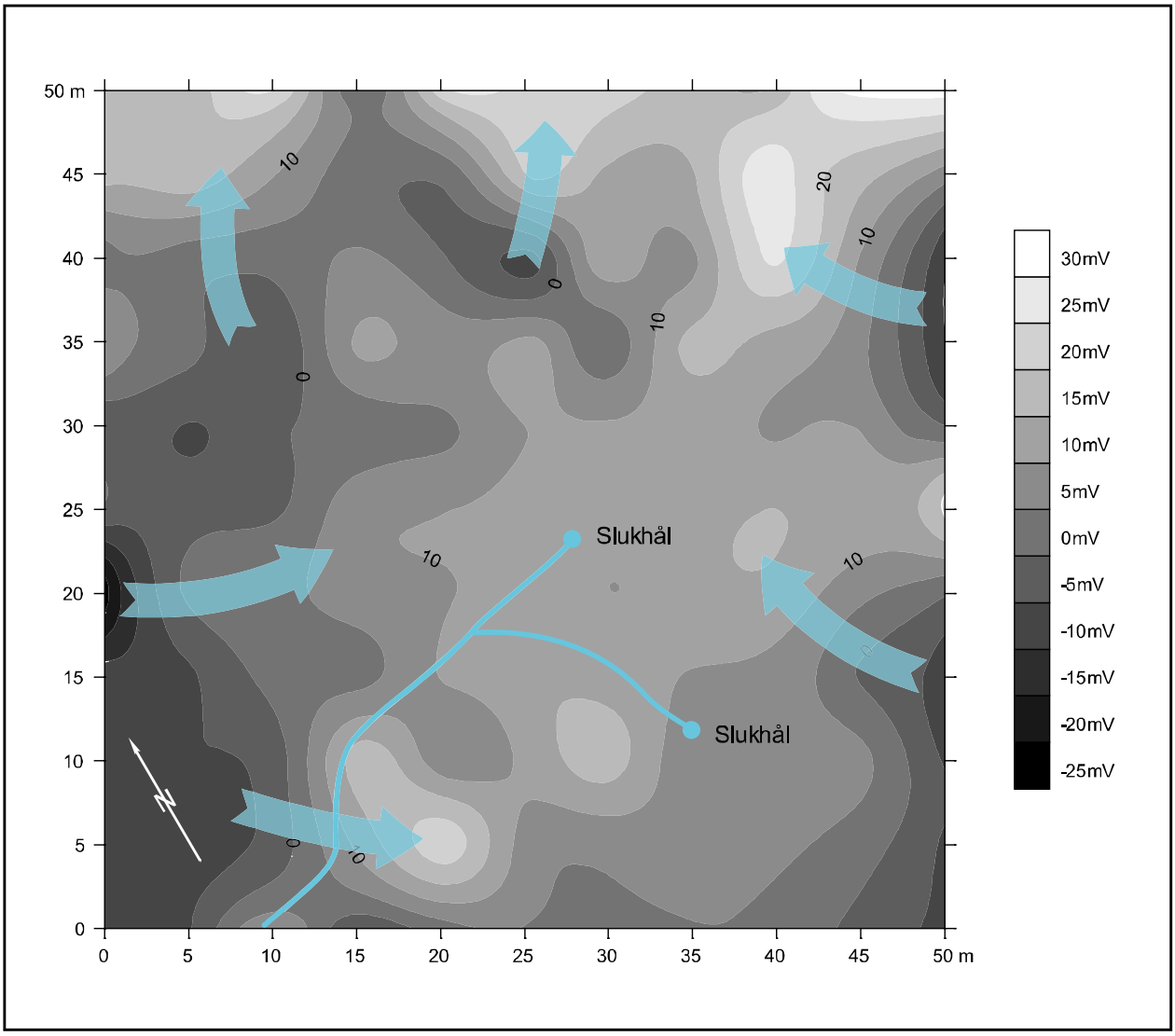
Figur 13. Inverterad sektion med beräknade resistivitetsvärden över a) referensprofil, profil 1, vid Ringeleslätt kalkbrott, b) över profil 2 vid dolinen i Vanneberga och c) över profil 3 vid dolinen i Vanneberga.

tillfälle 2,1 meter under den första resistivitetsprofilens startpunkt och vattendjupet var 0,5 meter. Ingen nederbörd hade fallit de närmast föregående dagarna. Vid resistivitetsmätningen den 4 april noterades att endast det norra slukhålet i dolinen stod under vatten. I det södra slukhålet porlade vattnet från den tillrinnande bäcken ned för att bilda en pöl i botten av den 2,2 meter djupa jordgrotta som bildats i jordlagret direkt ovanför kalkstenen.

Grundvattnet i berggrundens magasin mättes den 28 mars i brunn 3D SO: 330, belägen ca 100 meter söder om dolinen i Vanneberga, till 6,6 meter under markytan. Pumpen var vid mättillfället inte i drift. Samma dag mättes vattennivån i närliggande stensatta brunnar till 0,6 meter under markytan. Vattennivån i jordlagren uppskattades sammanfalla med vattennivån i dolinen.

10.4 Referensmätning av kalkstenens resistivitet

För att få en uppfattning om hur kalkstenens överyta och grundvattenytan uppträder vid bearbetning av de resistivitetsvärden som mätts upp vid dolinen i Vanneberga gjordes en referensmätning (*profil 1* i figur 2) vid Ringeleslätt kalkbrott (fig. 13a). Samma dag mättes grundvattennivån vid stenbrottet till 6,8 meter under markytan. Detta var 1,8 meter under kalkstenens ovanyta. Nivån mättes 10 meter in på referensprofilen från SV där referensprofilen var i direkt anslutning till brottets västra vägg.



Figur 14. Uppmätta SP-värden över dolinen i Vanneberga bearbetade med interpoleringsmetoden kriging.

10.5 Resistivitetmätning vid dolinen i Vanneberga

Profil 2 - Värden uppmätta över profil 2 redovisas i figur 13b.

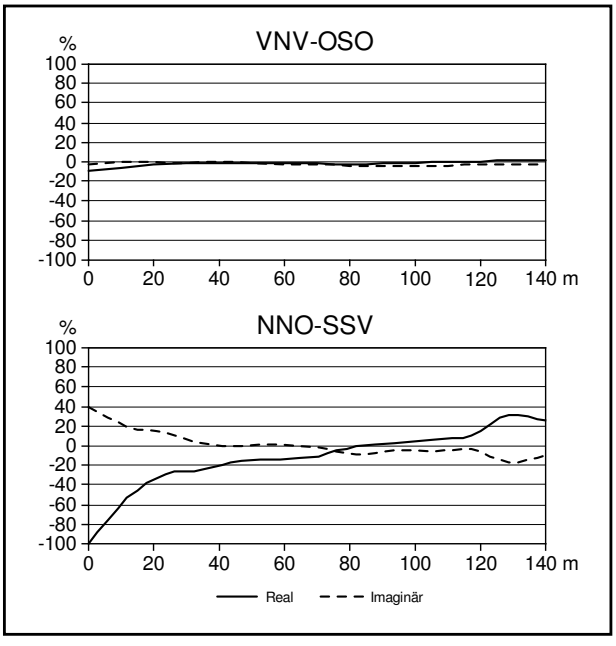
Profil 3 - Värden uppmätta över profil 3 redovisas i figur 13c.

10.6 SP-mätning vid dolinen i Vanneberga

Värden som uppmätts vid SP-mätningen över dolinen redovisas grafiskt i figur 14.

10.7 VLF-mätning vid dolinen i Vanneberga

Värden uppmätta vid VLF-mätning över Vanneberga ängar redovisas i figur 15. Mätningarna gjordes längs profil 3 (fig. 2), benämnd VNV-OSO, och längs profil 4 (fig. 2), benämnd NNO-SSV. De mätvärden som registrerades vid mätningen från väst-nordväst till ost-sydost visar mycket litet variation samt liten skillnad mellan real- och imaginärdel. Mätningen från nord-nordost till syd-sydväst resulterade däremot i en markant skillnad mellan real- och imaginärdel vid profilens början samt en liten skillnad vid profilens slut. Hänsyn måste i detta fall tas till att profilen började vid riksväg 21 och avslutades vid en tomtgräns, båda med närliggande dränering och elledningar.



Figur 15. Uppmätta VLF-värden över Vanneberga ängar.

11 Diskussion

11.1 Kalkstenens sprickighet och permeabilitet

Sprickor i bergrunden har stor betydelse för dess permeabilitet. Då man beräknar porositeten enligt (10) för den avbildade sektionen i Ignaberga kalkbrott får man att $\theta = 0{,}16$ för de sprickiga partierna och $\theta = 0{,}02$ för de mindre sprickiga partierna. Den effektiva porositeten för de sprickiga partierna stämmer väl överens med tidigare undersökningar (VIAK 1974) där ett värde på minst 0,1 nämns. Detta förutsätter att fyllnadsmaterialet i sprickorna inte har för låg effektiv porositet alternativt att sprickorna längre ner i kalkstenen inte är fyllda med sediment.

På liknande sätt kan sprickornas permeabilitetskoefficient uppskattas enligt (9) och ger då $k = 3{,}6 * 10^{-6}$ m^2 för de sprickiga partierna och $k = 0{,}5 * 10^{-6}$ m^2 för de mindre sprickiga partierna.

11.2 Doliner, slukhål och underjordiska gångar vid Vanneberga ängar

Att det funnits underjordiska gångar vid Vanneberga ängar råder ingen tvekan om. Den stora dolinen och karteringen av skärningen bekräftar detta. Frågan är om det fortfarande finns gångar och sprickor som inte fullständigt sedimenterat igen. Vid samtal med markägaren för de berörda delarna av ängarna nämndes att tio kubikmeter sediment tömts över dolinen för att skydda de inhägnade hästarna från att trilla ner i något av slukhålen. Dessa fyllmassor spolades dock snabbt ner och ”försvann” spårlöst. Grundvattenhöjningen orsakad av det kraftiga regnet i februari 2002 bidrog sannolikt till att markens hållfasthet kring det nyupptäckta slukhålet sjönk. Detta ledde till att moränlagret över slukhålet kunde spolas ned tillsammans med vattnet varefter jordgrottan bildades. Materialet från fyllningen och jordgrottan måste ha transporterats ned till en undre belägen hålighet och denna hålighet borde vara stor.

11.3 Grundvattnets strömning och sårbarhet

Det finns två grundvattenmagasin i området. Den översta innefattar jordlagren och den, på vissa platser, okonsoliderade kalksanden medan den understa innefattar kalkberggrundens spricksystem och den underliggande okonsoliderande glaukonitsanden. Dessa står i kontakt med varandra genom sprickor som är mer eller mindre fyllda med sediment. Jordlagrens grundvattenströmmar följer förmodligen topografin i området förutom på vissa platser där avsänkningstrattar bildats p.g.a. nedåtriktat läckage vid slukhål eller pumpning vid brunnar. Detta stöds av mätningarna den 28 mars i stensatta brunnar på olika topografisk nivå vilka samtliga visade en grundvattenyta som var belägen 0,6 meter under omgivande markyta. Nivån i vattenmagasinet har visats vara mycket beroende av ne-

derbörden då vattennivån i slukhålen vid dolinen i Vanneberga varierat vid de besök som gjorts. Mätningarna under förmiddagen den 15 mars visar att läckaget till det underliggande magasinet är stort. Vattennivån i dolinen sjönk 0,2 meter, från den tid då vattenytan frös på kvällen den 14 mars, fram till klockan 11.00 den 15 mars. Små virvlar bildades över det norra slukhålet. Avsänkningen i jordmagasinet var förmodligen ett resultat av minskad nederbörd i förhållande till den nederbörd som fallit i februari och första veckan i mars men kan också bero på utvidgning av slukhålet vid den funna jordgrottan. Mätningen av vattennivån den 4 april i det södra slukhålet, nu beläget inne i jordgrottan, visade vid besöket att grundvattenytan sjunkit ytterligare 2,7 meter och sammanföll med nivån för kalkstenens överyta. Detta gällde trots att bäcken från Nävlingeåsen fortfarande försedde slukhålet med vatten. Bäcken stod vid tillfället inte i kontakt med det norra slukhålet vilket då förmodligen täppts med impermeabla sediment eftersom det fortfarande stod under vatten.

Det undre vattenmagasinets trycknivå mättes den 28 mars till 6,6 meter under markytan i en brunn belägen 100 meter sydväst om dolinens mitt. Kalkytan i brunnen där trycknivån mättes låg enligt brunns- och borrprotokollet ytterligare 4,4 meter ner. Detta, tillsammans med mätningarna av grundvattenytan i det övre vattenmagasinet, visar att de olika magasinen har skilda trycknivåer samt att det undre magasinet är sluten. Den generella rörelseriktningen borde vara nordnordostlig, från Nävlingeåsen ut mot den lägre belägna slätten. På vissa platser i närheten av Vanneberga har det rapporterats om artesiska flöden från detta undre magasin (jmf. VIAK 1974). Man kan då anta att en del av torvavlagringarna, belägna längre ut på slätten, kan sammanfalla med liknande källor.

Mycket av vattenförsörjningen i området tas från det undre magasinet vilket då benämns som en akvifär. Då det visats att läckaget mellan jordmagasinet och berggrundsakvifären är stort i karstifierade områden är också risken för föroreningsspridning stor. Ett utsläpp, orsakad av en eventuell olycka på riksväg 21, i närheten av dolinen i Vanneberga skulle kunna medföra att grundvattnet i området snabbt förorenas. Detsamma gäller även för utsläpp i närheten av den bäck som rinner från Nävlingeåsen till dolinen. Vidare undersökningar, som eventuellt kan ligga till grund för avgränsning av ett vattenskyddsområde, borde göras.

12 Slutsatser

- Omfattningen och frekvensen av sprickor och gångar i kalkstenen vid dolinen i Vanneberga, dess utbredning, vidd samt eventuella fyllning är svårtolkad. Man kan dock tänka sig, med stöd av resistivitets– och SP-mätningarna, att det förekommer vattenförande gångar i nordnordostlig riktning. Den uträknade porositeten är där högre än i de omgivande partierna.

- Paleokarst har dokumenterats i en skärning i Ignaberga kalkbrott. Dessa före detta slukhål, bildade genom upplösning av kalkstenen vid sprickor, var fyllda med kvartärt material och hade en vertikal riktning med avslut i bankgränser.

- Förutom den kända dolinen i Vanneberga ängar har ytterligare en mindre dolin med slukhål observerats ca 150 meter väster om stenbrottet i området. 1) Den stora dolinen borde ha uppkommit genom nedspolning av alluvialt material vid slukhålet. Slukhålet kan ha uppkommit genom kollaps av taket till ett underliggande hålrum i den upplösta kalkstenen eller genom upplösning av den ytnära sprickiga berggrunden. 2) Den lilla dolinen kan ha ett ursprung i kollaps av taket i ett hålrum från tidigare underjordisk kalkbrytning.

- Utsläpp i området kommer att sprida sig snabbt i förmodad nord-nordostlig riktning ut mot Kristianstadsslätten.

- I de fall doliner bildas i kalkstenen finns risk att de ovanliggande kvartära avlagringarna kollapsar med risk för skador på människor, djur och byggnader. Vidare undersökningar med avseende på markens bärighet bör göras.

13 Tack

Jag riktar ett stort tack till min handledare Hans Jeppson som oavkortat stöttat mig både i tidigare kurser och i detta arbete. Han har alltid ställt upp med såväl coaching, idéer och litteratur som med undersökningsutrustning och programvara.

Jag vill också tacka Christian Håkansson för vägledning med de grafiska illustrationerna och uppmuntring till vidare arbete. Utan denna hjälp hade arbetet inte framskridit.

Vidare vill jag tacka lektorer, professorer och personal vid Geologiska institutionen i Lund för ert utmanande sätt att lära ut och ert sätt att låta studenter växa. Tack!

14 Referenser

Archie, G.E., 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Mining Met. Eng.*, 146, 54-62.

Bretz, J. H., 1942: Vadose and phreatic features of limestone caves. *Journal of Geology*, 50, 675-811.

Carserud, L., 1992: *Geologiska sevärdigheter i Skåne*. Sveriges Geologiska undersökning, Lund, sidan 70.

Christensen, W. K., 1975: Upper Cretaceous belemnites from the Kristianstad area in Scania. *Fossils and Strata*, 7.

Cressie, N., A., C., 1990: The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22, 239-252.

Davis, W. M.1930: Origin of limestone caverns. *Geological Society of American Bulletin*, 41, 475-628.

De Geer, G., 1881: Om lager inom nordöstra Skånes kritformation. *Geologiska Föreningens i Stockholm förhandlingar*, Band 9, 395-402.

De Geer, G., 1887: Om Barnakällegrottan, en ny kritlokal i Skåne, med 1 tafla. *SGU Ser. C 90*, 23 sidor.

De Geer, G., 1889: Beskrifning till kartbladet Bäckaskog. *Sveriges Geologiska under-sökning,* Serie Aa, Nr 103.

Engh, L., 1979: Recenta instörtningar av marky-tan. *Svensk geografisk årsbok 55*, 11-18, Geogr. Inst. Lunds Univ., Lund

Engh, L., 1980: Lummelundagrottan med tillhö-rande karstområde. *Svenska grottor nr. 3*, Sveriges Speleologförbund, Stockholm, 290 sidor.

Erlström, M. & Gabrielson, J., 1986: The Upper Cretaceous clastic deposits of Ullstorp, Kristianstad basin, Scania. *Geologiska för-eningens i Stockholm förhandlingar*, Band 107, 241-254.

Ford, D. C. & Ewers, R. O., 1978: The Develop-ment of limestone cave systems in the di-mensions of length and depth. *Can. J. Earth Sci.*, 15, 1783-1798.

Freij, Y., Johansson, E. & Tell, L., 1967: Balsbergsgrottan. *Arkiv f. Svensk Grottf.*, 7, Norrköping.

Gillison, G., 1996: *Caves: Processes, Develop-ment and Management.* Blackwell Publishers Ltd, Oxford, 324 sidor.

Hagelton, B., 1963: Fossil från Hörviksgrottan och dess omgivningar. *Geologiska Föreningens i Stockholm förhandlingar*, Band 85, 274-275.

Hanström, B., 1934: Balsbergsgrottan, Sveriges största naturliga grottbildning. *Skånes Na-tur*, 11, 1-20.

Helldén, U., 1974: *Karst. En studie av Artfjällets karstområde med jämförande korrosion-analyser från Västspetsbergen och Tjecko-slovakien*, Med. från Lunds Univ. Geogr. Inst. Ser. Avhandlingar LXXII.

Kornfält, K-A., Bergström, J., Carserud, L., Hen-kel, H., Sundquist, B., 1978: *Beskrivning till berggrundskartan och flygmagnetiska kartan Kristianstad SO*. Sveriges Geolo-giska undersökning, Serie Af, Nr 121, 120 sidor.

Kornfält, K-A., Bergström, J., 1990: *Beskrivning till berggrundskartorna Karlshamn SV och SO*. Sveriges Geologiska undersökning, Serie Af, Nr 167, 74 sidor.

Lindbom, S., 1987: Barnakällegrottan. *Fauna och Flora*, 82, 167-173.

Lindström, M., Lundqvist, J., Lundqvist, Th., 1991: *Sveriges geologi från urtid till nutid*, Studentlitteratur, Lund, 398 sidor.

Loke, M. H., 1999: *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. http://www.abem.se.

Lundegren, A., 1934: Kristianstadsområdets kritbildningar. *Geologiska föreningens i Stockholm förhandlingar*, Band 56, 125-313.

Martel, E. A. 1921: *Nouveau traité des eaux souterraines*. Editions Doin, Paris, 840 si-dor.

Norling, E., 1974: Identifierade foraminiferer och deras vertikalutbredning. Borrning Kristi-anstad U1B, i Kornfält, K-A., Bergström, J., Carserud, L., Henkel, H., Sundquist, B., 1978: *Beskrivning till berggrundskartan och flygmagnetiska kartan Kristianstad SO*. Sveriges Geologiska undersökning, Serie Af, Nr 121, Fig. 21.

Persson, P. O., 1963: En nyupptäckt grottlabyrint i västra Blekinge. *Geologiska Föreningens i Stockholm förhandlingar*, Band 85, 266-273.

Rhoades, R. & Sinacori, N. M., 1941: Patterns of groundwater flow and solution. *Journal of Geology*, 49, 785-794.

Ringberg, B., 1991: *Beskrivning till jordartskar-tan Kristianstad SO*. Sveriges Geologiska undersökning, Serie Ae, Nr 88, 76 sidor.

Snow, D. T., 1968: Rock fracture spacings, openings, and porosities. *J. Soil Mech. Faund. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 94, 73-91.

Swinnerton, A. C., 1932: Origin of limestone caverns. *Geological Society of American Bulletin*, 43, 662-

693.

White, W. B., 1984: Rate processes: chemical kinetics and karst landform development. Publicerat i: *Groundwater as a Geo-morphic Agent*, 227-248. Redaktör: R.G. La Fleur, Allen & Unwin, Boston.

VIAK AB, 1974: *Hässleholms kommun, Geohydrologiska undersökningar inom den nord-västra delen av Kristianstadsslätten 1973-74*. Uppdragsrapport nr 88.1145, Malmö.

VIAK AB, 1986: *AB Ignaberga kalksten, Igna-berga kalkbrott, Undersökning av bryt-värda kalkförekomster*. Uppdragsrapport nr 5811.3094, Malmö.

Wanfang, Z., Beck, B. F., Stephenson, J. B., 1999: Investigation of groundwater flow in karst areas using component separation of natural potential measurements. *Environ-mental Geology*, 37, 19-25.

Ziegler, P. A., 1990: *Geological Atlas of Western and Central Europe*. - *2nd Ed*. Geological Society Publishing House, England, 239 sidor.

Åkerman, J., 1972: *Speleoklimatologiska undersökningar i några sydsvenska grottor*. Rapp. och notiser 10, Naturgeogr. Inst., Lunds Universitet.

Åkerman, J., 1995: Hörviksgrottan, en svåråt-komlig speleologisk sevärdhet i sydvästra Blekinge. *Blekinges Natur*, 13-27.

Tidigare skrifter i serien ”Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet”:

384. Helmfrid, Annelie, 2014: Konceptuell modell över spridningsvägar för glasbruksföroreningar i Rejmyre samhälle. (15 hp)
385. Adolfsson, Max, 2014: Visualizing the volcanic history of the Kaapvaal Craton using ArcGIS. (15 hp)
386. Hajny, Casandra, 2014: Ett mystiskt ryggradsdjursfossil från Åsen och dess koppling till den skånska, krittida ryggradsdjursfaunan. (15 hp)
387. Ekström, Elin, 2014: – Geologins betydelse för geotekniker i Skåne. (15 hp)
388. Thuresson, Emma, 2014: Systematisk sammanställning av större geoenergianläggningar i Sverige. (15 hp)
389. Redmo, Malin, 2014: Paleontologiska och impaktrelaterade studier av ett anomalt lerlager i Schweiz. (15 hp)
390. Artursson, Christopher, 2014: Comparison of radionuclide-based solar reconstructions and sunspot observations the last 2000 years. (15 hp)
391. Svahn, Fredrika, 2014: Traces of impact in crystalline rock – A summary of processes and products of shock metamorphism in crystalline rock with focus on planar deformation features in feldspars. (15 hp)
392. Järvin, Sara, 2014: Studie av faktorer som påverkar skredutbredningen vid Norsälven, Värmland. (15 hp)
393. Åberg, Gisela, 2014: Stratigrafin i Hanöbukten under senaste glaciationen: en studie av borrkärnor från IODP’s expedition nr 347. (15 hp)
394. Westlund, Kristian, 2014: Geomorphological evidence for an ongoing transgression on northwestern Svalbard. (15 hp)
395. Rooth, Richard, 2014: Uppföljning av utlastningsgrad vid Dannemora gruva; april 2012 - april 2014. (15 hp)
396. Persson, Daniel, 2014: Miljögeologisk undersökning av deponin vid Getabjär, Sölvesborg. (15 hp)
397. Jennerheim, Jessica, 2014: Undersökning av långsiktiga effekter på mark och grundvatten vid infiltration av lakvatten – fältundersökning och utvärdering av förhållanden vid Kejsarkullens avfallsanläggning, Hultsfred. (15 hp)
398. Särman, Kim, 2014: Utvärdering av befintliga vattenskyddsområden i Sverige. (15 hp)
399. Tuvesson, Henrik, 2014: Från hav till land – en beskrivning av geologin i Skrylle. (15 hp)
400. Nilsson Brunlid, Anette, 2014: Paleoeko logisk och kemisk-fysikalisk undersökning av ett avvikande sedimentlager i Barsebäcks mosse, sydvästra Skåne, bil dat för ca 13 000 år sedan. (15 hp)
401. Falkenhaug, Jorunn, 2014: Vattnets kretslopp i området vid Lilla Klåveröd: ett kunskapsprojekt med vatten i fokus. (15 hp)
402. Heingård, Miriam, 2014: Long bone and vertebral microanatomy and osteohistology of ’Platecarpus’ ptychodon (Reptilia, Mosasauridae) – implications for marine adaptations. (15 hp)
403. Kall, Christoffer, 2014: Microscopic echinoderm remains from the Darriwilian (Middle Ordovician) of Västergötland, Sweden – faunal composition and applicability as environmental proxies. (15 hp)
404. Preis Bergdahl, Daniel, 2014: Geoenergi för växthusjordbruk – Möjlig anläggning av värme och kyla i Västskåne. (15 hp)
405. Jakobsson, Mikael, 2014: Geophysical characterization and petrographic analysis of cap and reservoir rocks within the Lund Sandstone in Kyrkheddinge. (15 hp)
406. Björnfors, Oliver, 2014: A comparison of size fractions in faunal assemblages of deep-water benthic foraminifera—A case study from the coast of SW-Africa.. (15 hp)
407. Rådman, Johan, 2014: U-Pb baddeleyite geochronology and geochemistry of the White Mfolozi Dyke Swarm: unravelling the complexities of 2.70-2.66 Ga dyke swarms on the eastern Kaapvaal Craton, South Africa. (45 hp)
408. Andersson, Monica, 2014: Drumliner vid moderna glaciärer — hur vanliga är de? (15 hp)
409. Olsenius, Björn, 2014: Vinderosion, sanddrift och markanvändning på Kristianstadsslätten. (15 hp)
410. Bokhari Friberg, Yasmin, 2014: Oxygen isotopes in corals and their use as proxies for El Niño. (15 hp)
411. Fullerton, Wayne, 2014: REE mineralisation and metasomatic alteration in the Olserum metasediments. (45 hp)
412. Mekhaldi, Florian, 2014: The cosmic-ray

events around AD 775 and AD 993 - Assessing their causes and possible effects on climate. (45 hp)

413. Timms Eliasson, Isabelle, 2014: Is it possible to reconstruct local presence of pine on bogs during the Holocene based on pollen data? A study based on surface and stratigraphical samples from three bogs in southern Sweden. (45 hp)
414. Hjulström, Joakim, 2014: Bortforsling av kaxblandat vatten från borrningar via dagvattenledningar: Riskanalys, karaktärisering av kaxvatten och reningsmetoder. (45 hp)
415. Fredrich, Birgit, 2014: Metadolerites as quantitative P-T markers for Sveconorwegian metamorphism, SW Sweden. (45 hp)
416. Alebouyeh Semami, Farnaz, 2014: U-Pb geochronology of the Tsineng dyke swarm and paleomagnetism of the Hartley Basalt, South Africa – evidence for two separate magmatic events at 1.93-1.92 and 1.88-1.84 Ga in the Kalahari craton. (45 hp)
417. Reiche, Sophie, 2014: Ascertaining the lithological boundaries of the Yoldia Sea of the Baltic Sea – a geochemical approach. (45 hp)
418. Mroczek, Robert, 2014: Microscopic shock-metamorphic features in crystalline bedrock: A comparison between shocked and unshocked granite from the Siljan impact structure. (15 hp)
419. Balija, Fisnik, 2014: Radon ett samhällsproblem - En litteraturstudie om geologiskt sammanhang, hälsoeffekter och möjliga lösningar. (15 hp)
420. Andersson, Sandra, 2014: Undersökning av kalciumkarbonatförekomsten i infiltrationsområdet i Sydvattens vattenverk, Vombverket. (15 hp)
421. Martin, Ellinor, 2014: Chrome spinel grains from the Komstad Limestone Formation, Killeröd, southern Sweden: A high-resolution study of an increased meteorite flux in the Middle Ordovician. (45 hp)
422. Gabrielsson, Johan, 2014: A study over Mg/Ca in benthic foraminifera sampled across a large salinity gradient. (45 hp)
423. Ingvaldson, Ola, 2015: Ansvarsutredningar av tre potentiellt förorenade fastigheter i Helsingborgs stad. (15 hp)
424. Robygd, Joakim, 2015: Geochemical and palaeomagnetic characteristics of a Swedish Holocene sediment sequence from Lake Storsjön, Jämtland. (45 hp)
425. Larsson, Måns, 2015: Geofysiska undersökningsmetoder för geoenergisystem. (15 hp)
426. Hertzman, Hanna, 2015: Pharmaceuticals in groundwater - a literature review. (15 hp)
427. Thulin Olander, Henric, 2015: A contribution to the knowledge of Fårö's hydrogeology. (45 hp)
428. Peterffy, Olof, 2015: Sedimentology and carbon isotope stratigraphy of Lower–Middle Ordovician successions of Slemmestad (Oslo-Asker, Norway) and Brunflo (Jämtland, Sweden). (45 hp)
429. Sjunnesson, Alexandra, 2015: Spårämnesförsök med nitrat för bedömning av spridning och uppehållstid vid återinfiltrationav grundvatten. (15 hp)
430. Henao, Victor, 2015: A palaeoenvironmental study of a peat sequence from Iles Kerguelen (49° S, Indian Ocean) for the Last Deglaciation based on pollen analysis. (45 hp)
431. Landgren, Susanne, 2015: Using calcein-filled osmotic pumps to study the calcification response of benthic foraminifera to induced hypoxia under *in situ* conditions: An experimental approach. (45 hp)
432. von Knorring, Robert, 2015: Undersökning av karstvittring inom Kristianstadsslättens NV randområde och bedömning av dess betydelse för grundvattnets sårbarhet. (30 hp)

LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund