



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R110:1978

**Lokalmeteorologiska
förhållanden i
Västra Ängby, Knivsta**

Förstudie

Roger Taesler

TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FÖR VÄG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

Byggforskningen

R110:1978

LOKALMETEOROLOGISKA FÖRHÅLLANDEN I VÄSTRA ÄNGBY, KNIVSTA
Förstudie

Roger Taesler

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 771152-4
från Statens råd för byggnadsforskning till Meteorologiska
institutionen, Uppsala Universitet.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Nyckelord:
meteorologi
klimat
väder
lokalklimat
mätningar
samhällsplanering
energi

UDK 551.584
620.9:711.1

R110:1978

ISBN 91-540-2950-3
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1978 860635

INNEHÅLL

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| BETECKNINGAR | 5 |
| 1. INLEDNING | 7 |
| 2. OMRÅDESBESKRIVNING | 9 |
| 3. MÄTMETODIK OCH MÄTUTRUSTNING | 9 |
| 4. BEARBETNINGAR OCH RESULTAT | 11 |
| 4.1 Översikt över väderförhållanden under mätperioden | 11 |
| 4.2 Jämförelse av vind- och temperaturförhållanden vid Arlanda och i Västra Ångby | 12 |
| 4.3 Lokala vindförhållanden | 16 |
| 4.3.1 Vinden på standardnivån 10 m över mark | 17 |
| 4.3.2 Vinden i fotgängarnivå 2 m över mark | 19 |
| 4.3.3 Lokala snöförhållanden i området | 21 |
| 4.4 Energiutbytet i markytan | 22 |
| 4.4.1 Lokala variationer i strålningsförhållandena | 23 |
| 4.4.2 Värmeflödet i mark | 28 |
| 4.4.3 Uppskattningar av det turbulenta värmeutbytet | 29 |
| 4.5 Lokala temperaturförhållanden | 31 |
| 5. SLUTSATSER | 33 |
| 5.1 Rådande lokalklimat i försöksområdet | 33 |
| 5.2 Möjligheter till planmässig förändring av lokalklimatet | 34 |
| 5.3 Slutsatser beträffande försöksmetodik och mätsystem | 36 |
| BILAGA: Figur 1-31 | 39- 65 |

BETECKNINGAR

| | | |
|----------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| u | vindhastighet | (m s ⁻¹) |
| T | lufttemperatur | (°C, °K) |
| T _S | yttemperatur | (°C) |
| θ | potentiell temperatur | (°K) |
| g | gravitationskonstanten | (9.81 m s ⁻²) |
| G | globalstrålning | (W m ⁻²) |
| Q* | nettostrålning | (W m ⁻²) |
| Q _G | värmefflöde i mark | (W m ⁻²) |
| Q _H | turbulent värmefflöde | (W m ⁻²) |
| Q _E | turbulent flöde av latent värme (avdunstningsvärme) | (W m ⁻²) |
| u* | friktionshastighet | (m s ⁻¹) |
| k | von Karmans konstant | (dim.lös) |
| K | värmelättningsförmåga | (W m ⁻¹ K ⁻¹) |
| α | reflexionsfaktor (albedo) för kortvågig solstrålning | (dim.lös) |
| L | långvågig strålning | (W m ⁻²) |
| ε | emissionsfaktor för långvågsstrålning | (dim.lös) |
| σ | Stefan-Boltzmanns konstant | (W m ⁻² K ⁻⁴) |
| L↓ | nedåriktad långvågsstrålning från atmosfären | (W m ⁻²) |
| L↑ | uppåriktad långvågsstrålning från marken | (W m ⁻²) |
| c | specifikt värme | (Ws kg ⁻¹ K ⁻¹) |
| ρ | densitet | (kg m ⁻³) |
| z | vertikalkoordinat | |
| t | tid | |

1. INLEDNING

Arbetet har utförts som en förberedelse för ett större projekt i anslutning till ett av Uppsala Kommun planerat försök med ekonomisk, energisnål och ekologisk samhällsplanering i Västra Ångby. De bakomliggande problemställningarna kan i korthet beskrivas enligt följande.

Lokala faktorer såsom terräng, vegetation och markbeskaffenhet samt även bebyggelse påverkar luftens strömning i marknära skikt och energiutbytet mellan atmosfären och underlaget. Som ett resultat härav uppträder lokala variationer i fråga om lufttemperatur, luftfuktighet, vindriktning och vindhastighet, vilka i vissa fall kan vara betydande. Av grundläggande betydelse för förhållandena i marknära luftskikt är de turbulenta vertikala transporterna av värme och vattenånga samt rörelsemängd (impuls) liksom strålningsutbytet mellan atmosfären och underlaget. De turbulenta transporterna är i sin tur starkt kopplade till de vertikala profilerna av vindhastighet och lufttemperatur.

I en fullt utvecklad turbulent strömning över ett horisontellt homogent underlag är de turbulenta flödena samt vind- och temperaturprofilerna anpassade till varandra, så att ett jämviktstillstånd utvecklats. Där strömningen passerar från ett underlag till ett annat sker en successiv anpassning av flöden och profiler till det nya underlaget – ett nytt gränsskikt byggs upp. Den sträcka som åtgår för att det nya gränsskiktet skall nå ett visst djup är beroende framför allt av strömningens termiska struktur, dvs. av den vertikala temperaturprofilen. Vid s k neutral och instabil temperaturskiktning (temperaturavtagande med höjden $1^{\circ}\text{C}/100$ m eller mer) sker en effektiv vertikal omblandning av luft mellan olika nivåer, varigenom det nya gränsskiktet tillväxer tämligen snabbt (approximativt i proportionen $1/10$). Vid s k stabil skiktning, då temperaturen avtar långsammare med höjden eller t o m ökar med höjden (inversion), blir den vertikala omblandningen väsentligt försvagad och tillväxten av det nya gränsskiktet sker betydligt långsammare.

I en naturlig omgivning med starkt varierande ytbeskaffenhet över korta avstånd är det i praktiken mycket svårt att genom direkta mätningar kartlägga tillväxten av och egenskaperna hos alla olika förekommande gränsskikt. För en lokalmeteorologisk studie av ett visst område är det därför väsentligt att välja en metodik för mätningar och efterföljande bearbetning, varigenom de för området mest karakteristiska förhållandena kan redodas. Detta innebär bl a att man redan vid planeringen av studien bör göra en preliminär bedömning av, vilka lokala effekter som kan förväntas bli speciellt väl utvecklade. Val och placering av instrument samt program för mätningarnas genomförande får sedan väljas så, att en verifiering och kvantifiering av den preliminära bedömningen kan uppnås.

Beträffande försöksområdet i Ängby ger en sådan preliminär bedömning vid handen att de mest betydelsefulla lokala effekterna torde vara följande.

Läeffekter från skogsvegetationen vid olika vindriktningar och stabilitetsförhållanden.

Skogens inverkan på strålningsutbytet nära marken.

Skogens och topografins inverkan på temperaturens horisontella och vertikala variation i marknära skikt.

Skogens och topografins inverkan på snötäckets djup.

Den direkta målsättningen för projektet har varit dels att utveckla och prova den metodik för mätningar, datainsamling och analys som planerats för det större projektet, dels att söka fastställa storleksordningen av olika lokala klimateffekter som kan uppträda inom det aktuella försöksområdet. Resultaten är även avsedda som underlag för detaljplaneringen av bebyggelsen och vegetationen inom området samt för att förutsäga de förväntade lokala klimatförhållandena inom den färdiga bebyggelsen.

Förstudien har måst utföras under tämligen stor tidspress och, vad beträffar fältarbetet, under besvärliga yttre förhållanden. Trots detta kunde mätprogrammet genomföras i huvudsak som planerat. Anslag beviljades i början av januari 1978. Redan under december hade dock vissa förberedelser kunnat göras. Under januari anskaffades och tillverkades erforderlig, kompletterande mätutrustning samt påbörjades utplacering av master etc. samt framdragning av 250 m provisorisk elkabel. Under februari och början av mars slutfördes montering av mätutrustning samt övriga förberedelser, inklusive funktionstester och kalibreringar. Mätningarna pågick med vissa avbrott från den 13.3 till den 9.4, varefter all utrustning monterades ned.

Projektet har genomförts vid meteorologiska institutionen, Uppsala universitet. Konstruktionen av mätelektronik har utförts av ing. Edgar Knudsen. Tillverkning av givare, bäranordningar m.m., har gjorts vid institutionens verkstad av instrumentmakare Knut Lundin. Programmering för utvärdering av primärdata har utförts av F.K. Conny Larsson. Allt fältarbete, genomförande av mätningarna samt bearbetning och analys av mätresultaten har utförts av mig.

Viss utrustning, omfattande datasamlingssystem, teleskopmaster samt temperatur- och värmeflödesgivare, har lånats från det pågående stadsmeteorologiska projektet vid institutionen.

Uppsala Kommun har tillhandahållit arbetsbod och elkabel för mätningarna liksom kartor och övrigt grundmaterial rörande Ängby-området. Under 1977/78 har jag deltagit i kommunens arbetsgrupp för planeringen av det kommunala projektet. Härvid har jag bl a under hand tagit fram underlag för VVS-konsultens (AB H. Theorell) beräkningar av husens värmebalans samt åt arkitekterna Reinius och Sporrang utarbetat en preliminär bedömning av vissa lokala klimatförhållanden.

2. OMRÅDESBESKRIVNING

Försöksområdet i Västra Ångby har de ungefärliga dimensionerna 100 x 150 m och är beläget ca 25 km söder om Uppsala och ca 1 km väster om Knivsta samhälle. Platsen för den planerade experimentbebyggelsen ligger i den nordvästra delen av ett större område för nybyggnation, där markarbeten redan hade påbörjats vid årsskiftet 1977/78. Själva försöksområdet var dock ännu helt orört.

Terrängen i området är något kuperad med höjdskillnader på ca 10 m. Väster och norr om försöksområdet sluttar marken tämligen brant ($\sim 1/10$) mot stora öppna fält, vilka ligger ett 10-tal meter lägre än försöksområdet. Från norr mot sydost finns något kuperad, övervägande skogbevuxen terräng av samma typ som inom försöksområdet. I sektorn mellan sydost och väst är terrängen mera öppen och flack med en svag lutning mot söder och väster. På ett avstånd av 75-100 m från försöksområdets södra gräns finns ett mindre bestånd av gles och lågvuxen blandskog. Mellan detta och försöksområdet ligger en mindre åker med ca 200 m utsträckning i ost-västlig riktning. Åkern faller svagt mot väster.

Själva försöksområdet framgår av figur 1. Dess centrala del utgörs av en öppen svacka mellan två små, skogbevuxna bergshöjder. Det öppna partiet i svackan - "ängen" - har en längd av ca 100 m och en bredd varierande mellan 20 och 50 m. Ängen är omgiven av skog i alla riktningar utom mot sydost, där den står i förbindelse med åkern och den öppna terrängen längre bort.

Skogen på de båda små bergshöjderna är medeltät och består övervägande av barrträd med enstaka, insprängda lövträd. Längs skogskanten, speciellt mot åkern, finns tät buskvegetation. I sluttningen mot väster, från mätpunkt 4 och vidare mot norr, är skogen betydligt glesare än på bergshöjderna i övrigt.

Markvegetationen på åkern utgjordes av stubb, som fram till månadsskiftet mars-april var helt eller delvis snötäckt. På ängen fanns högt fjolårsgräs. Även detta täcktes av snö, som här låg kvar längre än på åkern. I den västra kanten av ängen och i sluttningen ovanför fanns ett i stort sett sammanhängande snötäcke under hela mätperioden. Här uppmättes också de största snödjupen under perioden.

3. MÄTMETODIK OCH MÄTUTRUSTNING

Mätprogrammet utformades så, att temperatur-, vindhastighets- och strålningsdifferenser, vilka orsakas av lokala faktorer, skulle kunna fastläggas. Vidare omfattade programmet mätningar för bestämning av meteorologiska basparametrar, vilka behövs för typklassificering av materialet och analys i atmosfärsfysikaliska termer. Syftet var även att utföra kontinuerliga mätningar under en tid av ca 1 månad, vilket bedömdes tillräckligt för att erhålla ett representativt datamaterial täckande olika meteorologiska situationer. På grund av upprepade avbrott i den

provisoriska strömförsörjningen, orsakade av pågående markarbeten i närheten, uppstod ett visst bortfall. Sammanlagt erhöles registreringar under 417 timmar fördelade över 23 dygn. Under en kortare period uppträdde tekniska fel på en vindhastighetsgivare och en temperaturgivare vid mätpunkt 2, varigenom ett visst ytterligare bortfall av data uppstod. Dessa bortfall har emellertid inte i någon högre grad reducerat möjligheterna att analysera materialet. Primärmaterialet täcker ändå praktiskt taget alla meteorologiska situationer, som kan uppträda under den aktuella årstiden.

Mätpunkternas läge (se figur 1) har följande karakteristika:

Punkt 1. Läge på åkern ca 50 m söder om skogsbrynet, öppet för vindar från väster och öster. Speciellt vid västliga vindar är läget exponerat då fri vindväg finns över de lägre liggande, öppna fälten väster om försöksområdet. I öster finns skog på ca 200 m avstånd. Söder om punkten på 25-50 m avstånd finns ett mindre bestånd av gles, lågvuxen blandskog.

Punkt 2. Läge i västra delen av ängen, ca 10 m från skogsbrynet. Vid nordliga vindar finns 40-50 m fri vindväg och vid sydostliga vindar är vindvägen fri, bortsett från några enstaka, mindre buskar, över en sträcka av 200-300 m. Vid övriga riktningar och speciellt mellan söder och nordväst är läget mycket skyddat.

Punkt 3. Läge på övre delen av bergshöjden väster om ängen, i medeltät tall- och granskog.

Punkt 4. Läge i sluttningen mot väster, ca 30 m från åkern i mycket gles blandskog.

Instrumenteringen i respektive mätpunkt var följande:

Punkt 1. Temperaturgivare och vindhastighetsgivare på 2 m och 10 m över mark. Globalstrålning och nettostrålning på 2 m.ö.m., placerade ca 10 m norr om punkten. Värmeflödesgivare ca 1 cm under markytan.

Punkt 2. Temperatur och vindhastighet på 2 m och 10 m.ö.m.
Vindriktning 10 m.ö.m.
Värmeflödesgivare ca 1 cm under markytan.

Punkt 3. Temperatur 2 m.ö.m.
Nettostrålning 2 m.ö.m.

Punkt 4. Temperatur 2 m.ö.m.

I punkt 1 och 2 användes lätta teleskopmaster för montering av givare. Från samtliga givare drogs kabel till en arbetsbod innehållande datasamlingsutrustningen, placerad vid korset i figur 1 50 m norr om punkt 1.

Instrumentutrustningen med tillhörande mätelektronik är till största delen utvecklad vid meteorologiska institutionen. Samma typ av utrustning har använts i ett flertal projekt vid institutionen, bl a i det pågående stadsprojektet, och har visat sig väl lämpad för kontinuerliga fältmätningar. Temperaturmätningen har en noggrannhet av $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ för absolutvärdet och $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ för differensen mellan två punkter. Upplösningen i mätvärdena är 0.01°C . Givarna är 500 Ω Pt-motstånd (Degussa)

med en tidskonstant av ca 30 s. De är monterade i dubbla strålningsskydd vilka ventileras med en eldriven fläkt. Vindhastighetsgivarna är lätta skålkorsanemometrar med starthastighet 0.2 m/s och distanskonstant på ca 2.5 m. Mätnoggrannheten är ca $\pm 1\%$ för vindhastigheter > 4 m/s och ca ± 0.05 m/s för lägre hastigheter. Mätvärdet har en upplösning av 0.01 m/s. Givarna är individuellt kalibrerade över ett hastighetsområde av 0.5-28 m/s i låghastighetstunneln vid KTH/Flygteknik.

Vindriktning mätes med potentiometer kopplad till en vindfana. Noggrannheten i mätvärdet är ca $\pm 3^\circ$ och upplösningen $\pm 1^\circ$.

Nettostrålningsgivarna är av fabrikat Siemen Ersking. Givarna är individuellt kalibrerade av tillverkaren. Mätnoggrannheten är ca $\pm 5\%$ och upplösningen ± 1 W/m².

Globalstrålning (kortvågig instrålning från sol och himmel mot horisontell yta) mätes med en Moll-Gorczyński-givare av standardtyp. Mätnoggrannheten är ca 5% och upplösningen ± 1 W/m².

Värmeflöde i mark mätes med CSIRO-givare. Givarna har ej kunnat kalibreras individuellt utan den av fabrikanter givna, standardkalibreringsfaktorn har använts. Mätnoggrannheten bedöms vara ca $\pm 10\%$. Mätvärdet har en upplösning på ± 1 W/m². Samtliga givare är försedda med 100 m långa mätkablar, vilka inkopplades till en enhet för mätelektronik placerad i arbetsboden.

Elektronikenheten ger mätvärden för varje kanal i form av en analog spänning, vilken digitaliseras och registreras med ett mikrodator-baserad 32-kanals datasamlingssystem försett med Facit hålremsstans.

Datasamlingssystemet är tillverkat av AB Altema och ursprungligen anskaffat för användning i stadsprojektet. Systemets mikrodator innehåller fasta program för beräkning av medelvärde samt max- och min.värde på samtliga mätkanaler. Samplingshastigheten är ca 1 kanal per sekund och tidsintervallet mellan utstansning av data variabelt mellan 20 s och 60 min. Som standard vid Ångby-mätningarna har använts 10 min.- eller 30 min.-intervall. Eftersom endast 17 av de 32 kanalerna användes, har varje kanal avsökts ca 3,5 ggr/minut och antalet "momentanvärden", som ingått i medelvärdesberäkningen, varit 35 respektive 105 st.

Hålremsorna har sedan körts i dator vid UDAC för beräkning av timmedelvärden av respektive fysikalisk storhet (lufttemperatur etc.).

4. BEARBETNINGAR OCH RESULTAT

4.1 Översikt över väderförhållandena under mätperioden

Mars månad inleddes med mycket mildt och nederbördsrikt väder. Under veckan före mätningarnas början den 13:e passerade en serie lågtryck med tillhörande fronter och nederbördsområden över

södra och mellersta Sverige. Den 1.3 rådde barmark och den 13:e förekom endast enstaka snöfläckar i försöksområdet.

Den 14:e skedde ett omslag i vädret genom att mycket kall luft strömmade ned med kraftiga nordliga vindar bakom ett djupt lågtryck. Den allmänna temperaturnivån sjönk i samband härmed med ca 10°. Under perioden 14:e-24:e mars bestod det kalla vädret och temperaturen sjönk successivt. I början av den kalla perioden fortsatte ännu lågtrycksvandringen över Götaland, varigenom vädret i östra Svealand blev molnigt och blåsigt med rikliga snöfall. Ett snötäcke bildades härvid och snödjupet ökade snabbt till ca 20 cm. På grund av att snön föll ned i samband med friska eller hårda vindar blev snödjupsfördelningen mycket ojämn, vilket även återspeglas i den snötaxering, som gjordes inom Ängby-området den 19:e (se vidare nedan).

Den 18:e började ett högtryck utbildas över Skandinavien. Under de första dagarna förekom ännu en hel del snöbyar i östra Svealand men f.o.m. den 20:e t.o.m. den 23:e rådde övervägande klart väder. Vinden var tämligen hård ännu den 21:a med hastigheter upp till 10 m/s mitt på dagen men avtog kraftigt mellan den 21:a och 22:a. Härvid sjönk temperaturen avsevärt och nätterna 21:a-22:a och 22:a-23:e blev mycket kalla med minimitemperaturer ned till -22°C i Ängby.

Den 23:e inleddes en övergång till mildare väder med stor molnighet och lätt nederbörd i östra Svealand. Mildvädret bestod månaden ut, varvid snötäcket successivt smälte bort så att barmark åter rådde allmänt vid månadens slut.

Den 1.4 trängde åter kallare luft norrifrån in över Svealand. Ett högtryck utbreddes sig över Skandinavien under månadens första dagar, vilket medförde soligt väder med svaga vindar i östra Svealand fram till den 6.4. Nätterna blev kyliga med minimitemperaturer ned till -5°C i Ängby medan temperaturen under dagen steg till +3 - +4°C.

Den 6.4 inleddes en ny period med milt och övervägande molnigt väder, som bestod t.o.m. den 13:e. Både dag- och nattetemperaturerna blev nu betydligt högre med maximitemperaturer i Ängby upp till +11°C den 9.4.

Sammanfattningsvis kan konstateras att det under perioden 13.3-9.4 förekom såväl renodlade vinterförhållanden som vårväder, varvid såväl temperatur-, vind- och molnighetsförhållanden som markytans tillstånd uppvisade stora variationer. Med undantag för renodlade sommarförhållanden uppvisar mätperioden i stort sett alla typer av meteorologiska situationer, som normalt förekommer i Mälardalen under året.

4.2 Jämförelse av vind- och temperaturförhållanden vid Arlanda och i Västra Ängby

I normala fall, dvs. då lokalklimatet inom ett visst område ej studerats särskilt, är man för erhållande av klimatdata hänvisad till de ordinarie meteorologiska observationsstationerna.

För att belysa, hur representativ en sådan station kan vara för förhållandena lokalt inom en landskapstyp, som är tämligen vanlig i stora delar av landet, har en enkel jämförelse gjorts av vind- och temperaturförhållandena i Västra Ångby och vid Arlanda flygplats.

Vid Arlanda, som ligger 12 km från Knivsta, utföres fullständiga synoptiska observationer varje hel timme dygnet runt. Stationen ligger öppet i ett flackt landskap och har, speciellt i fråga om vindförhållandena, en god representativitet. Termometerburen vid stationen står dock i närheten av byggnader inom flygplatsområdet, där även många hårdgjorda och asfalterade ytor förekommer.

I figur 2 visas samtidigt uppmätta lufttemperaturer dels vid Arlanda dels i Ångby, punkt 1, på 2 m höjd över marken. Värdena omfattar hela försöksperioden. Av figuren framgår att temperaturen i Ångby för det allra mesta varit praktiskt taget densamma som vid Arlanda. Med undantag för temperaturer under ca -10°C visar punkterna en tendens att gruppera sig under linjen 1:1, vilket skulle innebära en systematiskt något lägre temperatur vid Arlanda än i Ångby. Skillnaden, som i medeltal uppgår till ca 0.5°C , kan delvis förklaras av att Arlanda ligger 20 m högre än punkt 1 i Ångby. Med hänsyn till det normala temperaturavtagandet med höjden skulle höjdskillnaden innebära en systematiskt temperaturskillnad av $0.1-0.2^{\circ}\text{C}$. Den resterande skillnaden är med hänsyn till mätnoggrannheten, främst i de ordinarie observationerna, knappast signifikant.

Vid låga temperaturer ($< -10^{\circ}\text{C}$) samt vid enstaka tillfällen med högre temperatur uppträder betydligt större differenser, varvid Arlanda visar ett tydligt temperaturöverskott jämfört med Ångby. Dessa värden hänför sig till situationer med utpräglat stabil skiktning med markinversioner i Ångby. Ett exempel på ett sådant tillfälle visas i figur 3. I situationer som denna, då temperaturen över öppen, obebyggd mark ökar med höjden (inversion) blir det nedåtriktade impulsflödet mycket svagt varigenom vindhastigheten nära marken successivt avtar tills luften stagnerar så gott som helt. På något högre höjd - några 10-tal meter över marken bevarar strömningen ofta sin hastighet och den kan t.o.m. öka genom att förlusten av impuls nedåt reduceras. Genom att strömningen i lägsta skikt stagnerar reduceras även det turbulenta värmefflödet, som vid stabil skiktning är nedåtriktat, kraftigt. Värmebalansen hos luften närmast marken kommer då i allt större utsträckning att bestämmas av strålningsflödena mellan marken och atmosfären. Detta leder vanligtvis till en fortsatt avkylning och ytterligare stabilisering av skiktningen. I sådana situationer uppnås extremt låga temperaturer och kallluftsansamlingar bildas lätt i lågt liggande, öppen terräng. I sådana situationer är även risken för höga koncentrationer av luftföroreningar i marknära nivå stor.

Exemplet i figur 3 ger en viss ytterligare belysning åt de grundläggande utbytesprocesserna och även åt de lokalt betingade effekterna.

Figuren avser tiden 12.00 den 19.3 - 04 den 20.3 och visar vindhastighet och lufttemperatur från Arlanda och Ångby, punkt 1,

samt molnighet och vindriktning enligt Arlandas observationer. Dessutom visas markytans energibalans och strömningens stabilitetstyp i skiktet 2-10 m enligt mätningarna i Ångby, punkt 1.

För stabilitetsklassificeringen har använts det s.k. Richardsonssons tal, Ri , definierat enligt

$$Ri = \frac{g}{\theta} \cdot \frac{\partial\theta/\partial z}{(\partial\bar{u}/\partial z)^2} \quad (1)$$

Här är g = tyngdacceleration

θ = potentiell temperatur (1h-medelvärde)

\bar{u} = vindhastighet (1h-medelvärde)

z = höjden över marken.

Klassgränserna för Ri är följande

- $0.10 < Ri$ mycket instabilt
- $0.10 < Ri < - 0.03$ instabilt
- $0.03 < Ri < + 0.03$ nära neutralt
- + $0.03 < Ri < + 0.25$ stabilt
- + $0.25 < Ri$ mycket stabilt

Avkylningsförloppen den 19-20.3 är i sina huvuddrag typiskt för s.k. strålningsdygn med klar himmel och relativt svag vind.

Nettostrålningen, som utgör skillnaden mellan infallande strålning (integrerat över alla våglängder) och utgående, reflekterad och emitterad strålning från markytan, visar en svag energiinkomst för ytan fram till c:a 15.30. Solstrålningen var relativt intensiv (globalstrålning $\approx 480 \text{ W/m}^2$ kl 12) men reflekterades så gott som helt i snöytan. Snödjupet på åkern vid punkt 1 var c:a 20 cm den 19-20:e och snötäcket bestod av nyfallen torr snö med mycket liten värmeledningsförmåga. Värme-flödet i markytan, under snötäcket, påverkas ej av nettostrålningstillskottet. Energiinkomsten vid snöytan kan ha medfört en svag uppvärmning av och även avdunstning från själva ytan. Skiktningen omkring middagstid var nära neutral, vilket innebär att det vertikala turbulenta värme-flödet var ≈ 0 . Under dessa förhållanden förblir luftens värmeinhåll konstant, vilket återspeglas i den nära konstanta temperaturen mellan kl 12-15. Efter kl 15.30 visar nettostrålningen en tilltagande energiförlust för ytan, som återspeglas i ett snabbt temperaturfall i luften på 2 m-nivån och stabilisering av skiktningen. Över åkern vid punkt 1 har redan omkring kl 16 en markinversion utbildats, vilken därefter förstärks, så att temperaturen på 10 m höjd är c:a 1.5° högre än på 2 m kl 20.

Stabiliseringen, som börjar redan omkring kl 14, medför även en reduktion av impulsflödet och därmed en successiv minskande vindhastighet under eftermiddagen och kvällen. En tendens till högre hastighet på Arlanda framträder vid hastigheter över ca

2 m/s. Detta behandlas vidare längre fram.

Efter c:a kl 17 börjar markytan förlora energi genom värmeledning till snötäcket ($Q_G < 0$). Detta kan förklaras som ett resultat av den successivt ökade strålningsförlusten i snöytan, vilket så småningom leder till en temperatursänkning i hela snötäcket. Den allt större strålningsförlusten ($Q^* < 0$) återspeglar minskningen av instrålningen från sol och himmel. Efter solnedgången når Q^* snart ett minimum. Därefter bestäms Q^* enbart av de långvägiga strålningsflödena från snöytan och från atmosfären. Genom att snöytans temperatur sjunker minskar dess emission snabbt. Den atmosfäriska motstrålningen ändras däremot betydligt långsammare. Detta förklarar att Q^* blir mindre negativ efter kl 20.

Efter midnatt är $Q_G \approx Q^*$, vilket innebär att snötäcket som helhet ej längre förlorar energi genom utstrålning. Samtidigt blir även luftens temperaturavtagande långsammare.

Mellan kl 17-24 råder klart väder (molnmängd $< 1/8$). Efter midnatt uppträder en del dimmoln, som orsakar en ökning av den atmosfäriska motstrålningen. Samtidigt inträffar en svag vindökning. (Denna framträder dock ej i Arlandas observationer, sannolikt beroende på att vindhastighetsgivarens starthastighet är för hög). Vindökningen kan ha medfört en viss turbulent ombländning inom inversionsskiktet vilket, i förening med molnhetsökningen, kan förklara den temperaturökning, som sker både på Arlanda och i Ängby omkring kl 02.

De högre temperaturerna vid Arlanda kan, mot bakgrund av ovanstående, förklaras av förekomsten av bebyggelse och hårdgjorda ytor. Såväl byggnaderna som trafiken inom flygplatsområdet ger ett antropogent värmetilskott till luften. Vidare kommer, på grund av asfalt och betongytornas samt byggnadernas större värmekapacitet, den under dagen instrålade solenergin att lagras effektivare i underlag än vad som är fallet i naturmark såsom i Ängby. Detta är speciellt fallet vid snötäckt naturmark i jämförelse med bebyggda områden där snöröjning sker. Både på grund av snöns stora reflexionsförmåga (upp till 95%) för solstrålning och mycket låga värmeledningsförmåga blir värmelagringen i underlaget mycket liten. Efter solnedgången eller redan några timmar dessförinnan kan därför en snabb avkylning av luften äga rum över obebyggd mark. Inom bebyggelsen motverkas avkylningen av värmeavgivning från gator och husväggar, vilket resulterar i en s.k. "värmeö" inom bebyggelsen. En ytterligare bidragande orsak härtill kan vara att strömningen i en stabilt skiktad luftmassa, som det här är fråga om, får en större turbulensgrad över bebyggelse än över öppen mark. Härigenom bevaras ett nedåtriktat, turbulent värmefflöde som också bidrar till en långsammare avkylning av luften inom bebyggelsen.

Av figur 2 och 3 framgår att temperaturöverskottet vid Arlanda kan uppgå till 3-4°C vid temperaturer omkring -20°C. Temperaturskillnaden skulle även kunna vara ett resultat av en lokal kallluftsansamling vid punkt 1 i Ängby. Detta är dock mindre troligt med hänsyn till läget av denna punkt, som bör tillåta ett fritt avflöde av kallluft mot väster.

En jämförelse av vindförhållandena i Ängby, punkt 1, och på Arlanda visar några intressanta lokala effekter. I figur 4 visas samtida vindhastigheter (10 min.-medelvärden) avseende höjden 10 m.ö.m. dels för vindriktningar omkring W (250°-290°) dels för övriga riktningar. Först och främst kan konstateras dels att sambandet mellan hastigheten på Arlanda och i Ängby är svagt och dels att Arlanda uppvisar systematiskt högre hastigheter utom vid västliga vindar. Båda dessa resultat kan förklaras av skillnaden i topografi och vegetation mellan de båda platserna. Vindmätaren på Arlanda har ett öppet läge för alla vindriktningar medan punkt 1 i Ängby är relativt skyddad av skog och topografi vid de flesta vindriktningar. Läeffekten varierar dock avsevärt bl.a. med vindriktningen, såsom närmare behandlas i avsnitt

Vid västliga vindriktningar sker en tydlig förstärkning av hastigheten i punkt 1. Förklaringen måste vara att då vinden är riktad från de lågt liggande, öppna fälten väster om försöksområdet sker en förträngning av strömningen över den högre terrängen i området. Av kontinuitetsskäl måste detta medföra en acceleration av luftrörelsen. Effekten kan dessutom ha förstärkts genom kanalisering över åkern vid punkt 1, eftersom denna erbjuder betydligt mindre friktionsmotstånd än den skogsklädda höjden norr därom, och skogspartiet söder om åkern.

Ur figur 4 framgår att vid hastigheter på Arlanda över c:a 3 m/s avtar förstärkningen i punkt 1 vid västvindar, även om antalet fall med sådana riktningar är litet. Vid de kraftigare västvindarna rådde neutral eller svagt instabil skiktning medan övriga fall ($V_A < 3$ m/s) med västvind huvudsakligen inträffade vid stabil skiktning. Denna skillnad i stabilitet skulle kunna förklara tendensen till avtagande hastighetsökning eftersom djupe- t av det skikt, som påverkas av hindret i strömningen, blir större och hastighetsökningen på en viss nivå mindre under neutrala instabila förhållanden än vid stabila.

Ovanstående jämförelse mellan mätningar från Arlanda och den öppet belägna mätpunkten (punkt 1) i Ängby kan sammanfattas enligt följande.

I fråga om temperaturobservationerna är Arlandas värden väl representativa även för Ängby med undantag för inversionssituationer då Arlanda visar systematiskt högre temperatur. Denna är troligen en effekt av bebyggelsen och aktiviteterna vid flygplatsen. Vindobservationerna för Ängby, där de rent lokala förhållandena har ett starkt inflytande på vindhastigheten. Med undantag för västliga vindar ger Arlandas observationer en avsevärd överskattning av vindhastigheten i Ängby.

4.3

Lokala vindförhållanden

För att bestämma karaktären och storleken av de lokala vind-effekterna behöver mätningarna i en viss punkt relateras till en referensstation med öppet läge och homogen omgivning i alla riktningar. Varken mätplats 1 eller 2 i Ängby kan användas som

referensstation. Platserna har valts för att representera typiska lokala förhållanden ifråga om läbildning eller vindexponering vid olika vindriktningar. Genom att relatera mätningarna i vardera mätpunkter till de samtidigt mätningarna från Arlanda kan emellertid den lokala omgivningens inverkan i respektive punkt klarläggas.

4.3.1 Vinden på standardnivån 10 m.ö.m.

I figur 5 och 6 visas kvoten mellan hastigheten i Ängby och på Arlanda, 10 m.ö.m.

$$F_{10} = \left(\frac{\bar{u}_{\text{Ängby}}}{\bar{u}_{\text{Arlanda}}} \right)_{10} \quad (2)$$

för punkt 1 respektive 2 som funktion av vindriktningen. Endast fall då vindhastigheten på Arlanda varit större än 2 m/s har medtagits eftersom kvoten blir alltför osäkert bestämd vid lägre hastigheter. Den inlagda kurvan i respektive figur visar medelvärdet för varje 10° riktningsintervall.

Både i punkt 1 och 2 är läverkan från omgivningen ($F_{10} < 1$) mycket påtaglig och dessutom starkt varierande med vindriktningen. Variationen kan relateras tämligen entydigt till avståndet mellan respektive mätpunkt och skogsbryn i olika riktningar. Ett visst beroende av topografi samt skogsbältets bredd finns även, såsom framgår ur figur 7. Av speciellt intresse är den markerade förstärkningen av hastigheten ($F_{10} > 1$) i punkt 1 vid vindriktningar i sektorn 225° - 295° . En orsak härtill, som redan diskuterats i avsnitt 4.2, är den förträngning och acceleration av strömningen som sker över högre terräng. Detta är dock troligen ej hela förklaringen. En ytterligare orsak torde vara att vindvägen över den högre terrängen är så kort (ca 50 m) vid västliga riktningar att hastigheten på 10 m nivå ej anpassats till det lokala underlaget. Den horisontella nivån, som ligger 10 m över den lokala markytan i punkt 1, motsvarar höjden ca 20 m över mark relaterat till den lägre terrängen längre uppströms. En kvalitativ uppskattning av effekten av skillnaden i höjd över markytan kan göras under det förenklade antagandet att vindprofilen är logaritmisk, dvs.

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{K} \ln \frac{z}{z_0} \quad (3)$$

Med $z = 10$ m resp. 20 m, $0.01 \text{ m} < z_0 < 0.1 \text{ m}$, erhålles

$$1.10 < \frac{\bar{u}(20)}{\bar{u}(10)} < 1.15.$$

Även om denna uppskattning är grov, kan förstärkningen vid västvindar ($F_{10} \approx 1.35$) enligt figur 5 knappast förklaras enbart som ett resultat av att den lokala höjden över marken ej är representativ.

Vid motsatta riktningar, dvs. omkring 80° - 120° , finns ett se-

kundärt maximum i punkt 1. Som framgår ur figur 1 samt områdesbeskrivningen råder vid dessa riktningar fri vindväg över åkern upp till ett avstånd av ca 200 m. Vid nordliga och sydliga riktningar är avståndet till skog betydligt kortare, vilket förklarar de minima (maximal läverkan i punkt 1) som återfinns för dessa riktningar.

I punkt 2 ("ängen" mellan de två små bergshöjderna) erhålles den största läeffekten vid riktningar, då vinden blåser över endera av bergshöjderna, dvs. vid nordostliga respektive västliga vindar, se figur 6. Vid sydostliga vindar (omkring 140°) finns fri vindväg ut till mer än 200 m avstånd. Vid dessa riktningar är hastighetsreduktionen i punkt 2 ($F \approx 0.85$) jämförbar med reduktionen vid östliga vindar i punkt 1.

Sambanden i figur 7 mellan vindväg och läverkan från skog och topografi har erhållits ur figur 5 och 6. Härvid har avståndet till skog vid olika vindriktningar i punkt 1 resp. 2 avsatts mot F-värdet. För båda punkterna erhålles $F \approx 0.85$ vid fri vindväg > 200 m. Denna hastighetsreduktion kan tolkas som den allmänna effekten av den småkuperade, delvis skogbevuxen terrängen i Västra Ångby. För kortare fri vindväg över horisontell mark är kurvorna för punkt 1 och 2 snarlika inom det vindvägsintervall (20-50 m), som är representerat i båda punkterna. De båda kurvorna bör därför kunna förenas till en generell kurva som ger läverkan på olika avstånd upp till ca 200 m från skog av den typ, som finns i området.

I punkt 2 är skogsbältets bredd relativt liten (< 100 m) för vissa riktningar. Som framgår ur figur 7 blir läeffekten här något mindre än vid bredare skogsbälten på samma avstånd. Skillnaden är dock liten och dessutom något svårbestämd på grund av att gränserna för skogens utsträckning är osäkra.

Vid vindriktningar över bergshöjderna visar båda punkterna en ytterligare förstärkt läverkan. Även här kan man troligen förena de båda kurvorna till en gemensam, som ger den kombinerade läeffekten av höjdparter och skog vid viss, fri vindväg från skogsbryn. Vid kortare avstånd från skog än 20 m torde man här kunna sätta $F_{10} \approx 0.25$.

Den tidigare nämnda förstärkningen av hastigheten då vinden blåser från öppen, lägre mot högre terräng framträder även i figur 7 för punkt 1. Däremot erhålles ingen tydlig förstärkning i punkt 2 vid nordvästlig till nordlig vind, då vinden först passerar över lägre terräng och därefter över skog fram till ett avstånd av 10-50 m före punkten. På så kort avstånd från skogen är tydligen läeffekten från skogen helt dominerande.

Både i figur 5 och 6 visar F-värdena för en viss vindriktning en avsevärd spridning. Detta är fullt naturligt med tanke på att vindhastigheten i en viss punkt uppvisar tidsfluktuationer av mycket varierande frekvens. Man kan alltså inte förutsätta att $F = 1$ ens för samtidiga vindhastighetsobservationer i två punkter med helt identiska lägen.

En ytterligare orsak till spridningen är att Arlandas observa-

tioner anges i hela knop, dvs. med en upplösning av ca 0.5 m/s medan Ängby-mätningarna har en upplösning av 0.01 m/s. Slutligen har ingen uppdelning i olika hastighetsområden eller stabilitetsförhållanden gjorts vid ovan nämnda analyser, vilket även torde bidra till spridningen. Trots dessa inskränkningar ger figurerna 5-7 en entydig, kvantitativ bild av de lokala faktorernas läverkan.

En direkt slutsats av ovanstående är att skogen på bergshöjderna bör bevaras vid exploatering av området. Omfattande avverkning av skogen måste få till följd bl.a. att de högt liggande delarna av området blir utsatta för en lokal förstärkning av vindhastigheten av det slag, som uppträder vid västliga vindar i punkt 1. Effekten torde bli ännu mer markerad – troligen kan vindhastigheten på bergshöjderna bli mer än dubbelt så hög som över plan, öppen mark (Arlanda). Speciellt vid vindar mellan nordväst och nordost är detta ogynnsamt, eftersom dessa riktningar är mest utsatta för hårda och/eller kalla vindar under vinterhalvåret.

En ytterligare illustration till de lokala effekterna på vindhastigheten i området erhålles genom att beräkna kvoten mellan de samtidiga hastigheterna i punkt 1 och 2. Härvid divideras F_{10} -värdena för en viss vindriktning enligt figur 5 och 6, dvs.

$$\frac{F_{10(1)}}{F_{10(2)}} = \left(\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}_{Ar1}} \right)_{10 \text{ m}} : \left(\frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_{Ar1}} \right)_{10 \text{ m}} = \left(\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}_2} \right)_{10 \text{ m}} \quad (4)$$

Resultatet, som visas i figur 8, ger en drastisk bild av den kombinerade effekten av skyddat läge för punkt 2 och öppet läge samt strömning från lägre mot högre terräng i punkt 1 vid västliga vindar. Även vid övriga riktningar, bortsett från riktningar omkring 160° (då punkt 1 skyddas av det smala skogspartiet söder om åkern medan punkt 2 ligger relativt öppet), medför det öppnare läget betydligt högre hastigheter än i punkt 2. Det sekundära maximum, som finns för vindriktningar omkring 60° är det kombinerade resultatet av öppen åker vid punkt 1 och skyddande skog och bergshöjd vid punkt 2.

4.3.2 Vinden i fotgängarnivå 2 m.ö.m.

Vindhastigheten i låg nivå (2 m.ö.m.) bör bero, förutom av lägbildning från omgivande vegetation och terräng, även av strömningens stabilitet. Vid analysen av förhållandet mellan hastigheten på 2 m och 10 m nivå har därför mätningarna grupperats efter olika stabilitetstyp, vilket markerats med olika symboler i figurerna 9-14.

I stället för att bestämma riktningsberoendet så som i figur 5 och 6 har vissa riktningssektorer utvalts för punkt 1 respektive 2 med ledning av de ovan redovisade resultaten. De utvalda riktningssektorerna är sådana, där läeffekten enligt föregående är relativt konstant, dvs. riktningar omkring F_{10} -kurvornas maxima och minima.

Figurerna 9-14 visar sambandet mellan hastigheterna (1h-medelvärden) på 2 m (\bar{u}_2) och 10 m (\bar{u}_{10}) över mark i punkt 1 (fig. 9-12) och punkt 2 (fig. 13-14).

För de olika riktningssektorer respektive delsektorer, som representeras i figur 9-14 har följande regressionslinjer erhållits för \bar{u}_{2m} som funktion av \bar{u}_{10m} (för $\bar{u}_{10} > 3$ m/s):

Punkt 1

| | |
|-----------------|----------------------------------------|
| Sektor 60°-90°: | $\bar{u}_2 = 0.89 \bar{u}_{10} - 0.35$ |
| --- 90°-120°: | $\bar{u}_2 = 0.73 \bar{u}_{10} - 0.10$ |
| --- 150°-165°: | $\bar{u}_2 = 0.79 \bar{u}_{10} - 0.90$ |
| --- 165°-200°: | $\bar{u}_2 = 0.87 \bar{u}_{10} - 0.30$ |
| --- 230°-290°: | $\bar{u}_2 = 0.65 \bar{u}_{10} - 0.40$ |

Punkt 2

| | |
|-------------------|----------------------------------------|
| Sektor 320°-360°: | $\bar{u}_2 = 0.79 \bar{u}_{10} - 0.25$ |
| --- 360°-020°: | $\bar{u}_2 = 0.89 \bar{u}_{10} - 0.20$ |
| --- 110°-150°: | $\bar{u}_2 = 0.65 \bar{u}_{10} - 0.40$ |
| --- 150°-160°: | $\bar{u}_2 = 0.54 \bar{u}_{10} - 0.80$ |

Vid vindriktningar över öppen mark erhålles relativt väldefinierade samband mellan \bar{u}_{10} och \bar{u}_2 (figur 9 och 11). Resultaten visar emellertid att sambandet är olika, beroende på om vinden blåser över nära horisontellt underlag (fig. 9) eller från lägre mot högre terräng (fig. 11).

Spridningen av punkterna för en viss riktningssektor kan till en del förklaras av variationer i vindriktningar inom sektorn. Riktningberoendet är mera tydligt inom sektorer med kort, fri vindväg såsom framgår ur figur 10 och 13. Båda figurerna representerar övervägande neutrala förhållanden, varför skillnaderna i hastighetsprofilen, dvs. i relationen mellan \bar{u}_2 och \bar{u}_{10} , sällrare kan hänföras till underlagets egenskaper i olika riktningar. I båda fallen innebär resultaten att kortare fri vindväg ger lägre \bar{u}_2 -värde för ett visst \bar{u}_{10} -värde - dvs. vid riktningar 150°-165° i punkt 1 och 150°-160° i punkt 2.

Stabilitetsberoendet framträder i figurerna 9-12 främst däri, att de lägsta vindhastigheterna uppträder vid mycket stabil skiktning. En klar uppdelning - såsom man kunde ha förväntat - i neutral skiktning vid de högsta hastigheterna samt stabil eller instabil skiktning vid något lägre hastigheter återfinns endast i figur 11. Anmärkningsvärt är att stabil skiktning förekommer även vid relativt höga vindhastigheter ($\bar{u}_{10} > 5$ m/s), se figur 9 och 12. Överhuvudtaget överväger fall med stabil skiktning utom vid vindriktningar mellan 90° och 200°, då i stället de neutrala

fallen dominerar. Instabila fall förekommer endast sporadiskt i materialet. Dessa förhållanden torde bero på att mätningarna utförts under en del av året då övervägande snötäckt mark förekom, varigenom avkylning och stabilisering av luften i marknära nivå lätt sker. De neutrala fallen i figur 13 har framför allt varit knutna till vandrande cykloner, då vindriktningar mellan ost och syd rått i samband med mulet väder och nederbörd före och under varmfrontspassager.

Stabilitetsförhållandena under mätperioden och därav betingade effekter på vindhastigheten och vindprofilens form är följaktligen ej representativa för hela året. Framför allt sommarförhållandena med stor instabilitet och kraftig byighet saknas i materialet.

En tydlig illustration till stabilitetens betydelse för vindhastigheten i låg nivå framgår ur figur 14. Punkt 2 är omgiven av skog i öster och väster och även vid vindriktningar i sektorn 320° - 20° är den fria vindvägen kort. För att strömningen i skiktet under trädkronorna skall vidmakthållas måste friktionsförlusten kompenseras av impulstransport från skiktet ovanför trädtoppsnivå. Figur 14 visar tydligt effekten av att denna kompensande transport försvagas vid stabil jämfört med neutral skiktning. Figuren visar även, att strömningen i 2 m-nivån lätt stagnerar vid stabil skiktning.

Med hjälp av figurerna 9-14 samt kurvorna över \bar{F}_{10} i figur 5 och 6 kan en bestämning göras av den genomsnittliga kvoten mellan vindhastigheten i 2 m-nivån vid olika lång fri vindväg och hastigheten på 10 m över öppet, homogent underlag. Härvid beräknas

$$f = \frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_A}, \quad (5)$$

där \bar{u}_A är vindhastigheten på Arlanda i 10 m-nivå. Sambandet mellan \bar{u}_A och \bar{u}_{10} i respektive mätpunkt, dvs. $\bar{u}_{10} = \bar{F}_{10} \cdot u_A$, för viss vindriktning har applicerats på resultaten för respektive delsektor i figurerna 9-14 för att beräkna f enligt ovan. Resultatet framgår av figur 15. Figuren bör kunna användas för en approximativ omräkning av vindstatistik avseende 10 m över mark från en fritt belägen referensstation till 2 m-nivå på en viss plats där skogsvegetation finns i närheten. Vid svaga vindar ($\bar{u}_{\text{ref.}} < 2$ m/s) måste sambandet dock betraktas som högst osäkert. På mycket korta avstånd (< 20 m) från skog bör vidare en större läverkan förväntas. Detta har antytts med den streckade kurvan i figuren.

4.3.3 Lokala snöförhållanden i området

Vid två tillfällen, den 8.2 och 19.3, gjordes snödjupsmätningar inom försöksområdet. Resultaten redovisas i figur 16 och 17. Vid

det första tillfället var snödjupen små och de lokala variationerna svagt utbildade. Under början av mark och i synnerhet under tiden 15-17:e förekom flera snöfall varvid snödjupet växte snabbt och nådde sin största mäktighet den 19:e. Under resten av mars månad föll endast små mängder snönederbörd. Snödjupet på Arlanda den 18:e och 19:e uppgick till 22 cm. I figur 18 återges frekvensfördelningen av vindriktningen i samband med snöfallen under mars månad. Härur framgår att vindriktningar omkring nordost varit klart dominerande vid snöfall, vilket också är det normala i östra Svealand. Dominansen av vindar mellan nord och ost var ännu mer utpräglad under dagarna 15-17:e, då snötäcket huvudsakligen byggdes upp.

Figur 17 visar en tydlig ansamling av snö i svackan mellan de båda höjderna. Både skogen och topografin ger här läverkan vid nordostliga vindar. De största snödjupen uppträdde på den öppna "ängen" medan snödjupet i den omgivande skogen var något mindre till följd av att snön till en del samlats upp i trädkronorna. I sluttningen väster om punkt 3 var snödjupet påfallande lågt med hänsyn till att även denna sluttning ligger i lä vid nordostvind. Troligtvis är detta en effekt av den effektiva uppsamlingen av snö i och omkring svackan, varigenom en "filtrering" av snö i luftströmningen ägt rum.

En annan tydlig effekt är att buskridån längs åkerns nordsida orsakat en viss lokal ökning av snöansamlingen. Snödjupet längre ut på åkern är nära detsamma som på Arlanda vid samma tidpunkt.

Efter den 24.3 skedde en snabb avsmältning inom försöksområdet. Vid månadens slut var åkern snöfri bortsett från ett smalt bälte närmast skogsbrynet i norr. I skogen och på ängen vid punkt 2 minskade snötäcket betydligt långsammare, i synnerhet i sluttningen ovanför och väster om ängen där de största maximidjupen uppmättes den 19:e. Här fanns snö kvar ännu efter mätningarnas slut, medan skogsmarken i övrigt blev snöfri redan i början av april. Snötäckets tillbakagång är tydligt relaterad till variationen i det maximala snödjupet men beror dessutom av skillnader i strålningsförhållandena mellan skog och öppen mark, vilket behandlas i nästa avsnitt. De lokala temperaturvariationerna inom området, vilka behandlas i avsnitt 4.5, är sannolikt mera en effekt av än en orsak till skillnader i snötäckets avsmältning.

4.4

Energiutbytet i markytan

Nettostrålningen (Q^*) utgör den primära energiinkomsten för markytan. Denna inkomst fördelas sedan på tre olika flöden, nämligen värmeflödet i marken (Q_G , positivt nedåt), turbulent flöde av sensibelt värme (Q_H , positivt uppåt) och turbulent flöde av latent värme (Q_E , positivt uppåt). Följaktligen gäller

$$Q_N = Q_G + Q_H + Q_E \quad (6)$$

Q_H och $Q_E > 0$ innebär alltså en energiinkomst för atmosfären.

Flödenas riktning bestäms av temperatur- respektive fuktighetsprofilerna i marknära luftskikt. Q_H är i regel > 0 under dagen

och ofta < 0 under natten medan Q_E ofta är > 0 hela dygnet.

Q_H^* och Q_G erhålles direkt ur mätningarna. Följaktligen kan summan av Q_H och Q_E beräknas ur ekvation (6). Däremot medger ej mätningarna en separat bestämning av Q_H respektive Q_E .

4.4.1 Lokala variationer i strålningsförhållandena

Globalstrålningen, dvs. infallande direkt plus diffus solstrålning, mättes på åkern vid punkt 1 och kan förutsättas vara representativ även för instrålningen mot skogen. Vid soluppgång och solnedgång kan dock instrumentet ha skuggats av den lokala omgivningen. Samtliga redovisade data utgörs av lh-medelvärden.

Nettostrålningen utgörs av skillnaden mellan å ena sidan infallande globalstrålning (G) plus långvågig strålning från himmel och trädkronor ($L\downarrow$) och å andra sidan markreflekerad solstrålning (αG) plus utgående långvågig strålning ($L\uparrow$). Nettostrålningen (Q^*) kan alltså skrivas som

$$Q^* = G(1-\alpha) + L\downarrow - L\uparrow \quad (7)$$

där α är markytans reflexionsförmåga (albedo) för solstrålning. Skillnaderna i α mellan olika naturliga ytor är stora och beror även av ytans fuktighetshalt. Även infallsvinkeln för den direkta solstrålningen är av betydelse för albedot. Publicerade data över albedot för de typer av ytor, som är aktuella i försöksområdet, ger följande approximativa värden.

| | |
|------------------------|------------------------|
| Våt lerjord | $\alpha = 0.10 - 0.15$ |
| Gräsytor (fjölårsgräs) | $\alpha \approx 0.20$ |
| Torr nysnö | $\alpha = 0.75 - 0.95$ |
| Gammal snö | $\alpha = 0.40 - 0.70$ |
| Trädkronor (barrträd) | $\alpha = 0.10 - 0.15$ |

Den långvågiga strålningen följer Stefan-Boltzmanns lag,

$$L = \epsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

där emissiviteten, ϵ , ligger mellan 0.9 och 1 för de flesta naturliga ytor liksom för molnundersidorna. Vid molntäckt himmel bestäms skillnaden mellan de båda långvågiga strålningsflödena främst av underlagets och molnbasens temperatur. Vid klar himmel bestäms $L\downarrow$ av den vertikala fördelningen av vattenånga och koldioxid samt temperatur i skiktet upp till c:a 1 km över marken.

Eftersom nettostrålningen bestäms av ett flertal inbördes oberoende faktorer kan man inte vänta sig att finna helt entydiga samband mellan å ena sidan Q^* och å andra sidan en viss omgivningsfaktor som t.ex. underlagets beskaffenhet eller vegetationstyp. Genom en lämplig gruppering av materialet kan emellertid vissa karakteristiska lokala effekter studeras. Redovisningen i det följande syftar främst till att beskriva, hur mar-

kens nettotillskott av strålningsenergi varierar med typen av lokal omgivning. Däremot kan de lokala effekterna på vart och ett av de i Q^* ingående strålningsflödena ej redovisas annat än i principiella termer.

Vid analysen av nettostrålningsmätningarna är det lämpligt att dela upp materialet i fyra kategorier, nämligen fall med

- a) Klar himmel, snötäckt mark
- b) - " - , barmark
- c) Mulet, minst 7/8 låga moln, snötäckt mark
- d) - " - barmark

För molnighetsklassificeringen har Arlandas observationer använts. Detta medför en viss osäkerhet, speciellt beträffande förekomsten av låga moln som kan vara starkt lokalt beroende. För att begränsa osäkerheten har endast sådana fall medtagits, då molnighetsförhållandena bedömts vara konstanta i tid och rum.

I figur 19-22 visas exempel på dygnsförloppen av global- och nettostrålningen under dygn av respektive typ. En jämförelse mellan figur 19 och 20 visar vilken stor betydelse förekomsten av snötäcke har för markytans energibudget. Trots att globalstrålningen under dagen är stor och i huvudsak densamma i båda fallen, blir nettotillskottet vid snötäckt mark endast svagt positivt på åkern och förblir negativt i skogen, medan avsevärda positiva tillskott erhålles både i skog och i synnerhet på åkern vid barmark.

Förloppet av Q^* i figur 20 visar ett påfallande maximum mellan kl 09.30 och 13.30. Förklaringen härtill är att skogen är glänsare i sektorn sydost om punkten – delvis till följd av att gallring av enstaka träd skett där – samtidigt som terrängen faller åt detta håll. Med tilltagande solhöjd under förmiddagen kan därför även den direkta solstrålningen nå ned till marken under längre eller kortare perioder. Figuren ger följaktligen en tydlig illustration till, hur lätt strålningsutbytet vid marken kan påverkas av – och styras genom – behandling av skogsvegetationen i ett område.

Under den mörka delen av dygnet är nettostrålningen negativ både i skog och på öppen mark. Energiförlusten ($L\uparrow$) blir störst för åkern medan trädskronor och trädstammar ger ett nedåtriktat flöde ($L\downarrow$) som till stor del kompenserar $L\uparrow$. Figurerna 19 och 20 visar även hur förekomsten av snötäcke inverkar på markens nattliga strålningsförlust. I skogen är nettostrålningen nära densamma ($\approx -40 \text{ W/m}^2$) vid snötäckt mark som vid barmark. Åkern däremot uppvisar betydligt mindre förlust vid snötäcke ($\approx -50 \text{ W/m}^2$) än vid barmark ($\approx -100 \text{ W/m}^2$) efter snösmältningen. Förklaringen ligger i att värmeledningen i ett torrt, nyfallet snötäcke är mycket mindre (10-20 ggr mindre) än i våt lerjord. Snöytan kyls härigenom ned och dess långvågiga utstrålning ($L\uparrow$) avtar snabbt med fallande ytemperatur. Detta framgår speciellt i figur 19 under timmarna mellan midnatt och soluppgången. Då barmark råder på åkern (fig. 20) blir avkylningen i ytan betyd-

ligt långsammare genom att energiförlusten kan kompenseras genom värmeledning från skikten under ytan.

Vid mulet väder (mängden låga moln $> 7/8$, figur 21 och 22) ändras förhållandena väsentligt, även om de ovan diskuterade skillnaderna mellan barmark och snötäckt mark fortfarande kan urskiljas. Molnighetens inflytande visar sig genom att markytans energiförlust nattetid blir starkt reducerad på grund av det nedåtriktade flödet $L\downarrow$ från molnen. Vidare sker vid snötäckt mark multipelreflexion av den diffusa solstrålningen mellan snöytan och molnbasen. Härigenom blir nettostrålningen under dagen endast svagt positivt. Skillnaden mellan skog och åker försvinner så gott som helt vid snötäckt mark såväl under dagen som under natten.

Strålningsflödena vid barmark i figur 22 är troligen ej helt representativa för mulen himmel. Under timmarna efter soluppgången ger den snabba ökningen av globalstrålningen vid handen att luckor kan ha förekommit i molntäcket. Detsamma gäller den kortvariga uppgången kl. 15.30. Barmark förekom endast i slutet av mätperioden och något helt renodlat mulet dygn förekom ej då.

Markytans och molnighetens inflytande på strålningsförhållandena framgår ytterligare ur figur 23-25. I figur 23 och 24 har nettostrålningen plottats som funktion av globalstrålningen utan uppdelning i olika molnighetsklasser. Däremot har en uppdelning gjorts i fall med lufttemperatur i 2 m-nivån över respektive under 0°C för att approximativt särskilja fall, då underlagets yta är frusen eller våt. Vid snötäckt mark (fig. 23) finner man en klar skillnad då nettostrålning blir något mera positiv för $T > 0^{\circ}\text{C}$ än för $T < 0^{\circ}\text{C}$. Förklaringen är att en våt snöyta har ett väsentligt lägre albedo än en torr. Emissiviteten för långvågsstrålning är däremot approximativt lika. Uppdelningen efter lufttemperaturen i 2 m-nivå ger givetvis ej någon helt säker indikation angående snöytans tillstånd, eftersom ytans temperatur kan vara under fryspunkten även vid lufttemperaturer över 0°C . Detta inträffar dock främst nattetid vid liten molnighet.

En konsekvens av det i figur 23 illustrerade förhållandet är att snötäckets avsmältning påskyndas då vatten i flytande form börjar bildas i ytan. Dessutom ökar snötäckets värmeledningsförmåga, varigenom den absorberade strålningsenergin kan påverka ett djupare skikt under själva snöytan.

Liksom i figur 19 och 21 framgår det tydligt ur figur 23 att snötäckets reflexion av globalstrålningen har en avgörande betydelse för energibudgeten hos underlaget. Förekomsten av snötäcke har härigenom även ett väsentligt inflytande på lufttemperaturen i marknära nivå.

Under den del av mätperioden, då barmark rådde i området, var lufttemperaturen $> 0^{\circ}$ så gott som hela tiden. Figur 24 innehåller endast ett fåtal fall med $T < 0^{\circ}$ och ger inget underlag för vidare diskussion. Vid temperaturer över 0°C visar resultaten

för barmark i motsats till snötäckt mark en markant skillnad i energitillförseln mellan öppen mark och skog. För positiva Q^* -värden ger en linjär regression av (+)-fallen i figur 24 följande samband mellan Q^* och G .

$$\begin{aligned} \text{Öppen mark: } Q^* &= 0.68 G - 4 \\ \text{Skog } Q^* &= 0.35 G - 3 \end{aligned} \quad (9)$$

Markytans energitillskott blir alltså grovt sett hälften så stort i skog som på öppen mark vid en och samma globalstrålning.

Nettostrålningen nattetid redovisas ytterligare i figur 25, där till skillnad från figur 23 och 24 en uppdelning efter mängden låga moln har gjorts. I figuren jämförs nettostrålningen i skog och på öppen mark dels för snötäckt mark och dels för barmark.

Antalet fall med medelstor molnighet (3-6/8) är avsevärt mindre än antalet fall med stor respektive liten molnmängd. Även om de exakta proportionerna mellan de olika kategorierna är en tillfällighet återspeglar fördelningen ändå en karakteristisk egenhet ifråga om molnighetsförhållandena. Ur "Klimatdataboken" framgår för mars månad (Västerås) att klassen 0-2/8 innehåller 35% av tiden och klassen 7-8/8 38%.

Figuren visar, liksom figurerna 19-22, den stora skillnaden mellan klar och mulen himmel. Dessutom framgår att vid liten molnighet är variationen i Q^* avsevärt större över öppen mark än i skog, speciellt vid snötäckt mark. Nattetid bestäms Q^* enbart av skillnaden i de långvägiga strålningsflödena, dvs.

$$Q_{\text{natt}}^* = L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (10)$$

I skogen kommer L_{\downarrow} vid klar himmel till allra största delen från trädkronorna. Med hjälp av ekv. (8) kan man approximativt skriva

$$Q_{\text{natt}}^* = \sigma \left[(\epsilon T^4)_{\text{träd}} - (\epsilon T^4)_{\text{mark}} \right] \quad (11)$$

Om man antar att $\epsilon \approx 0.95$ för både mark och träd kan temperaturskillnaden mellan mark och trädkronor approximativt bestämmas enligt

$$\Delta T = T_{\text{träd}} - T_{\text{mark}} = \frac{1}{4 \bar{T}^3} \cdot \frac{Q_{\text{natt}}^*}{\sigma \epsilon} \quad (12)$$

där \bar{T} är medelvärde mellan träd- och marktemperaturen. Ur figur 25 (övre delfiguren) erhålles $Q_{\text{natt}}^* \approx -35 \text{ W/m}^2$ i skog vid klar himmel, vilket med $\bar{T} \approx 0^\circ\text{C}$ (273 OK) ger $\Delta T \approx -8^\circ\text{C}$. Beräkningen är givetvis approximativ men visar ändå att trädkronornas temperatur blir väsentligt lägre än den underliggande skogsmarkens. Förklaringen härtill är att kronorna avkyls mer än marken på grund av att de förlorar betydligt mer energi genom uppåtriktad utstrålning än de mottager genom atmosfärens motstrålning.

Variationsbredden hos Q_{\downarrow}^* respektive Q_{\uparrow}^* i figur 25 är, speciellt

ifråga om fall med liten molnmängd, till stor del en återspeglning av att underlaget successivt avkyls under nattens lopp. Såsom redan diskuterats i anslutning till figur 19 är denna avkylning speciellt kraftig hos en snöyta på öppen mark, vilket förklarar den väsentligt större variationen av Q_1^* i förhållande till variationen av Q_3^* vid klar himmel.

Under renodlade strålningsnätter med vindstilla eller mycket svag vind, då det turbulenta värmeutbytet mellan marken och underlaget är försumbart, kan markytans avkylning efter solnedgången beräknas enligt Brunt's ekvation,

$$\Delta T_s = \frac{2}{\pi} \frac{1}{1/2} \cdot \frac{Q^*}{(\rho c K)^{1/2}} \cdot (\Delta t)^{1/2} \quad (13)$$

där Δt är tiden från solnedgången

K är underlagets värmeledningsförmåga

ρc är underlagets värmekapacitet

Ekvationen förutsätter att Q^* är konstant i tiden, vilket i regel endast är approximativt uppfyllt.

För lerjord är $(\rho c K)^{1/2} \approx 1.6 \cdot 10^3 \text{ (J m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2})$ vilket med observerade Q^* -värden vid barmark ger en temperatursänkning per timme enligt:

| Q_1^* (W/m^2) | ΔT_s ($^{\circ}\text{C/tim}$) |
|----------------------------|-----------------------------------------|
| -100 | -4.2 |
| - 75 | -3.2 |
| - 50 | -2.1 |
| - 25 | -1.1 |

Under renodlade strålningsförhållanden är avkylningshastigheten hos luften i lägsta skikt approximativt densamma som hos underlaget. En direkt jämförelse mellan uppmätt och beräknad avkylningshastighet enligt ekvation (13) kan ej erhållas, eftersom materialet endast innehåller några få timmar då förutsättningarna för tillämpningen av (13) vid barmark kan antagas vara approximativt uppfyllda. Den verkliga avkylningshastigheten hos luften är i regel långsammare än vad som erhålles ur (13) på grund av konvergent, nedåtriktad turbulent värmefflöde. Förhållandet mellan Q_3^* och Q_1^* vid klar himmel kan emellertid tagas som en indikation på skillnaden i luftens strålningsavkylning i skog och på öppen mark. Ur figur 25 erhålles approximativt

$$Q_3^* = 0.61 \cdot Q_1^* + 24 \quad \text{för} \quad Q_1^* < -70 \text{ W/m}^2 \quad (14)$$

Detta ger följande approximativa värden för avkylningshastigheten i skog och på åker.

| $(\Delta T)_{\text{stråln.}}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{tim}$) | | |
|-----------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| Åker | Skog | Differens |
| -2.5 | 0 | -2.5 |
| -3.0 | -0.15 | -2.85 |
| -3.5 | -0.35 | -3.15 |
| -4.0 | -0.55 | -3.45 |
| -5.0 | -0.95 | -4.05 |

Härvid har $(\rho c K)_{\text{åker}} = (\rho c K)_{\text{skogsmark}}$ antagits. Detta är dock av mindre betydelse. Resultatet belyser ändå den avgörande betydelsen av förekomsten av skog för den nattliga strålningsavkylningen hos underlaget och de lägsta luftskikten. Det förklarar också, varför stora lokala temperaturdifferenser uppträder nattetid vid lugnt och klart väder.

4.4.2 Värmeflödet i mark

Värmeflödesmätning utfördes i punkt 1 och 2. Givarna placerades c:a 1 cm under markytan. Den senare punkten valdes trots att det hade varit lämpligare att utföra mätningen tillsammans med nettostrålningsmätningen i punkt 3. Det visade sig emellertid att markförhållandena vid punkt 3 var alltför inhomogena för att en representativ placering av givaren skulle vara möjlig. Värmeflödesmätningen är betydligt mer beroende av markens egenskaper i en viss mätpunkt än nettostrålningsmätningen, eftersom den senare innebär integrering av strålningsflöden från omgivande markytor inom en radie av 10 ggr instrumentets höjd över marken. Markförhållandena vid punkt 2 är betydligt mer homogena, varför denna valdes för värmeflödesmätning. Nettostrålningen vid punkt 2 kan grovt sett antagas utföra ett medelvärde mellan punkt 1 och punkt 3 med hänsyn till den lokala omgivningen.

I figur 26 och 27 redovisas sambandet mellan värmeflödet i punkt 1, $(Q_G)_1$, och punkt 2, $(Q_G)_2$. (Obs, olika skalor i figurerna). På åkern uppträdde barmark redan från månadsskiftet mars-april medan snöfläckar fanns kvar vid eller intill punkt 2 ända till mätperiodens slut.

Under perioden fram till den 24.3 skedde ingen snösmältning och snötäcket bestod av torr och löst packad snö med låg värmeledningsförmåga. Värmeflödet i marken var under denna period i regel mycket litet, vilket framgår av det stora antalet fall nära origo i figur 26. I och med att snötäckets densitet och halt av vatten i flytande form ökade snabbt efter den 24:e ökade också värmeflödet i underliggande mark. Flödet var härvid nästan utslutande negativt, dvs. riktat uppåt. Figur 26 visar en anhogning av fall då $|Q_{G,1}| > |Q_{G,2}|$, vilka huvudsakligen representerar den period efter den 24:e då snötäcke ännu förekom på

åkern. Snötäcket här var emellertid betydligt tunnare än vid punkt 2, vilket torde vara orsaken till det systematiskt större värmeflödet. En viss, men relativt liten skillnad mellan dag och natt kan urskiljas i denna grupp.

Under två dygn, den 21-22 och 22-23, var emellertid värmeflödena väsentligt större än under resten av snötäckesperioden, såsom framgår av de sammanbundna punkterna i figur 26. Dessa båda dygn var extremt kalla med temperaturer ned till omkring -20° båda nätterna. Även dygnen före dessa var mycket kalla, som delvis framgår av figur 3. Förklaringen till de stora negativa värmeflödena är troligen att en lång sammanhängande köldperiod orsakar en successiv avkylning genom allt djupare skikt i snötäcket. Efter några dygn når köldvägen ned till marken, vilket resulterar i en snabb avkylning av markytan och ett ökande, uppåtriktat värmefflöde mot markytan. Instrålningen under dagen var stor under de aktuella dygnen och solstrålningen kan delvis penetrera genom snötäcket, vilket kan förklara att värmefflödet under dagen den 22:a blir avsevärt mindre negativt.

Förloppet innebär tydligen att den isolerande förmågan hos ett snötäcke beror, förutom av dess tjocklek och konsistens, även av köldperiodens varaktighet. Något överraskande är att värmefflödet tycks vara större i punkt 2 än i punkt 1 under denna köldperiod, trots att snötäcket var djupare vid punkt 2. Figur 26 visar slutligen att positiva (nedåtriktade) värmefflöden först börjar bli av betydelse när snötäcket har smält bort. Så länge smältande snö finns kvar, åtgår den under dagen instrålade energin för smältning samt avdunstning och endast en liten del tillförs underlaget genom värmeledning.

Vid barmark blir såväl det positiva värmefflödet under dagen och det negativa under natten väsentligt större än vid snötäckt mark, vilket framgår av figur 27. (Figuren representerar förhållandena efter den 1.4). I synnerhet blir de positiva tillskotten till markens energibalans väsentligt större. Vidare är flödet mera positivt över öppen mark än i den mera skuggade punkt 2, vilket huvudsakligen torde bero på den större nettostrålningen. Dessutom torde kvarliggande snöfläckar nära punkt 2 fortfarande ha påverkat flödet i denna punkt. Beträffande värmefflödet nattetid kan ingen klar skillnad mellan de båda punkterna konstateras.

4.4.3 Uppskattningar av det turbulenta värmeutbytet

En viss möjlighet finns att uppskatta det sammanlagda, turbulenta utbytet av sensibelt värme (Q_H) och latent värme (avdunstningsvärme, Q_E) mellan luften och underlaget. Ekvation (6) kan skrivas

$$Q_{H+E} = Q^* - Q_G \quad (15)$$

Summan av de båda turbulenta flödena kan alltså erhållas ur mätningarna av Q^* och Q_G . Detta förutsätter dock att inget

snötäcke finns, eftersom värmevlödesmätningen representerar markytan men ej snöytan. Ekvation (15) kan därför endast tillämpas på mätningarna då barmark rådde i punkt 1 med större tillförlitlighet. Så länge snötäcke förekom är värmevlödet i marken litet och så gott som alltid riktat uppåt, såsom redan framgått ovan. Under de första dagarna med barmark är $Q_G > 0$ men mycket

liten. Den tillförda nettostrålningsenergien under dagem om-sätts då till största delen i avdunstningsvärme (Q_E) och till en mindre del i sensibelt värmevlöde (Q_H). I och med att vattenhalten i själva markytan minskar genom avdunstning och avrinning ökar det nedåtriktade värmevlödet i marken. Detta framgår ur figur 28, där Q_{H+E} enligt ekvation (15) avsatts mot Q^* i punkt 1.

Under dagen då $Q^* > 0$, grupperar sig punkterna längs två räta linjer. Linjen (1:1) representerar $Q_G = 0$ och de fall, som avsluter till denna linje kommer alla från de första dagarna i april, då snötäcket just försvunnit från åkern. Under denna tid var vattenhalten i markytan mycket hög och tidvis förekom ett ytskikt av flytande vatten.

Den andra linjen (streckad) för $Q^* > 0$ har regressionsekvationen

$$Q_{H+E} = 0.51 Q^* - 6 \quad (W/m^2) \quad (16)$$

Denna linje representerar fall under tiden 7-9.4, då markytans vattenhalt hade minskat påtagligt och betydande positiva Q_G -värden förekom.

Nattetid är Q_{H+E} genomgående nedåtriktad och avsevärt svagare än under dagen. Spridningen är relativt stor. En klar tendens finns dock för punkterna att gruppera sig ovanför linjen (1:1), vilket innebär att Q_G varit uppåtriktad. Strålningsförlusten i ytan kompenseras alltså dels genom nedåtriktad turbulent värmevlöde, Q_{H+E} , dels genom uppåtriktad värmevlöde i mark, Q_G . De inbördes proportionerna mellan Q_{H+E} och Q_G erhålles ur regressionslinjerna i figur 28, dvs. för

$$\begin{aligned} Q^* > 0 : Q_{H+E} &= 0.51 Q^* - 6 \\ Q^* < 0 : Q_{H+E} &= 0.80 Q^* + 6 \end{aligned} \quad (17)$$

Linjernas skärning med axeln $Q^* = 0$, dvs. $\pm 6 W/m^2$, är med hänsyn till mätnoggrannheten och punkternas spridning ej signifikant skilt från noll. Följaktligen balanseras ytans nattliga strålningsförlust i genomsnitt till 80% av Q_{H+E} och till 20% av Q_G . Motsvarande värden under dagen är c:a 50% för vardera termen. Figur 28 visar dock att variationen i dessa proportioner är stor under hela dygnet och troligen främst beror av vatteninnehållet i ytan.

De inbördes proportionerna mellan Q_H och Q_E kan inte bestämmas ur mätningarna. Med hänsyn till markytans tillstånd torde dock

Q_E ha varit den klart dominerande termen.

4.5

Lokala temperaturförhållanden

Lokala variationer i lufttemperatur uppkommer generellt sett som ett resultat av skillnader i energiutbytet mellan underlaget och de marknära luftskikten. Temperaturvariationerna blir mest markerade i situationer med låga vindhastigheter och svag vertikal omblandning av luft, dvs. vid stabil skiktning. Speciellt stora lokala temperaturdifferenser uppkommer nattetid vid klar himmel över öppen, snötäckt mark, då kraftiga markinversioner lätt utbildas. Som redan berörts i avsnitt 4.2 kan härvid luftrörelsen i låg nivå stagnera, vilket leder till en förstärkt avkylning av luften närmast marken och en ytterligare stabilisering av skiktningen. De mest utpräglade inversionsförhållandena under försöksperioden inträffade natten mellan den 22.3 och 23.3, då temperaturen i 2 m-nivå över åkern sjönk till -20° - -21°C medan den 10 m-nivå var c:a 4° högre. Samtidigt var 2 m-nivån i punkt 2 $2-3^{\circ}$ varmare än i punkt 1 medan temperaturskillnaden i 10 m-nivån endast var c:a 0.5°C . Luftströmningen över åkern hade vid detta tillfälle ej stagnerat helt - vindhastigheten i 2 m-nivån var 1-1.5 m/s - medan hastigheten i samma nivå i punkt 2 var < 0.5 m/s. Den lägre temperaturen i punkt 1 måste i detta fall bero på att snöytan på åkern avkyldes kraftigt genom nettostrålningsförlust medan förlusten blev betydligt mindre i punkt 2 på grund av omgivande skog.

Under slutet av mätperioden, då barmark uppträdde på åkern, var temperaturdifferensen ofta omkastad. Skogen som omger svackan vid punkt 2 orsakar en väsentligt mindre instrålning och svagare uppvärmning av markytan. Dessutom spelade säkerligen den större snöansamlingen och långsammare avsmältningen i svackan en betydande roll för uppkomsten av temperaturunderskottet.

Som redan framgått i avsnitt 4.2 är Arlandas temperaturobservationer väl representativa för förhållandena i punkt 1 med undantag för situationer med speciellt låga temperaturer. I figur 29-31 redovisas frekvenser av temperaturdifferensen mellan var och en av punkterna 2, 3 och 4 och punkt 1. (Samtliga fall avser differenser mellan lh-medelvärden). Härvid har en uppdelning gjorts mellan fall med barmark respektive snötäcke vid punkt 1. Resultaten kan sammanfattas enligt följande.

Mellan punkt 4 och punkt 1 föreligger ingen större skillnad i temperaturhänseende. Punkt 4, som ligger i en måttlig sluttning, är omgiven av mycket gles blandskog, som ej förefaller orsaka någon väsentlig ändring i strålningsklimatet. Genom att åkern vid punkt 1 sluttar svagt sker troligen ingen egentlig kallluftsansamling där, vilket annars borde ha gett upphov till ett påtagligt temperaturunderskott jämfört med punkt 4.

Punkt 3 är systematiskt något varmare än punkt 1 i de kallaste situationerna, vilket torde vara en effekt både av skillnaden i höjdläge och i strålningsförhållanden.

Ur figur 30 och 31 framgår att ett relativt stort antal fall förekommer både i punkt 3 och 4 då dessa punkter varit *kallare* än punkt 1 även vid allmänt låga temperaturer (ned till c:a

-18°C). Detta är mest framträdande för punkt 3, trots att denna ligger högst och i en tätare skog. En förklaring härtill finner man ur vindhastighetsmätningarna. I punkt 1 var hastigheten i 2 m-nivån vid dessa tillfällen 2-3 m/s medan den i punkt 2 var endast 0.5-1 m/s. Detta innebär att strömningen över öppen mark fortfarande bör ha medfört en avsevärd turbulent omblandning och nedåtriktat värmefflöde. I tät skog däremot torde strömningen ha stagnerat i stort sett fullständigt, varigenom strålningsavkyllningen blir dominerande. Trots att nettostrålningsförlusten i skog är något mindre än över öppen mark medför således frånvaron av turbulent omblandning i skog en större avkyllning här än över öppen mark. Med denna förklaring är det också följdriktigt att temperaturunderskottet blir större i den mest vindskyddade punkten 3 än i den mer öppna belägna punkten 4.

De största differenserna vid låga temperaturer uppträder mellan punkt 1 och 2, varvid den senare punkten varit upp till 4° varmare. Orsakerna till dessa skillnader har redan diskuterats i början av detta avsnitt.

I och med att barmark uppträder på åkern medan snöfläckar fortfarande finns kvar i skogen, speciellt nära punkt 2, blir punkt 1 systematiskt varmare än övriga punkter. De största temperaturunderskotten uppträder i punkt 2 och 3. I båda fallen medför skogen en reducering av nettostrålningsinkomsten. Punkt 2 ligger i kanten av skogen och mottager större instrålning under en del av dagen. Under början av april kommer dock marken i svackan att ligga i skugga redan under början av eftermiddagen. Därefter kommer nettostrålningen här snabbt att bli negativ och orsaka en större energiförlust än i skogen vid punkt 3. Detta kan i förening med kvarliggande snöfläckar förklara de större underskotten i punkt 2.

5. SLUTSATSER

5.1 Rådande lokalklimat i försöksområdet

Försöksområdets topografi och vegetation är av en typ, som är vanlig i Mälardalen och många andra områden i landet. Resultat bör i viss utsträckning vara representativa även för andra, likartade platser. Emellertid visar resultaten också att de lokala effekterna är starkt beroende av de specifika detaljerna i fråga om topografi, vegetation och markbeskaffenhet i området liksom av den rådande vädertypen. Detta är speciellt fallet beträffande energiutbytet mellan underlaget och det marknära luftskiktet och därmed sammanhängande lokala temperaturvariationer.

I fråga om vindförhållandena bör de erhållna resultaten vara giltiga under alla årstider. Beträffande övriga resultat måste den reservationen göras, att renodlade sommarförhållanden ej är representerade.

Vindhastigheten uppvisar de största lokala förändringarna. Den småkuperade, delvis skogbevuxna terrängen orsakar en större friktionsförlust i den överlagrade strömningen över området. Vindhastigheten i 10 m-nivå över öppen mark på stort avstånd från skog har härigenom reducerats till c:a 85% av hastigheten över öppen, plan terräng (Arlanda flygplats). De rent lokala omgivningsfaktorerna orsakar betydligt större relativa skillnader i vindhastighet över korta avstånd. Dessa skillnader kan tämligen entydigt relateras till avståndet från skog i en viss riktning. Dessutom har den lokala topografin och speciellt förekomsten av fri vindväg över lägre terräng en påtaglig inverkan på vindhastigheten. Genom den kombinerade effekten av skog och topografi kan hastigheten i exponerade lägen vara c:a 5 ggr så hög som i skyddade lägen.

Resultaten gäller primärt för den speciellt typ av omgivning, som försöksområdet representerar. I kvalitativ mening kan resultaten överföras på fall med annan typ av skog eller topografi. För mera preciserade utvärderingar av lokala vindförhållanden behöver emellertid effekterna av olika omgivningsfaktorer kunna uttryckas som funktioner av vissa, definierade parametrar.

Vindobservationerna från Arlanda har dålig representativitet för området. Resultaten ger dock möjligheter till lokal korrigering av dessa observationer.

Markerade lokala differenser i lufttemperatur uppträder endast i vädersituationer med svag vind och liten molnighet. Sådana förhållanden är vanligast under natten. Temperaturdifferenserna uppkommer till följd av lokala skillnader i energiutbytet mellan atmosfären och underlaget. Differenserna är sällan konstanta i tiden utan utvecklas successivt som ett resultat av lokala olikheter i luftens avkylnings- eller uppvärmningshastighet. Förloppet är mycket känsligt för variationer i vindhastighet och molnighet. En viss kumulativ effekt av varaktig-

heten av en speciell vädersituation är även sannolik genom att markens värmeinhåll förändras över flera dygn.

Väderförhållandena under mätperioden var mycket varierande, varför de lokala temperaturdifferenserna blev väl utvecklade endast under ett fåtal, korta perioder. Under de kallaste nätterna, med minitemperatur ned till c:a -20°C , var luften över öppen åkermark $3-4^{\circ}\text{C}$ kallare än i eller intill skog. Strömningen över åkern hade härvid ej stagnerat helt utan vindhastigheten i 2 m-nivå var c:a 1 m/s. Differenserna var därför sannolikt ej fullt utvecklade. De maximala skillnaderna vintertid torde kunna uppgå till $5-6^{\circ}\text{C}$.

Skuggbildning och kvarliggande snö eller fuktigare mark i eller intill skog orsakar under dagen ett temperaturunderskott på $1-2^{\circ}\text{C}$ jämfört med öppen mark.

Temperaturförhållandena över öppen mark visar bortsett från de kallaste nätterna ingen väsentlig avvikelse från Arlanda. Temperaturstatistik från denna station bör därför vara tillräckligt representativ för området i sin helhet under nuvarande förhållanden. De effekter, som kan förväntas vid en exploatering av området, diskuteras längre fram.

Svackan mellan de båda bergshöjderna kunde förväntas ge en kalluftsansamling eftersom den saknar fritt avflöde för kallluft. En tendens härtill kan utläsas vid jämförelse mellan figur 20 och 30. Effekten är dock relativt svag. Detta torde bero på att den öppna "ängen" i svackan är liten och omgiven av skog i alla riktningar utom mot sydost. Härigenom blir öppningsvinkeln mot rymden begränsad och den nattliga strålningsavkylningen av markytan motverkas delvis av återstrålning från den omgivande skogen.

Åkern ger genom sin lutning tämligen god kalluftsdränering. Någon klar tendens till stagnation av kallluft här kan inte fastläggas ur mätningarna.

Markytans energibudget och värmelagringen i mark visar avsevärda, lokalt betingade skillnader. Skogsvegetationen och topografin har väsentlig inverkan på snötäckets varaktighet, djup och utbredning, vilket även påverkar såväl nettostrålning och värmefflöde i marken. Även små variationer i skogsbeståndets täthet förefaller kunna ha påtaglig inverkan på nettostrålningen under klara dagar. Ökande molnigheten i låg nivå reducerar instrålningen under dagen men även den nattliga strålningsavkylningen högst avsevärt.

5.2 Möjligheter till planmässig förändring av lokalklimatet

Den i inledningen nämnda preliminära bedömning av områdets lokalklimat gav bl.a. vid handen att de högre liggande delarna av området var särskilt exponerade vid nordliga vindar. Denna

bedömning bekräftas och förstärks av mätresultaten, som visar en markerad, lokal hastighetsökning vid vindväg över lågt liggande terräng. Risk för sådan vindexponering föreligger vid alla vindriktningar mellan sydväst och nord till nordost. Det är därför viktigt att bevara en skyddande skogsridå utmed sluttningarna mot väster och norr. Vidare bör enstaka lövfällande träd eller större buskar om möjligt sparas på höjdparierna. Härigenom bör vindhastigheten på de högre partierna kunna reduceras till c:a 1/3 jämfört med om kalavverkning sker.

Skogsvegetationen kan orsaka en avsevärd försvagning av den infallande globalstrålningen. För snötäckta ytor (mark och tak) blir emellertid nettostrålningstillskottet i stort sett oberoende av skogsvegetationen. Däremot blir nettostrålningen under dagen mot snöfria ytor väsentligt reducerad i en tät skog. Samtidigt minskas dock den nattliga strålningsavkylningen påtagligt. Genom en utgallring av skogen, snarare än kalavverkning, bör en optimering av strålningsförhållandena kunna uppnås, varvid även extremt ogynnsamma vind- och temperatureffekter kan förhindras. En reduktion av vindhastigheten och skuggbildning medför även en avsevärt minskad avdunstning sommardag. Detta kan vara väsentligt för att bevara en tillräcklig markfuktighet på bergshöjderna. En viss skuggbildning torde dessutom vara önskvärd sommardag för att motverka uppkomsten av alltför höga inomhustemperaturer i de extremt välisolerade byggnader, som planerats i området.

Bevarandet av skog kan förväntas ge upphov till en viss lokalt ökad snöansamling i skogen och inom ett avstånd av 10-20 m från skogsridån. I övrigt bör exploatering av området medföra att snötäckets djup och varaktighet reduceras genom ökad vindexponering och minskad skuggbildning jämfört med nuläget.

Temperaturförhållandena beror, som framgått tidigare, av många faktorer och förändringar av området kan medföra både högre och lägre temperaturer. Kalhuggning eller kraftig minskning av skogens täthet på bergshöjderna kommer att öka nettostrålningens dygnsamplitud och därmed även amplituden i markytans temperatur. Vid svag vind kommer även lufttemperaturens dygnsvariation att öka framför allt genom sänkning av minimitemperaturen. Samtidigt blir emellertid bergshöjderna mindre vindskyddade vilket motverkar stagnation och strålningsavkylning av luften. Under extremt kalla vådersituationer liksom nattetid under sommarhalvåret, då den allmänna strömningen är mycket svag, kan stagnation inträffa även över öppen mark. I sådana situationer kommer höjdpartierna att få lägre temperatur än i nuläget. I alla övriga situationer, då en viss luftrörelse råder, torde avverkningen medföra en temperaturhöjning.

Vid vindhastigheter > 3-4 m/s torde de lokala temperaturskillnaderna vara praktiskt taget försvunna. Sommardag under dagen förekommer nästan alltid termiskt betingad konvektion, varigenom luftrörelsen blir tillräcklig för att eliminera lokala temperaturdifferenser inom ett så litet område som det här är fråga om. Under denna årstid kan lokala temperatureffekter därför främst förväntas under kvällar och nätter. Emellertid är molnigheten nattetid under sommarhalvåret ofta liten, varför utstrålningen från marken blir betydande och härav betingade temperaturskillnader regelbundet återkommande.

Svackan mellan bergshöjderna kan komma att bli en kallluftsficka om de intilliggande sluttningsarna kalavverkas. Dessa kommer då att utsättas för avsevärt ökad strålningsavkylning, speciellt vid snötäcke, och härigenom producera kallluft som ansamlas i svackan. Eftersom denna har ett skyddat läge för vind, kan stagnation av kallluften lätt ske med åtföljande, förstärkt strålningsavkylning. Svackan är även tämligen fuktig, vilket vid kraftig utstrålning där kan leda till lokal dimbildning.

Skogsavverkning på höjdpartierna medför även en ökad exponering för slagregn. Härvid ger främst vindar från riktningar omkring sydost de största slagregnmängderna.

Snöfall och drivbildning kan uppstå vid nordliga vindriktningar. Kraftiga snöfall med hård vind förekommer vissa år relativt ofta i östra Svealand. Med hänsyn till områdets läge kan man härvid befara avsevärd snöansamling intill enskilda byggnader eller i andra, isolerade läzoner.

Behovet av lämbildning kan stå i motsatsförhållande till krav på fritt solstrålningsinfall mot byggnader eller solfångare. Eftersom skyddande skog främst behöver bevaras i den västra och norra kanten av området, bör dock detta problem ej bli aktuellt annat än för ett fåtal av de planerade byggnaderna. Bevarandet av enstaka, lågvuxna träd bör ej reducera instrålningen under dagen i någon väsentlig grad. Genom en reduktion av vindhastigheten kan verkningsgraden hos solfångare ökas, speciellt vid låga lufttemperaturer. Ur denna synpunkt bör lämbildning för nordliga vindar vara särskilt gynnsam, eftersom dessa vindar ofta är kalla och hårda. Samtidigt råder i sådana situationer ofta liten molnighet.

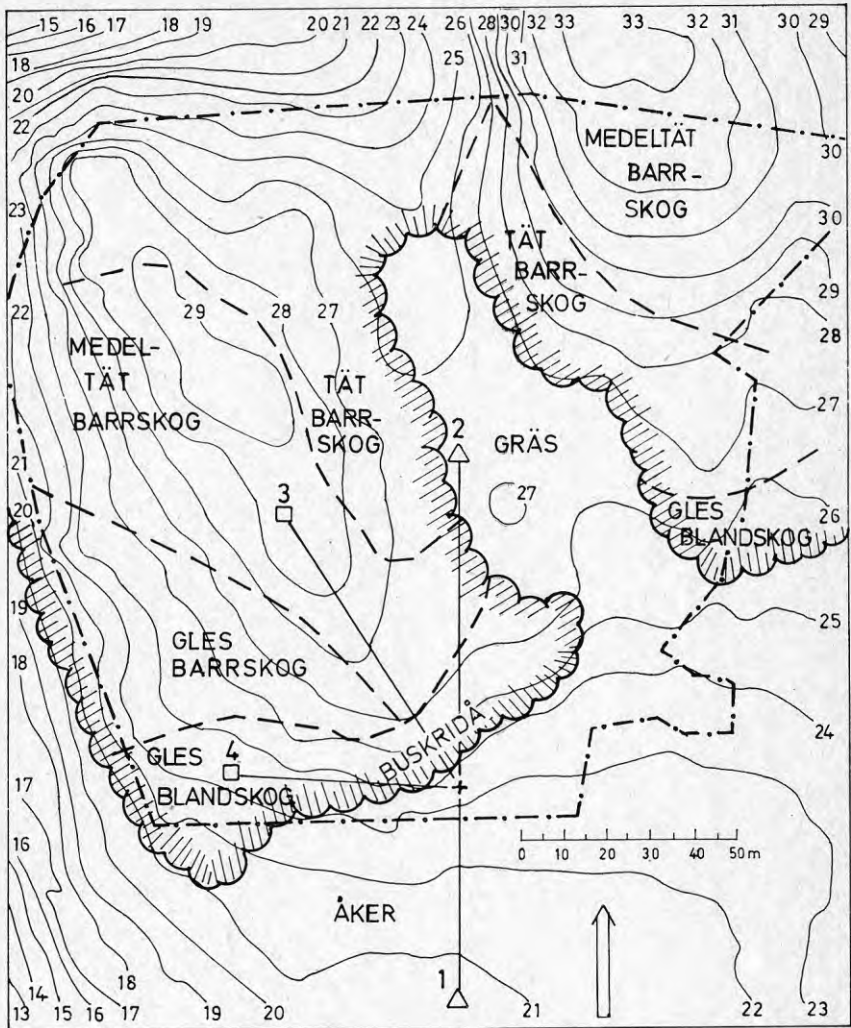
5.3 Slutsatser beträffande försöksmetodik och mätsystem

Förstudiens syfte har främst varit att erhålla en bild av de lokala variationernas storleksordning i relation till vissa, definierbara omgivningsfaktorer och under olika vädersituationer. Insamlandet av ett omfattande primärmaterial av kontinuerliga registreringar, varigenom dygnsförlopp och icke-periodiska variationer kan studeras liksom effekter av förändringar i markbeskaffenhet och underlagets energibudget har varit väsentligt för en fysikalisk tolkning av omgivningens inflytande.

Utöver de redovisade resultaten beträffande försöksområdets lokalmeteorologiska förhållanden har förstudien gett värdefulla erfarenheter i fråga om mätsystemets funktion. Erfarenheterna har i huvudsak varit positiva och visat att den tekniska utrustningen är väl lämpad för kontinuerliga registreringar under relativt svåra yttre förhållanden. Inget bortfall av registreringar har skett, som berott på brister i instrument eller registreringsutrustning. Däremot har yttre åverkan skett på grund av pågående markarbeten i närheten, varvid elförsörjningen bröts vid flera tillfällen. I ett par fall har instrumentfel uppstått, vilka berott på mänsklig åverkan. Genom att försöksområdet besöks så gott som dagligen har fel och driftsavbrott kunnat avhjälpas snabbt.

De praktiska erfarenheterna talar för att man vid denna typ av studier måste ha möjlighet till daglig övervakning av systemfunktionen. Detta bör helst kunna ske genom att ansluta systemet till telenätet, så att resor till försöksområdet endast behöver ske då fel inträffat. Eftersom mätningarna bör omfatta hela dygnet och innehålla många olika vädertyper, kan upprepade bortfall antingen av enstaka eller av samtliga mätkanaler under några dygn medföra att mätperiodens längd behöver utsträckas kraftigt. För att eliminera bortfall av registreringar på grund av avbrott i en provisorisk elförsörjning bör systemet vara försett med batterier, som automatiskt kopplas in vid strömbrott. Mätssystemets konstruktion och fysiska uppbyggnad bör slutligen vara sådan, att felsökning och reparation eller utbyte av komponenter lätt kan ske på platsen.

FIG.1. FÖRSÖKSOMRÅDET I VÄSTRA ÄNGBY



- - - - · OMRÅDETS GRÄNS
- - - - - UNGEFÄRLIGA AVGRÄNSNING AV SKOGBESTÅND MED OLIKA TÄTHET
- △ } MÄTPUNKTER, SE TEXTEN
- } MÄTPUNKTER, SE TEXTEN
- + ARBETSOD MED DATASAMLINGSUTRUSTNING

FIG. 2 LUFTTEMPERATUR (10 min-m.v.) I 2m-NIVÅ PÅ ARLANDA OCH I ÄNGBY, PUNKT 1 (ÖPPEN ÅKER) UNDER MARS - APRIL 1978

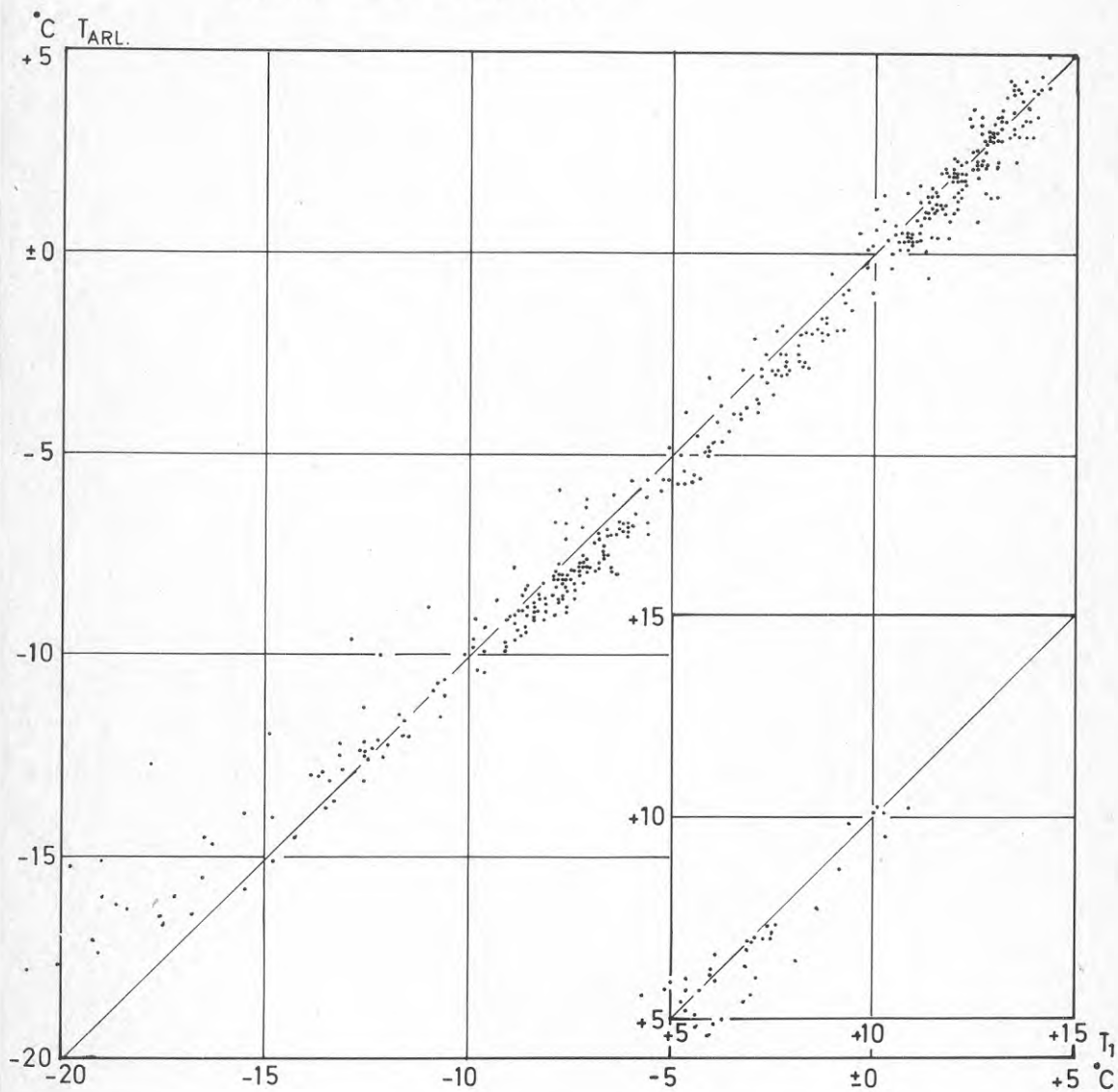


FIG. 3

MOLNINGHET OCH VINDRIKTNING, ARLANDA STABILITETSTYPER, ÄNGBY PUNKT 1
 MARKYTANS ENERGIBALANS, ÄNGBY PUNKT 1
 VINHASTIGHET OCH TEMPERATUR, ARLANDA OCH ÄNGBY, PUNKT 1

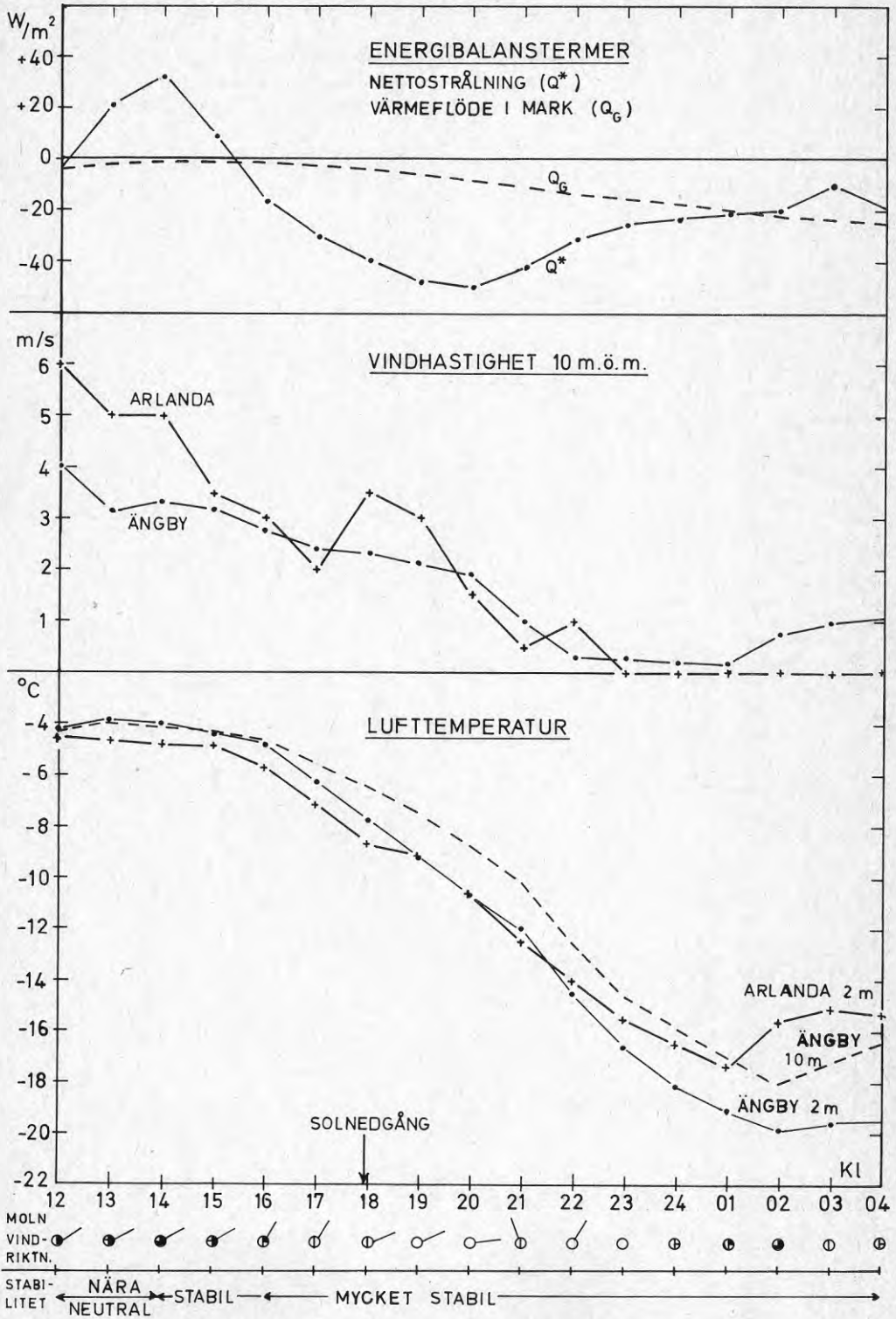
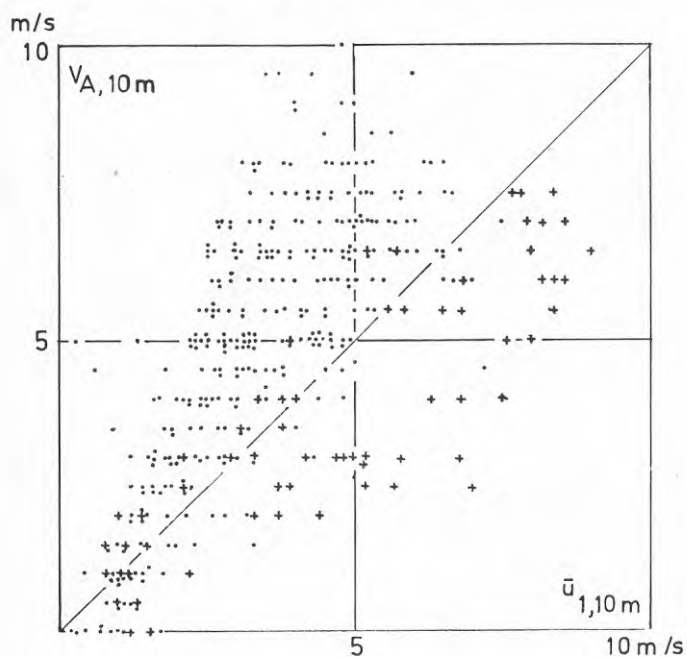


FIG. 4.

JÄMFÖRELSE MELLAN VINDHASTIGHET
PÅ ARLANDA OCH I ÄNGBY



$V_{A,10}$ = ARLANDA, 10 m.ö.m.

$\bar{u}_{1,10}$ = ÄNGBY, 10 m.ö.m. MÄTPLATS 1

+ VINDRIKTNING 250 - 290°

• ÖVRIGA RIKTNINGAR

FIG. 5

LÄVERKAN VID VINDRIKTNING ÄNGBY PUNKT 1, 10 m.ö.m.

$$F_{10} = \left(\frac{\bar{u}_{\text{ÄNGBY, P1}}}{\bar{u}_{\text{ARLANDA}}} \right)_{10 \text{ m.ö.m.}} \quad (\bar{u}_{\text{ARL.}} \geq 2 \text{ m/s})$$

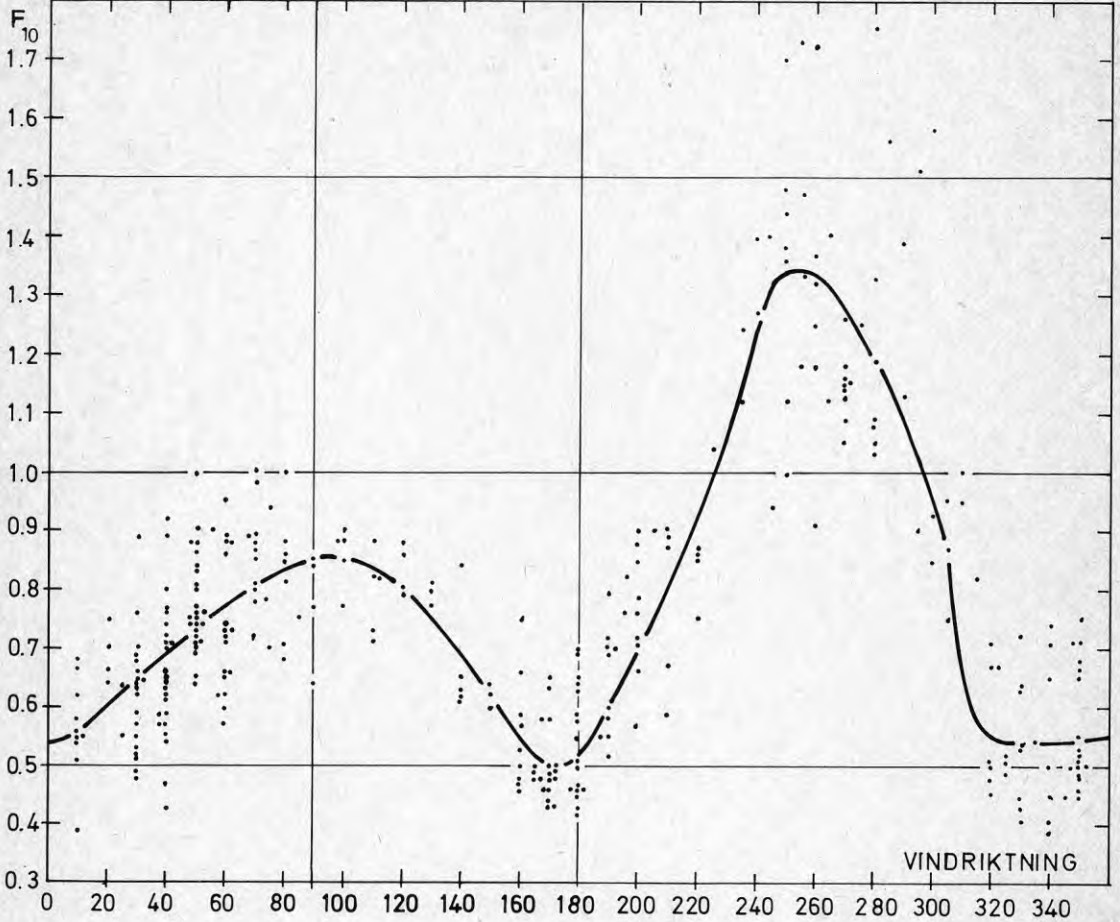


FIG. 6

LÄVERKAN VID OLIKA VINDRIKTINGAR ÄNGBY PUNKT 2 10 m.ö.m.

$$F_{10} = \left(\frac{\bar{u}_{\text{ÄNGBY, P 2}}}{\bar{u}_{\text{ARLANDA}}} \right)_{10 \text{ m.ö.m.}} \quad (\bar{u}_{\text{ARL}} \geq 2 \text{ m/s})$$

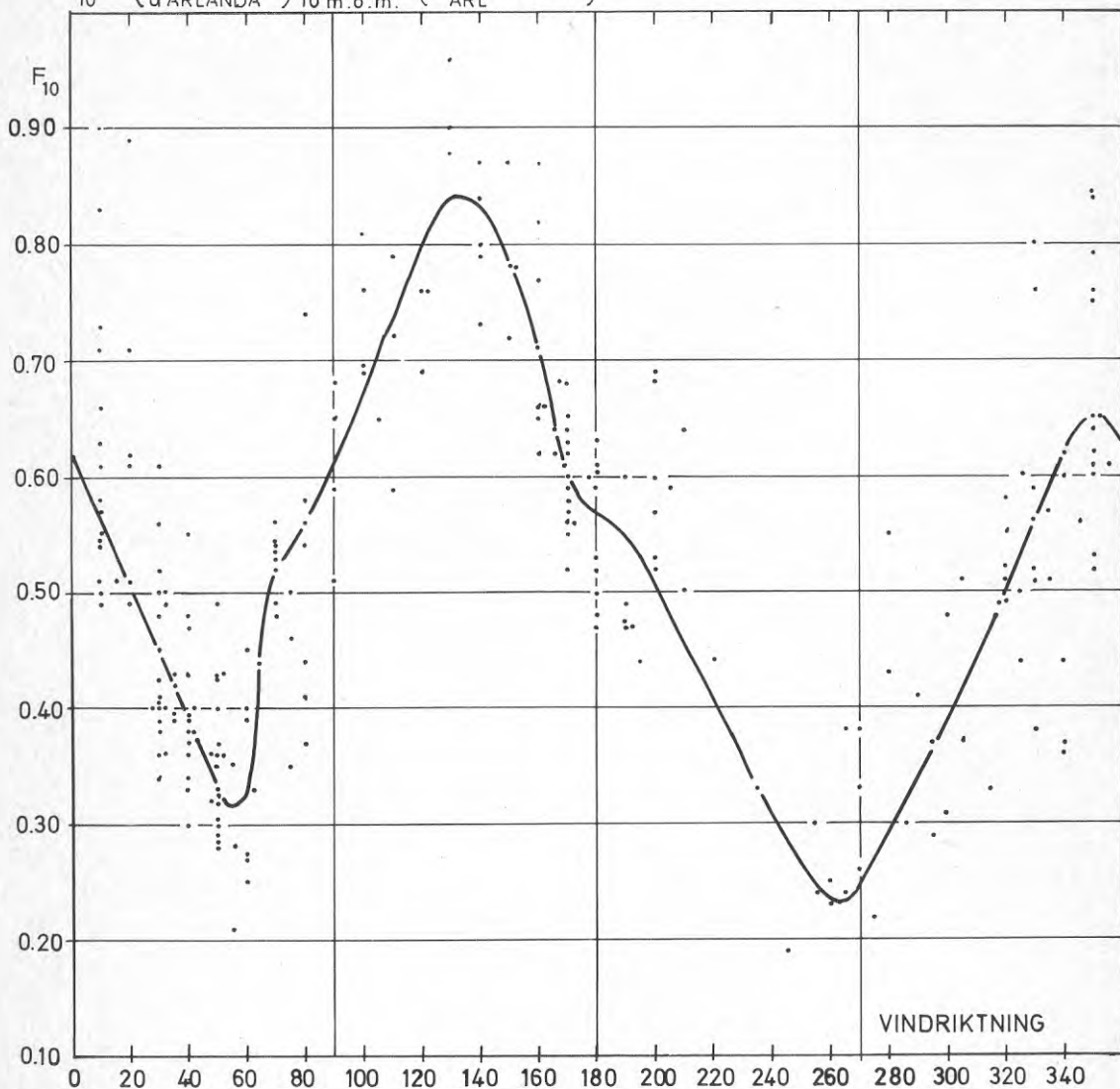
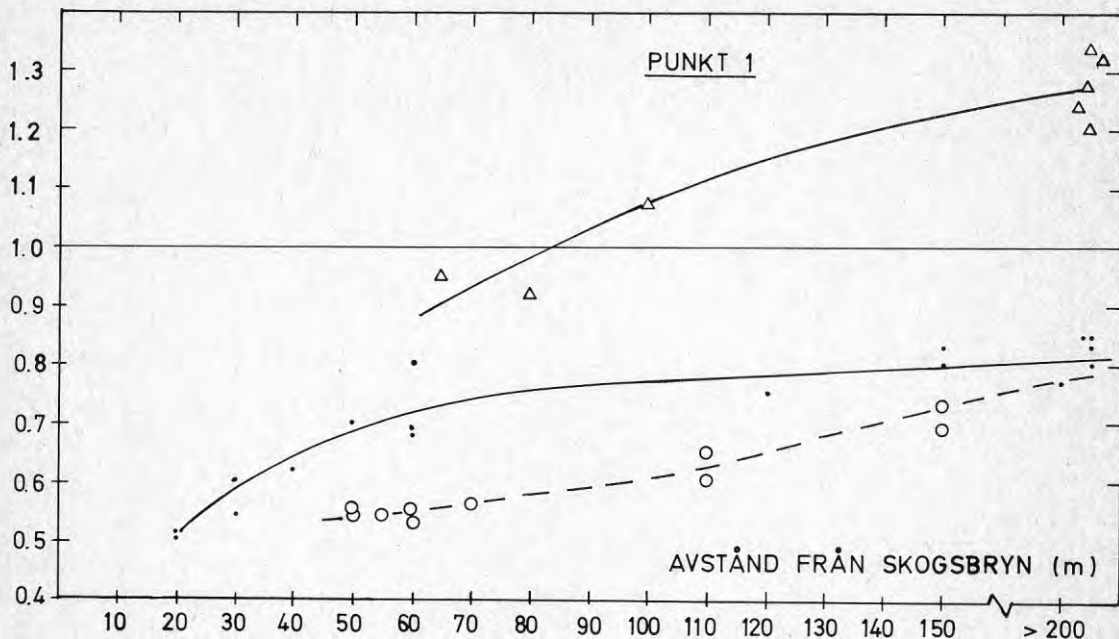


FIG. 7

LÄVERKAN SOM FUNKTION AV TOPOGRAFI OCH AVSTÅND FRÅN SKOG
 ÄNGBY 10 m. ö.m.



- VINDVÄG ÖVER HORISONTELL MARK
- --- --- BERGSHÖJDER
- △ --- --- LÄGRE TERRÄNG
- ⊙ --- --- SKOGSBÄLTE <100 m BRETT

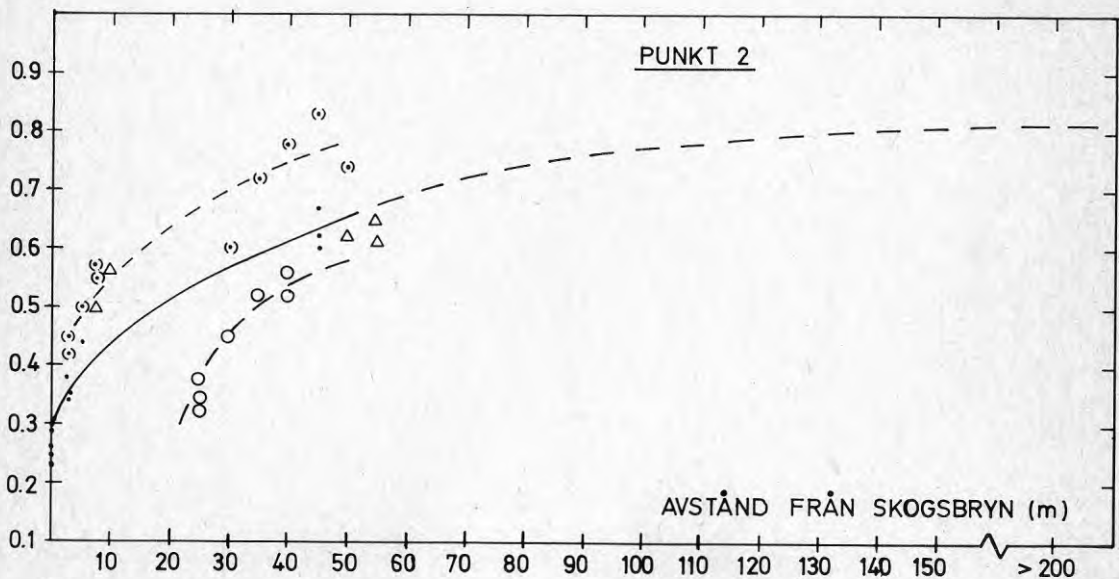


FIG. 8

FÖRHÅLLET MELLAN VINDHASTIGHET 10 m.ö.m.
PUNKT 1 OCH 2 VID OLIKA VINDRIKTNING

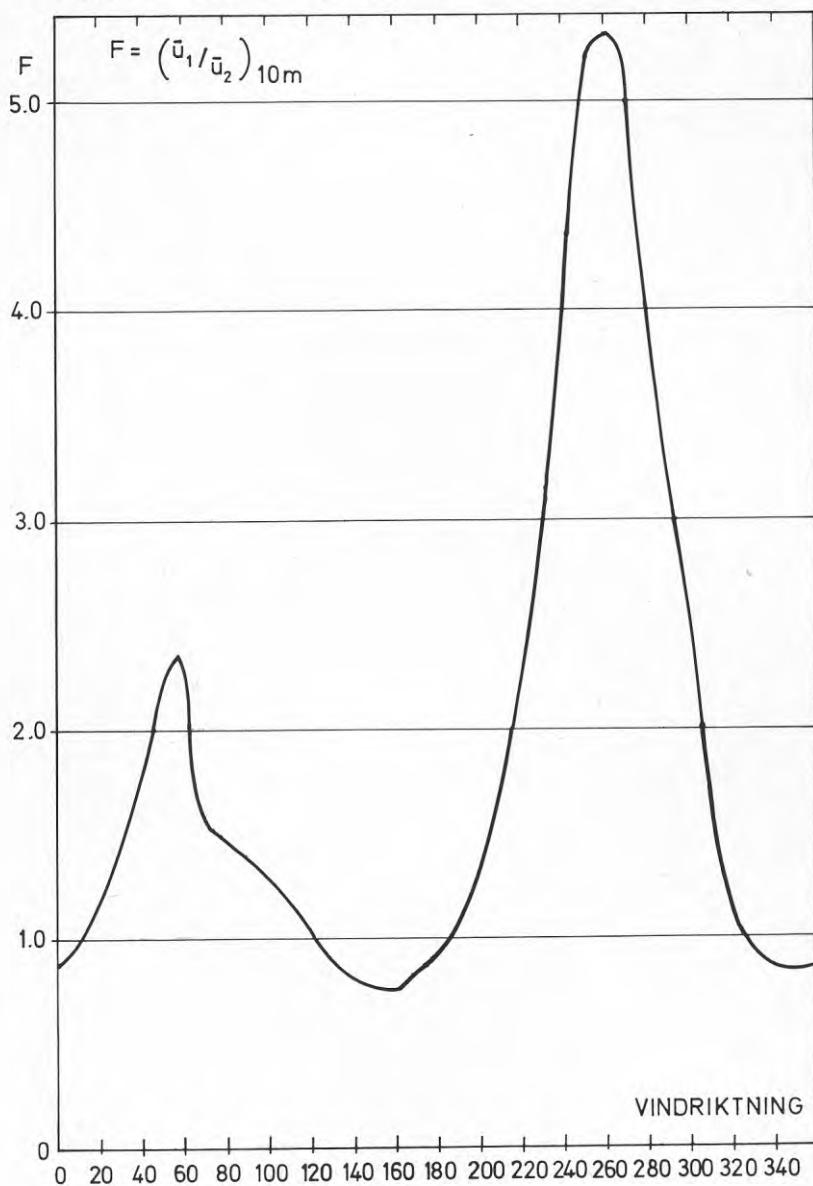


FIG. 9

SAMBAND MELLAN VINDHASTIGHET PÅ 2m OCH 10m.ö.m.

VINDRIKTNINGSSEKTOR: 60-120

ÄNGBY PUNKT 1

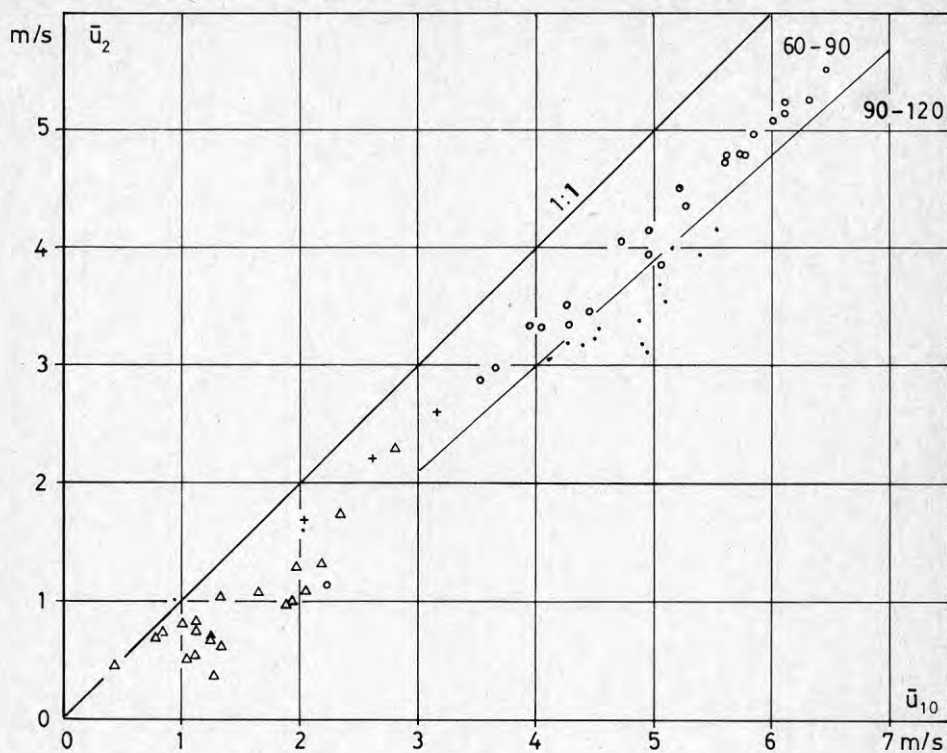
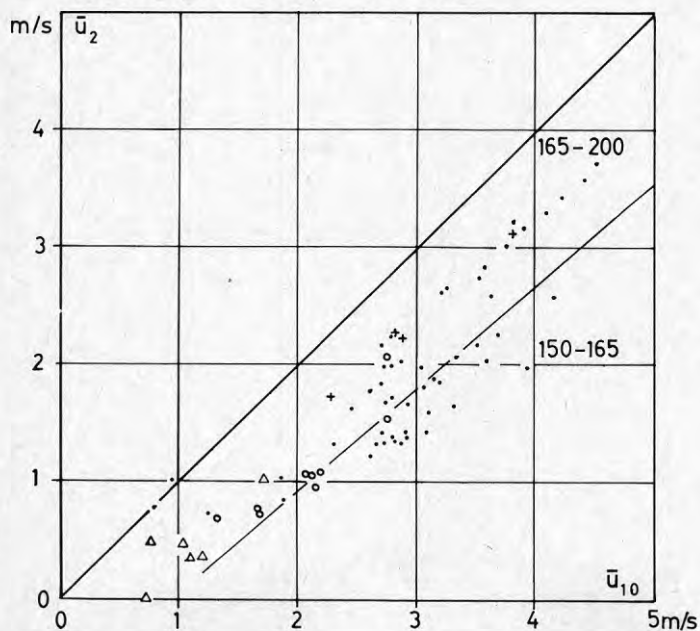


FIG. 10

SAMBAND MELLAN VINDHASTIGHET PÅ 2m OCH 10m.ö.m.

VINDRIKTNINGSSEKTOR: 150-200

STABILITET

- + INSTABIL
- NÄRA NEUTRAL
- o STABIL
- Δ MYCKET STABIL

FIG.11

SAMBAND MELLAN VINDHASTIGHET PÅ 2m OCH 10 m. ö.m, ÄNGBY PUNKT 1
VINDRIKTNINGSSEKTOR: 230-290

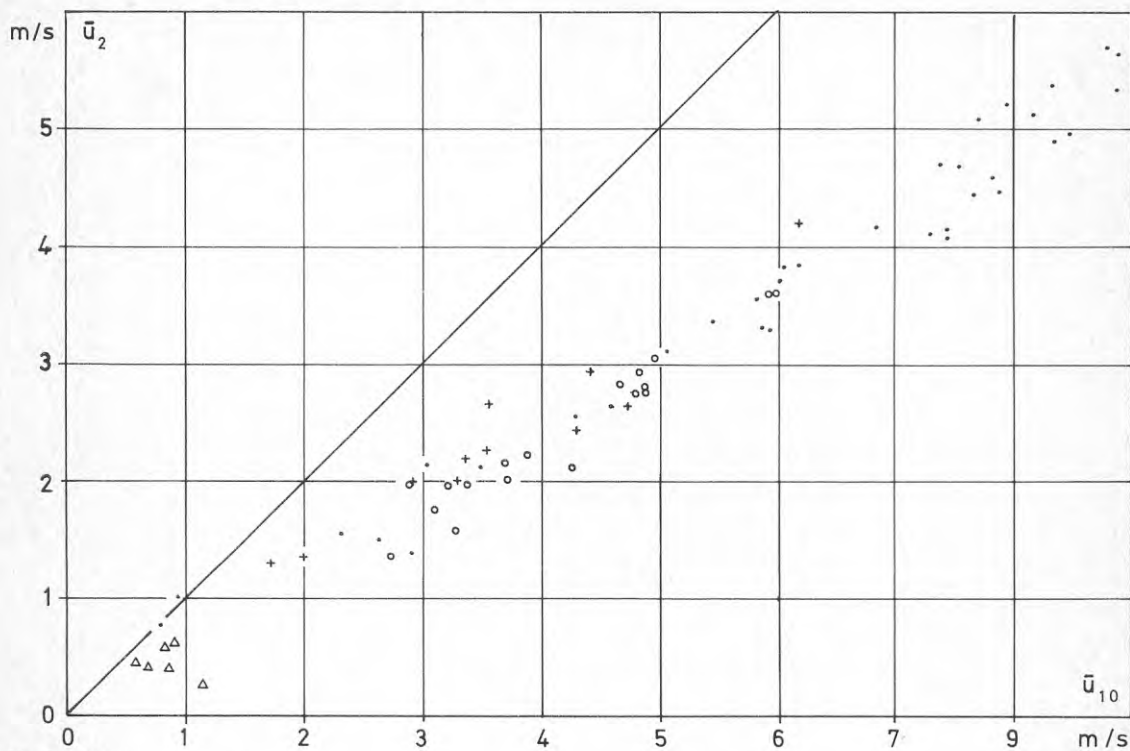
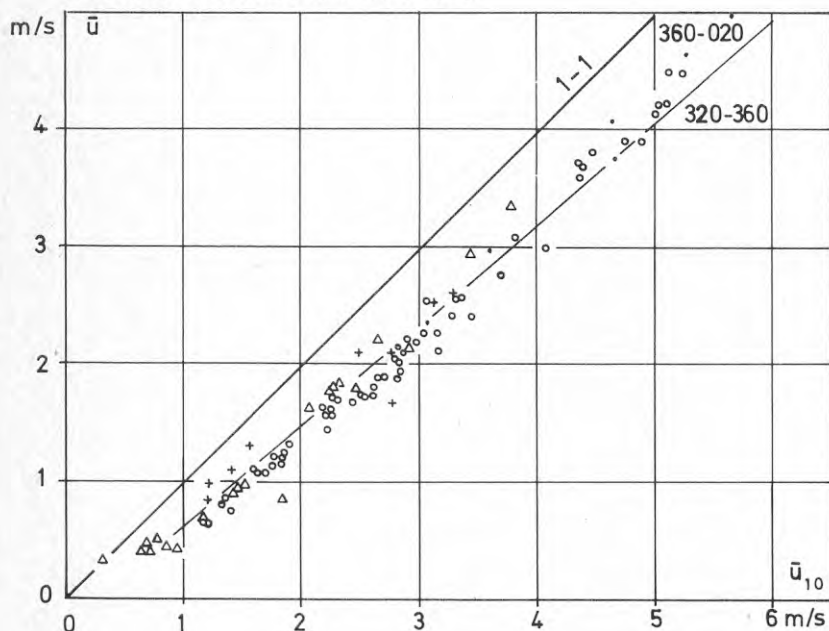


FIG.12

SOM FIG. 11

VINDRIKTNINGSSEKTOR: 320-020

STABILITET

- + INSTABIL
- NÄRA NEUTRAL
- o STABIL
- △ MYCKET STABIL

FIG.13

SAMBAND MELLAN VINDHASTIGHET PÅ 2m OCH 10m.ö.m.
VINDRIKTNINGSSEKTOR 110 - 160° ÅNGBY PUNKT 2

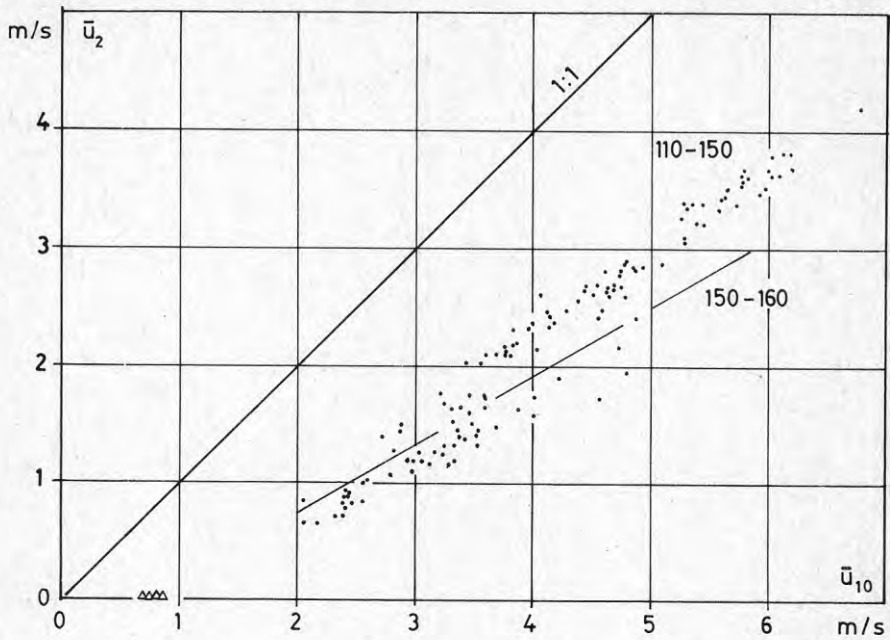


FIG. 14

SOM FIG. 13
VINDRIKTNINGSSEKTOR 320 - 020°

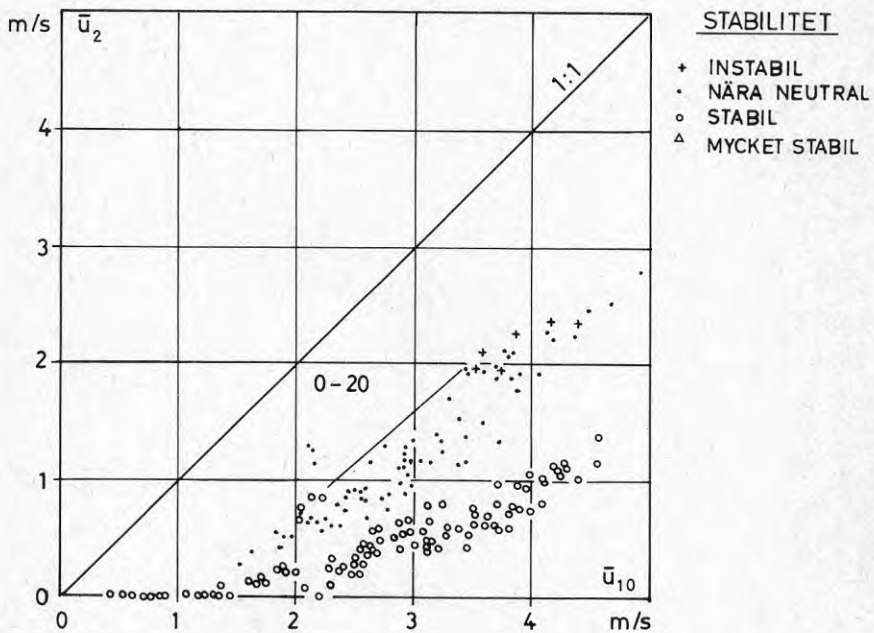


FIG.15

KVOTEN MELLAN VINDHASTIGHET 2 m.ö.m. PÅ VISST AVSTÅND FRÅN SKOG (\bar{u}_2)
 OCH HASTIGHET 10 m.ö.m. VID FRITT BELÄGEN REFERENSSTATION (\bar{u}_A), (\bar{u}_A).

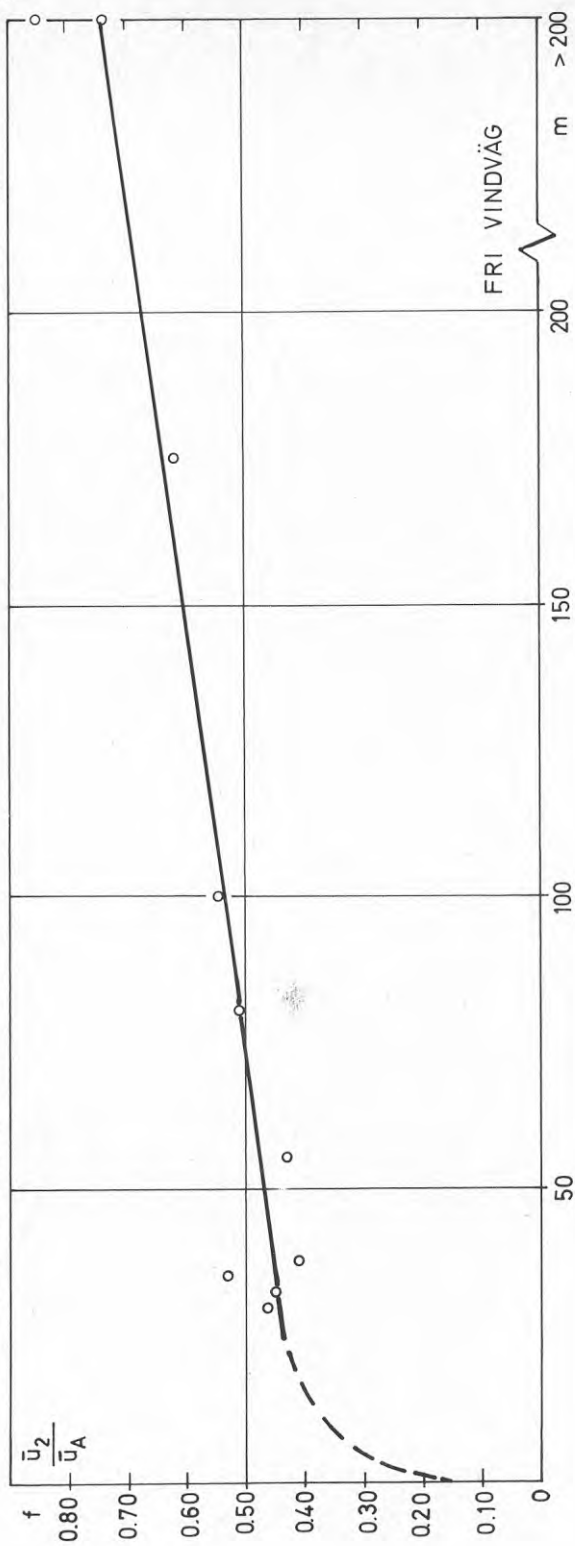


FIG. 16. SNÖDJUPSFÖRDELNING 8.2.1978
 MEDELVÄRDE OCH VARIATIONSINTERVALL AV SNÖTÄCKETS
 DJUP I CM. VÄRDENA REPRESENTERAR YTOR MED SKOGSBE-
 STÅND AV OLIKA TÄTHET ENLIGT FIGUR 1

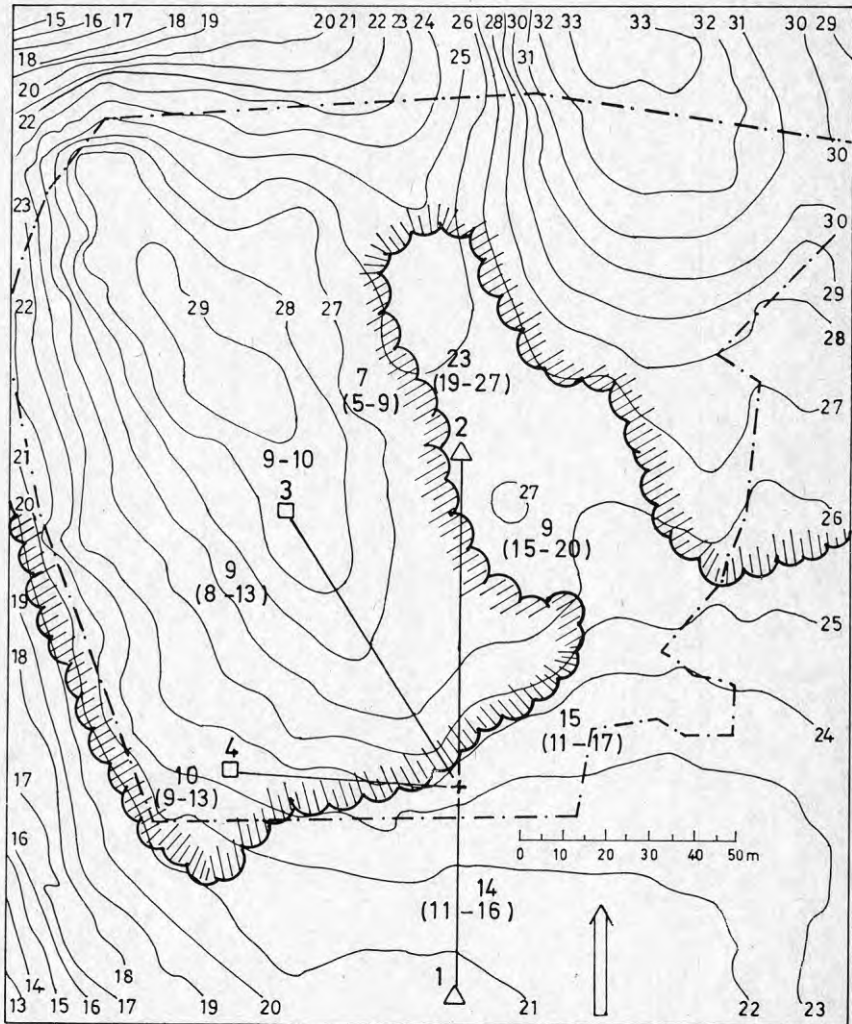


FIG. 17. SNÖDJUPSFÖRDELNING 19.3.1978
 MEDELVÄRDE OCH VARIATIONSINTERVALL AV SNÖTÄCKETS
 DJUP I CM. VÄRDENA REPRESENTERAR YTOR MED SKOGS-
 BESTÅND AV OLIKA TÄTHET ENLIGT FIGUR 1.

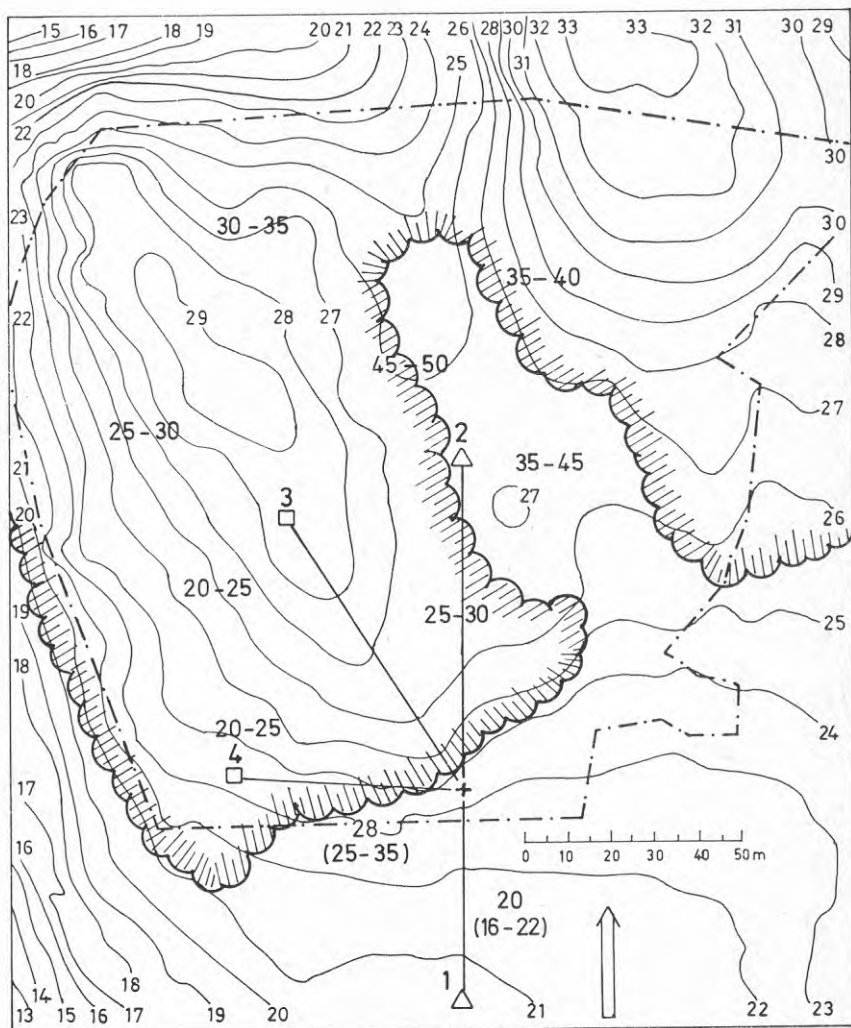
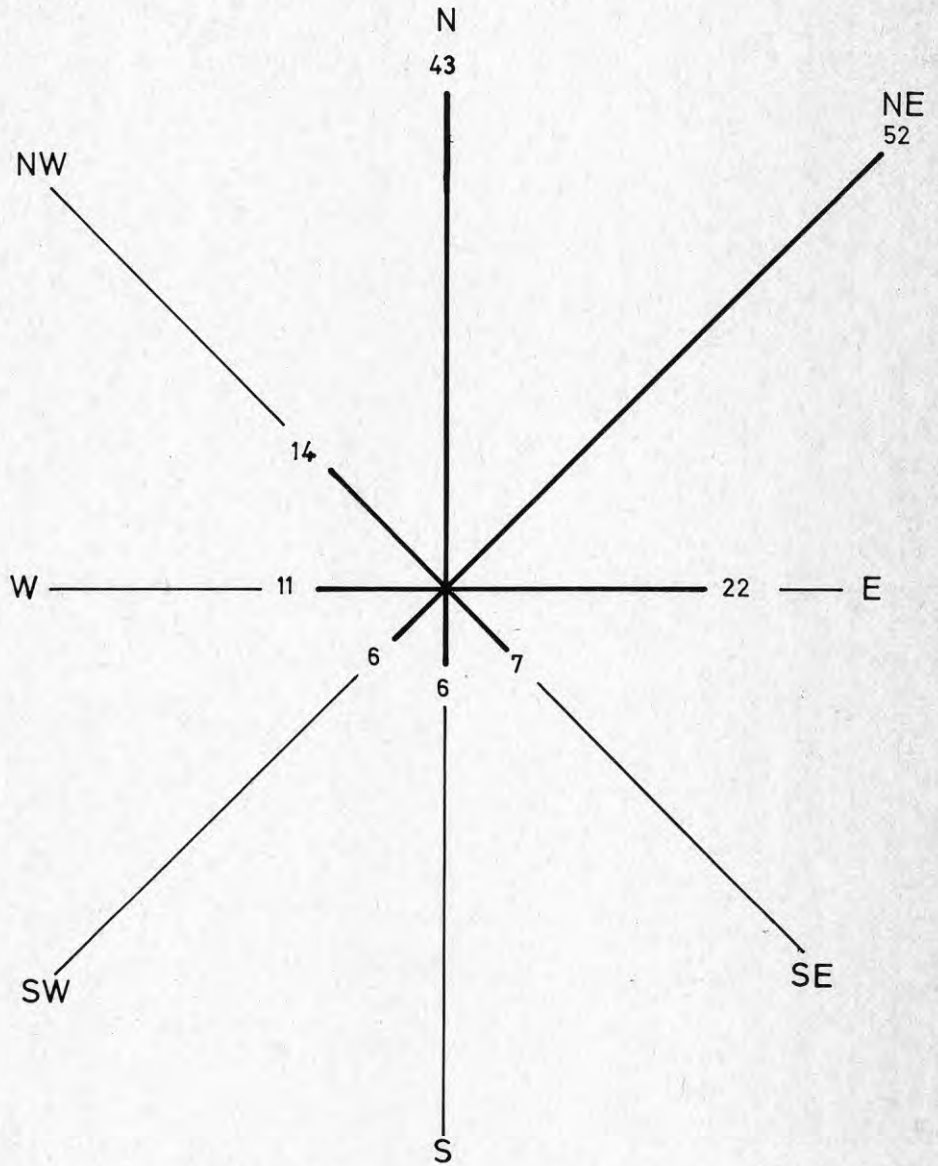


FIG. 18

VINRIKTINGAR VID SNÖFALL, ARLANDA MARS 1978
ANTAL OBSERVATIONER FÖR RESP. VINDRIKTNING
VID SNÖFALL



GLOBALSTRÅLNING (G) OCH NETTOSTRÅLNING (Q_1^*) VID PUNKT 1 (ÖPPEN MARK) SAMT
 NETTOSTRÅLNING (Q_3^*) VID PUNKT 3 (SKOG)

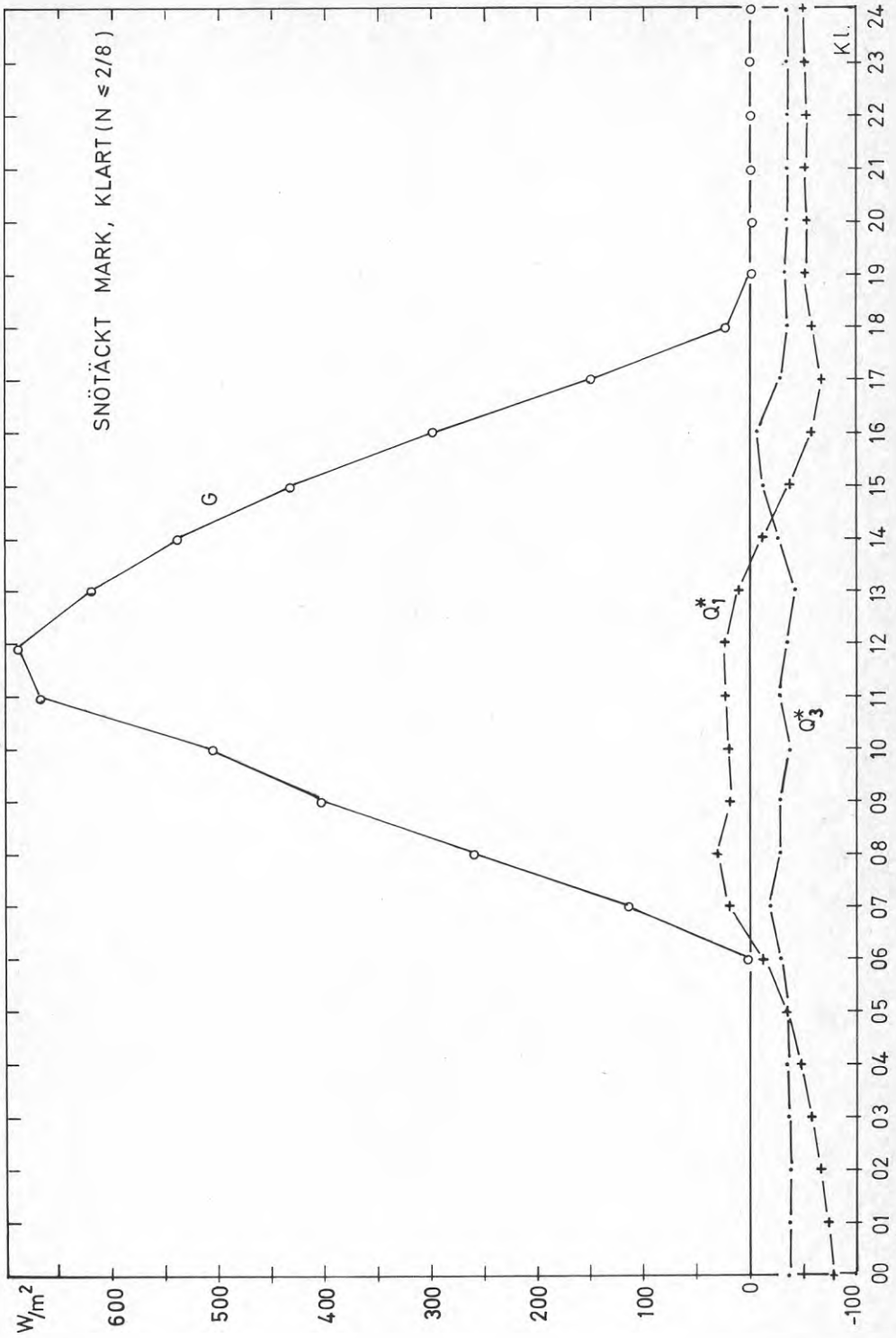


FIG. 20

GLOBALSTRÅLNING (G) OCH NETTOSTRÅLNING (Q_1^*) VID PUNKT 1 (ÖPPEN MARK) SAMT
NETTOSTRÅLNING (Q_3^*) VID PUNKT 3 (SKOG)

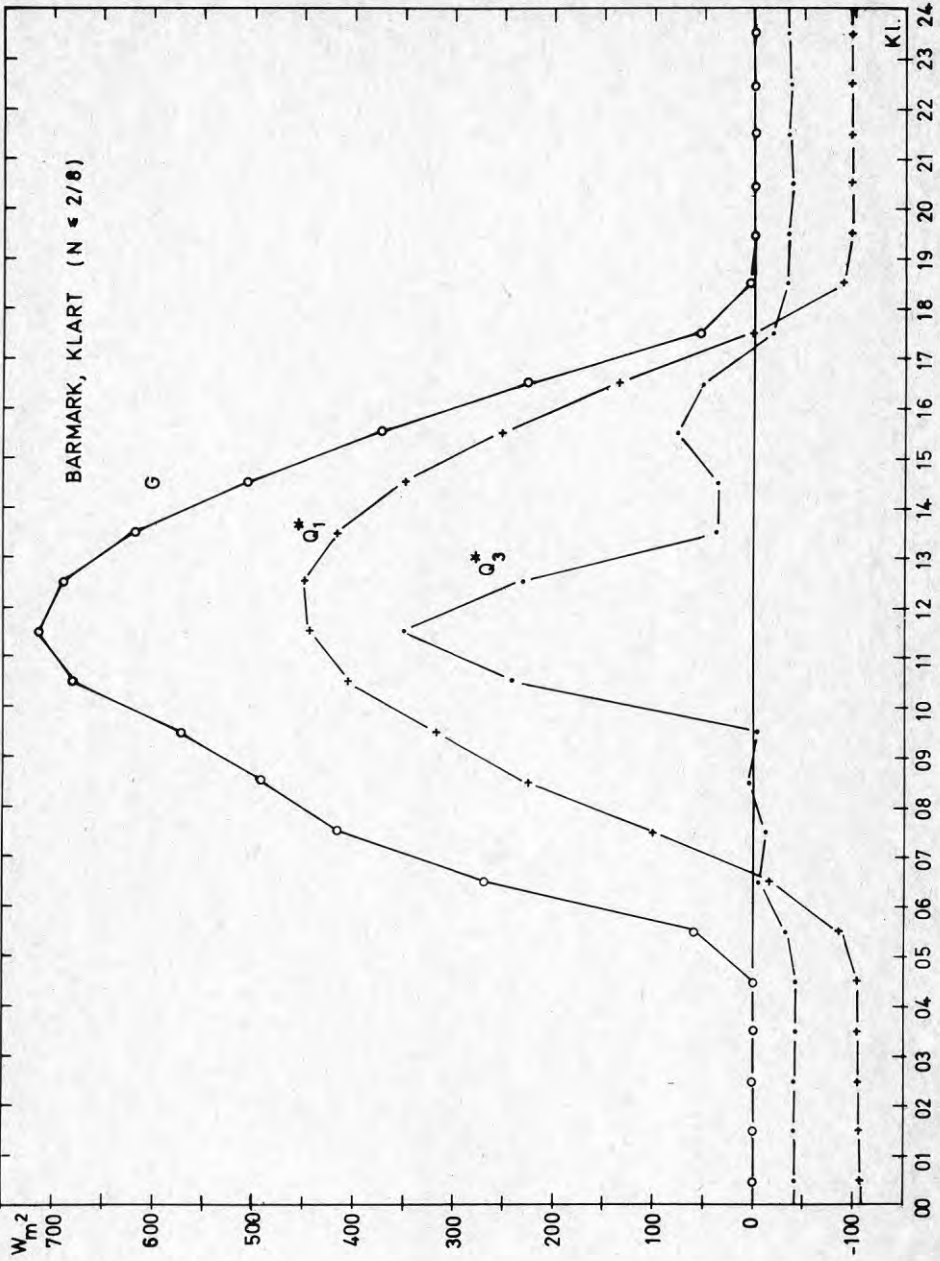


FIG. 21

GLOBALSTRÅLNING (G) OCH NETTOSTRÅLNING (Q_1^*) VID PUNKT 1 SAMT
 NETTOSTRÅLNING (Q_3^*) VID PUNKT 3 (SKOG)

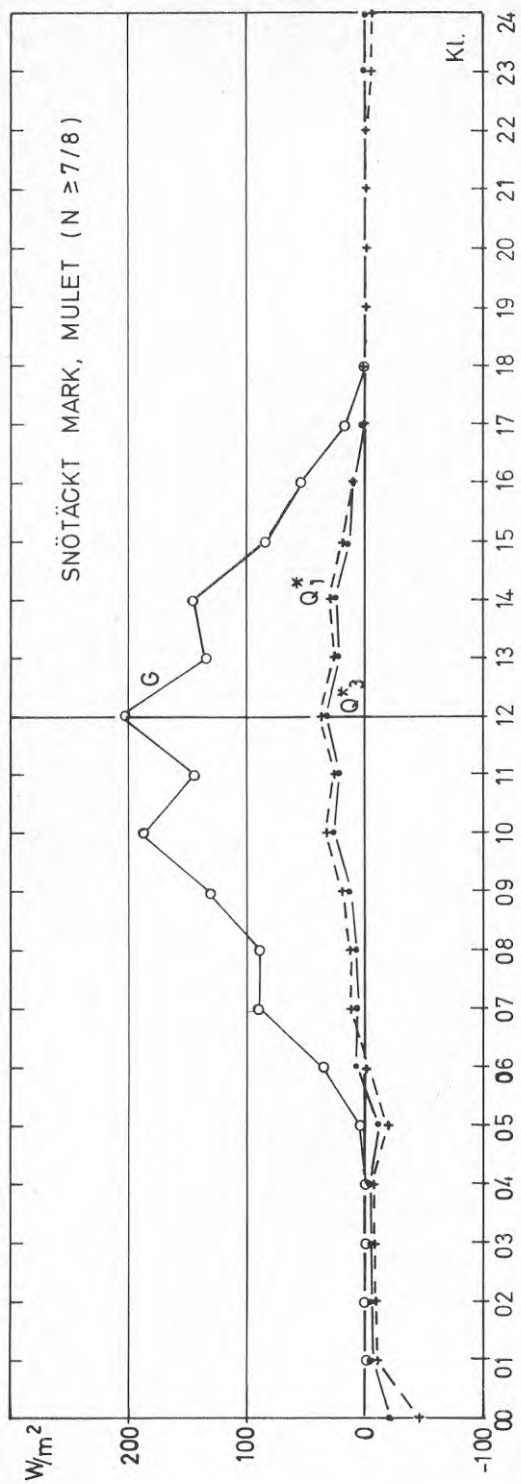


FIG. 22

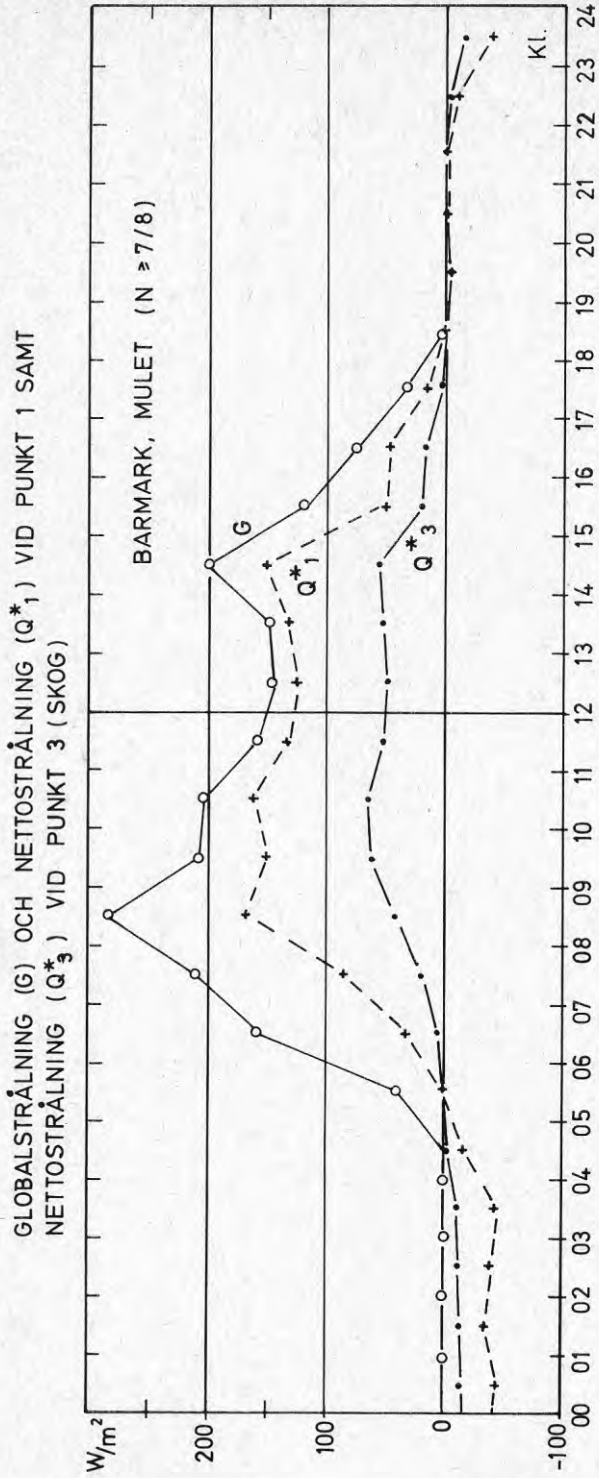


FIG. 23 NETTOSTRÅLNING ÖVER ÖPPEN MARK (PUNKT 1) OCH I SKOG (PUNKT 3) SOM FUNKTION AV GLOBALSTRÅLNING I PUNKT 1 SNÖTÄCKT MARK

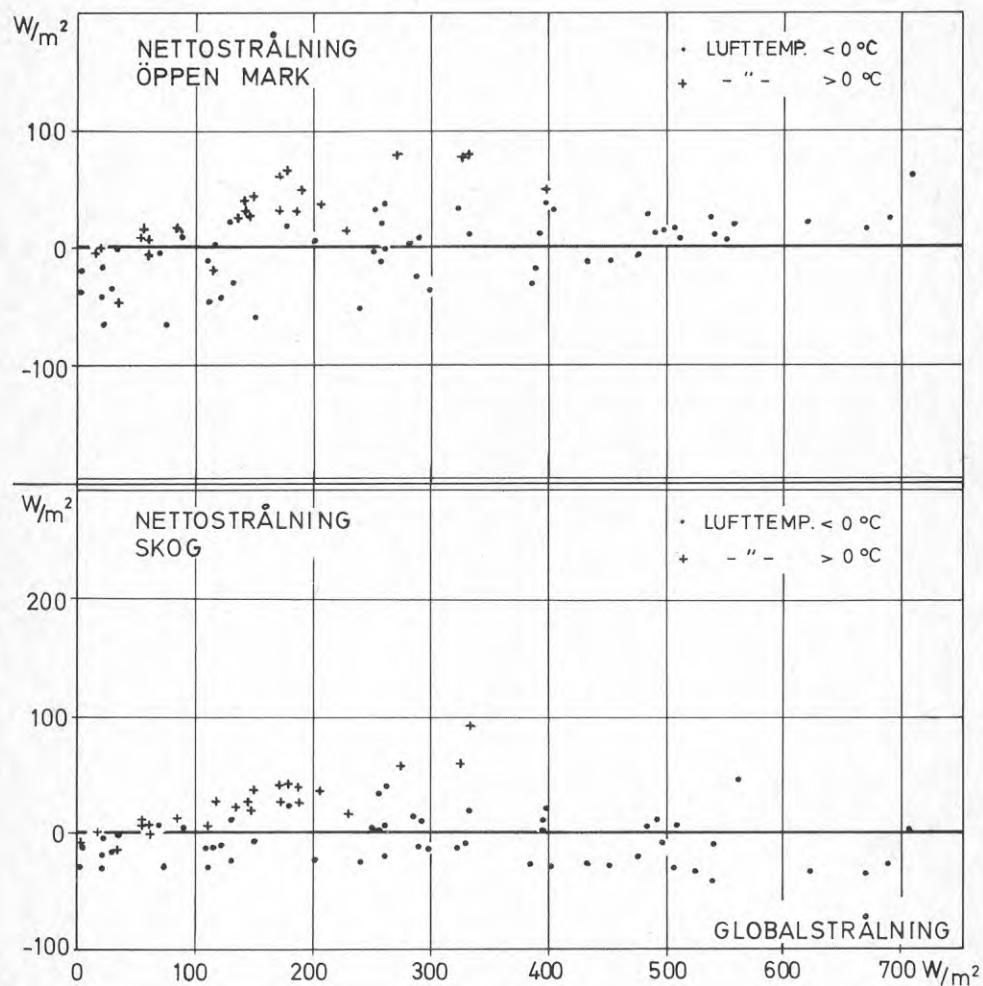


FIG. 24

NETTOSTRÅLNING ÖVER ÖPPEN MARK (PUNKT 1)
 OCH I SKOG (PUNKT 3) SOM FUNKTION AV
 GLOBALSTRÅLNING I PUNKT 1
 BARMARK

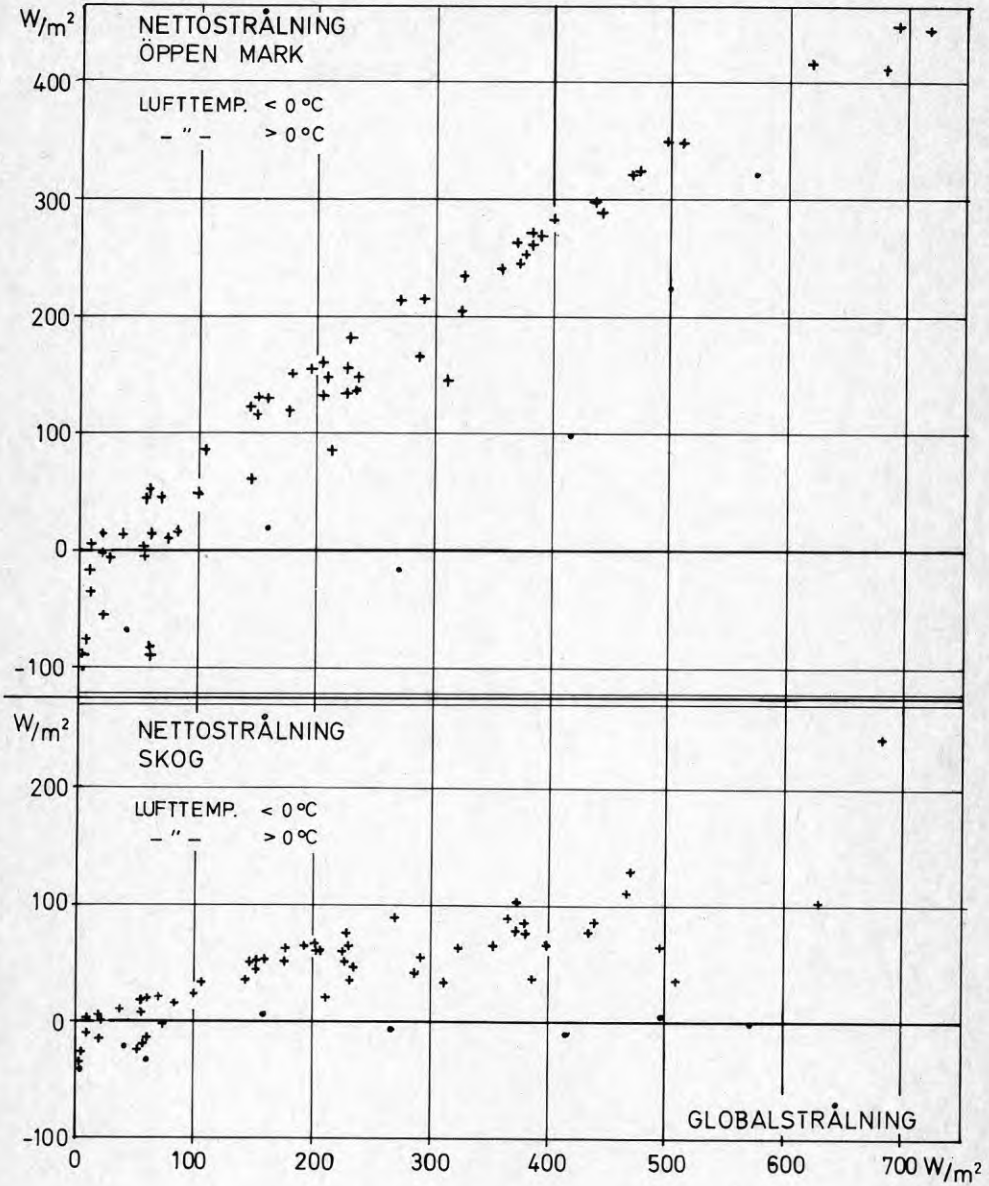


FIG. 25

NETTOSTRÅLNING NATTETID ÖVER ÖPPEN MARK (PUNKT 1)
 OCH I SKOG (PUNKT 3)
 SNÖTÄCKT MARK RESP. BARMARK.

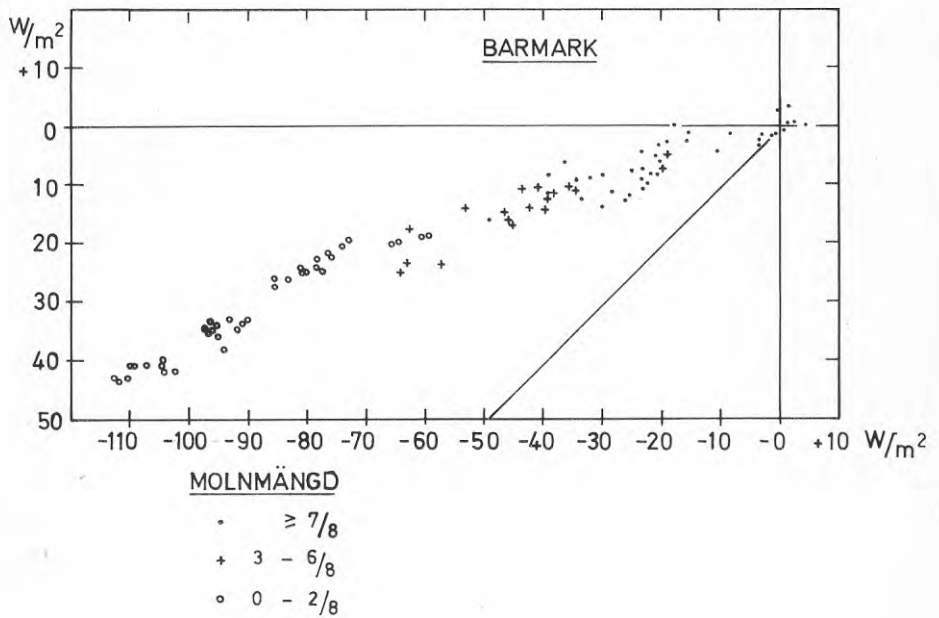
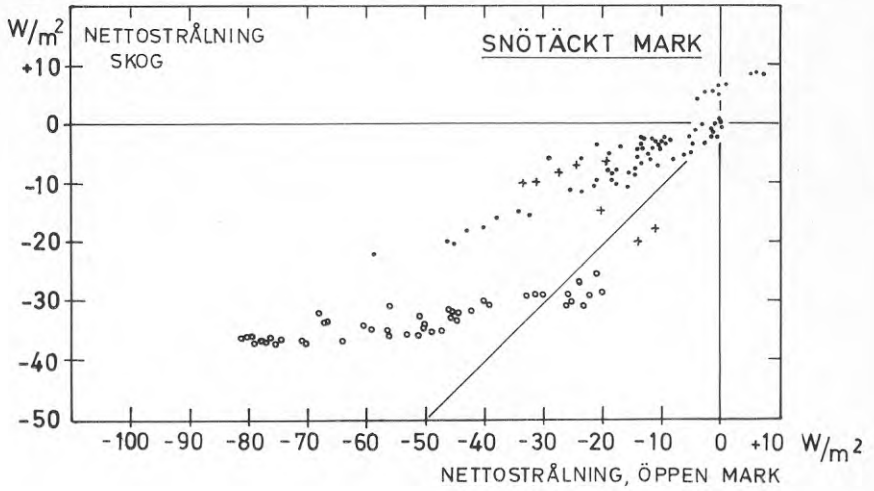


FIG. 26 VÄRMEFLÖDE I MARK, PUNKT 1 OCH 2 VID
SNÖTÄCKE RESPEKTIVE BARMARK PÅ ÖPPEN MARK.

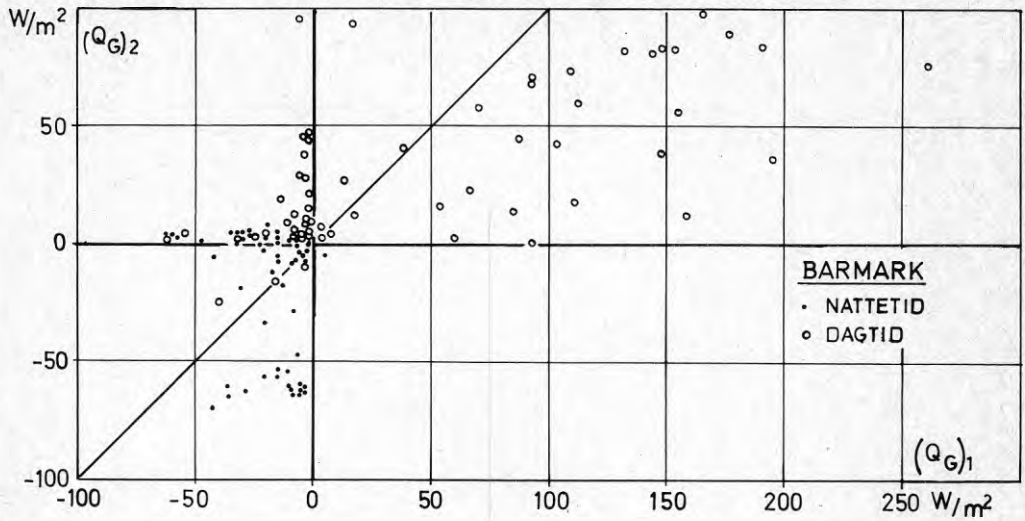
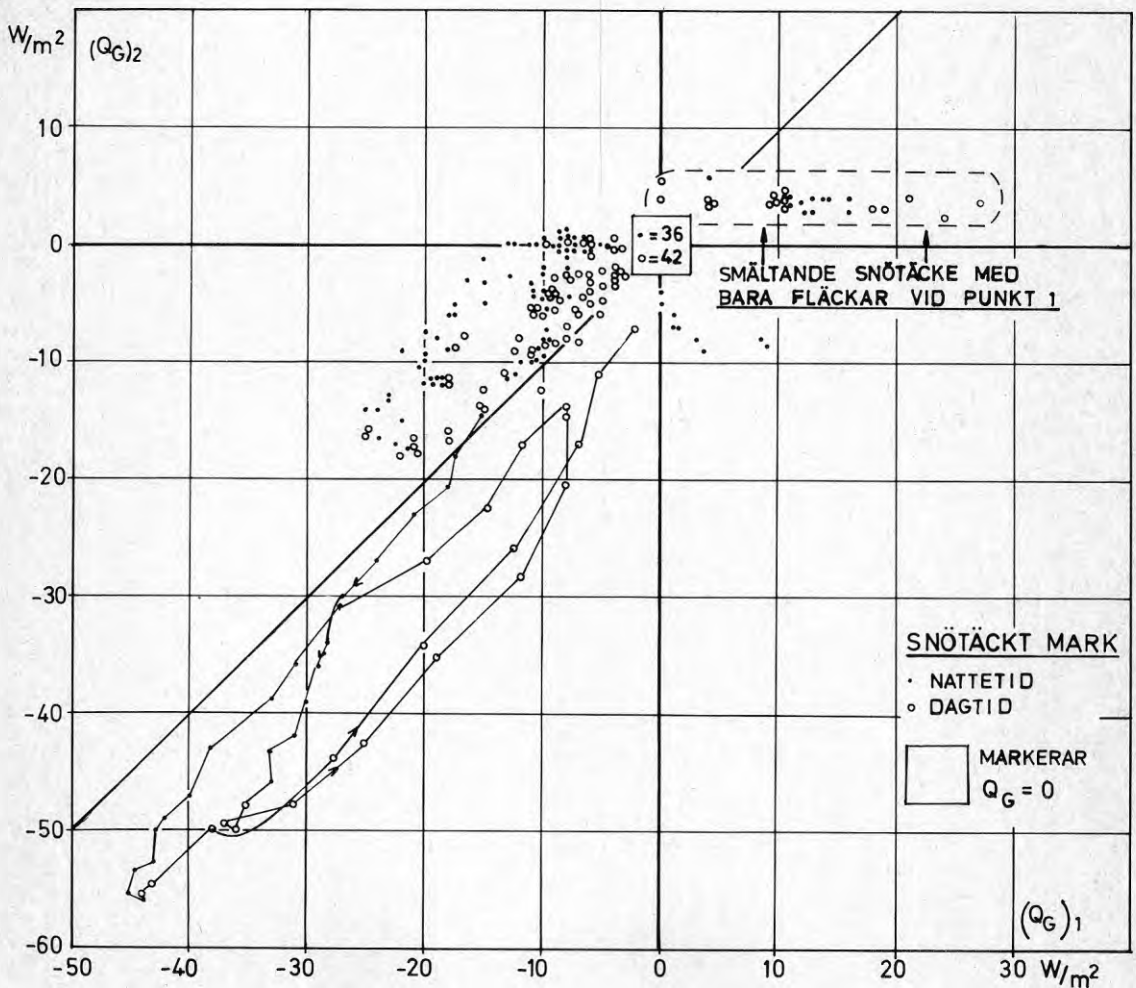
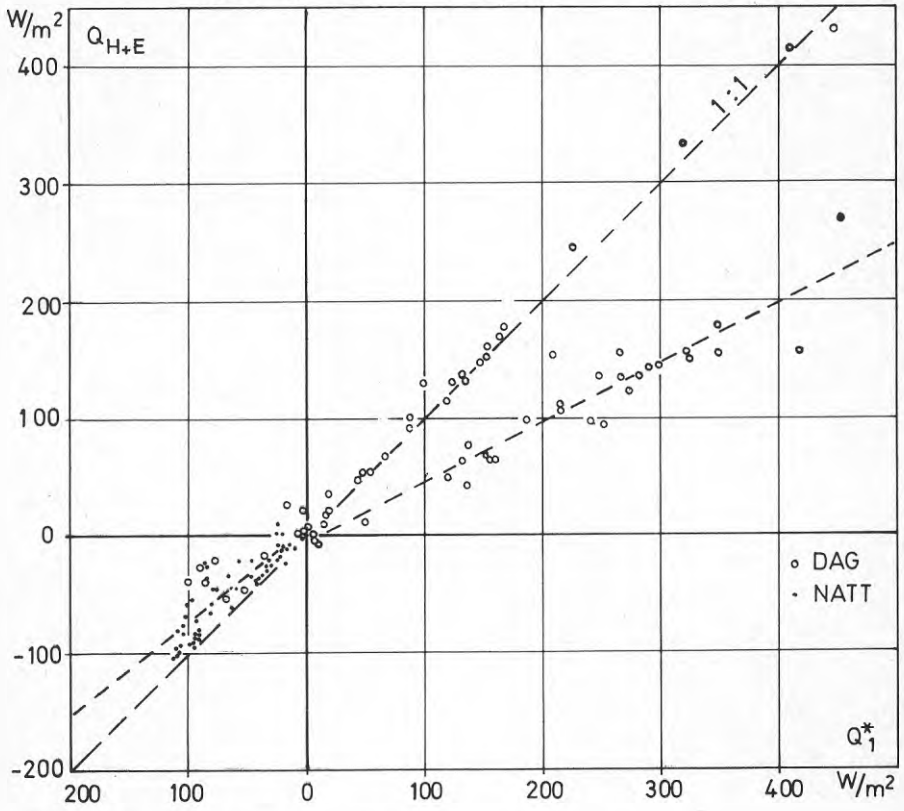


FIG. 27



BERÄKNAT TURBULENT VÄRMEFLÖDE Q_{H+E}
 VID OLIKA NETTOSTRÅLNING
 PUNKT 1, BARMARK



$$Q_1^* > 0 \quad \text{---} \quad Q_{H+E} = 0.51 Q_1^* - 6 ; r^2 = 0.896$$

$$Q_1^* \leq 0 \quad \text{---} \quad Q_{H+E} = 0.80 Q_1^* + 6 ; r^2 = 0.759$$

FIG. 30. ANTAL FALL (1h - mv.) MED VISS TEMPERATURDIFFERENS
I 2m-NIVÅ MELLAN PUNKT 3 OCH PUNKT 1 VID OLIKA TEMPERATUR
ÖVER ÖPPEN MARK.

UNDERSTRUKNA FREKVENSTAL AVSER BARMARK

EJ UNDERSTRUKNA FREKVENSTAL AVSER SNÖTÄCKT MARK

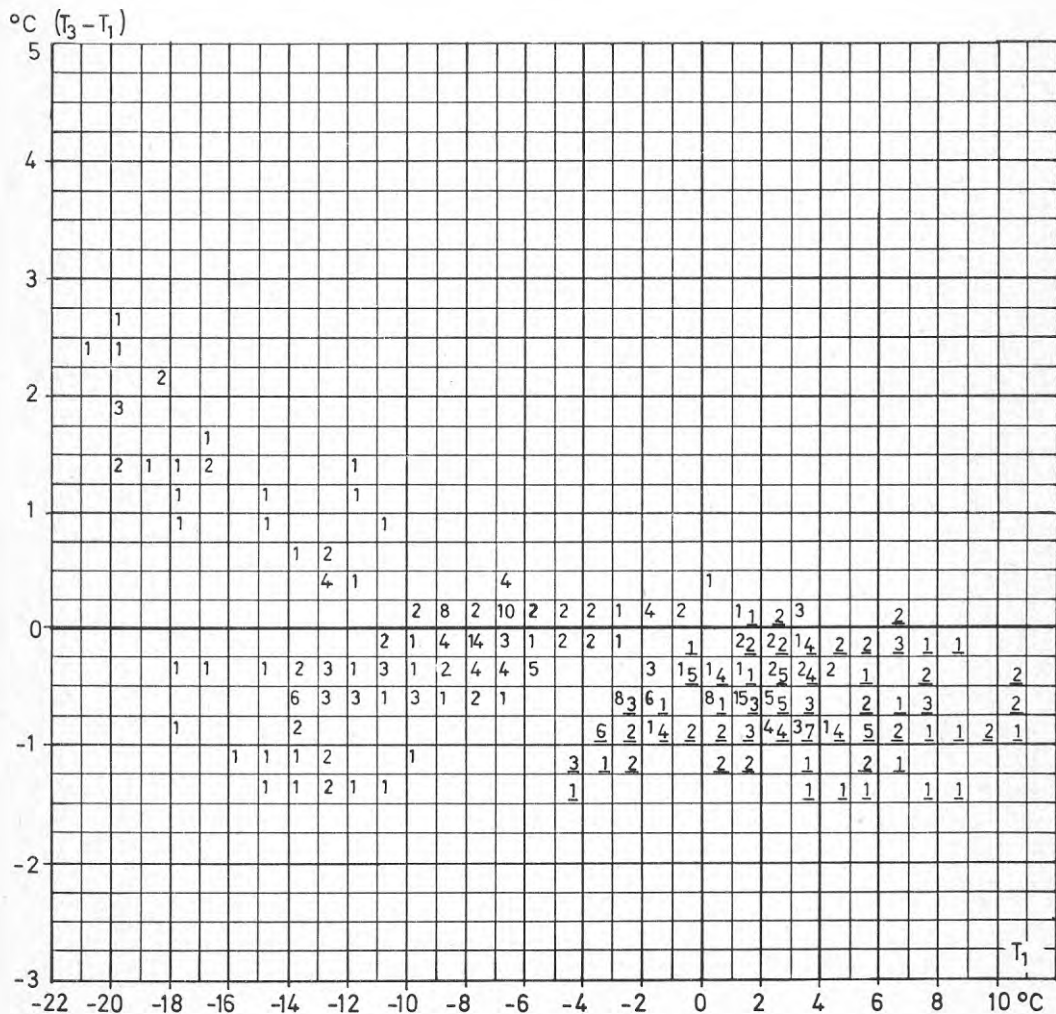
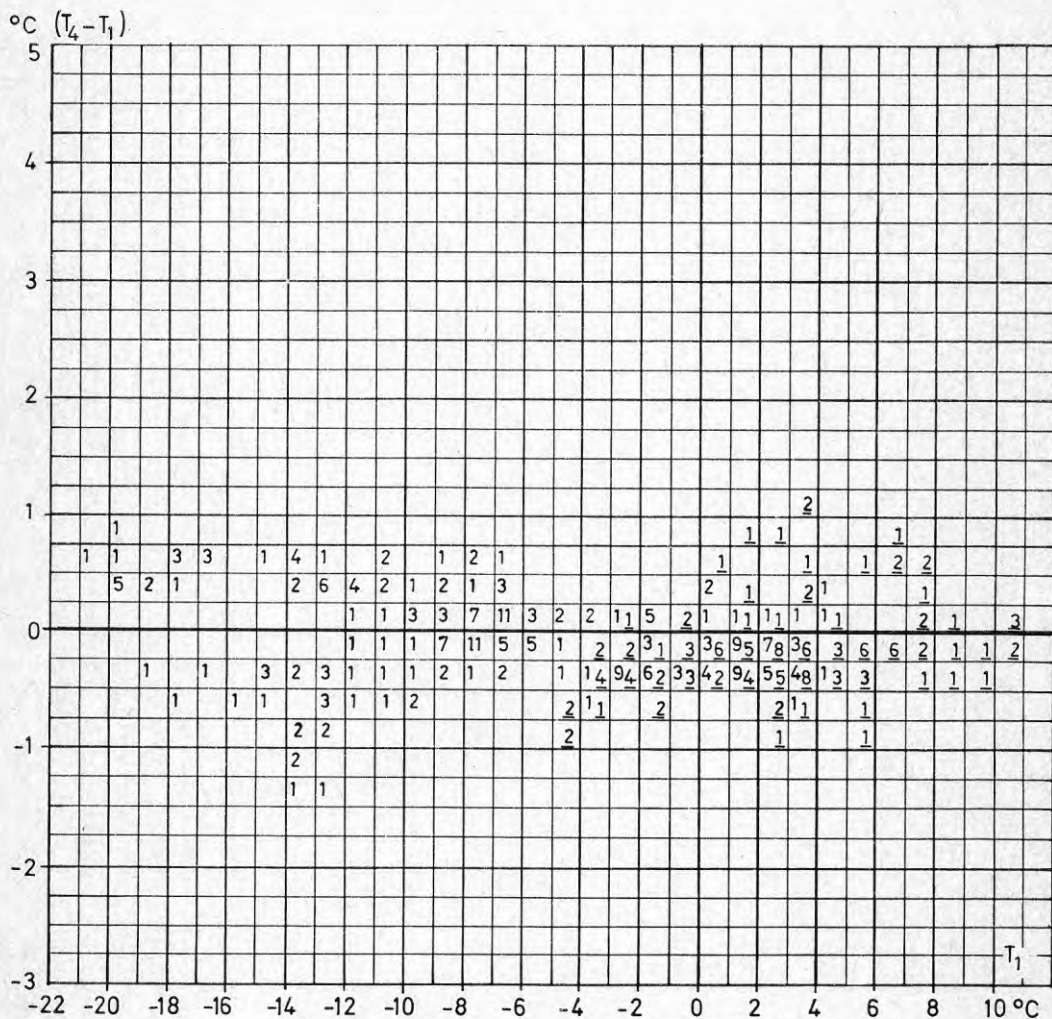


FIG. 31. ANTAL FALL (1h-mv.) MED VISS TEMPERATURDIFFERENS
I 2 m-NIVÅ MELLAN PUNKT 4 OCH PUNKT 1 VID OLIKA TEMPERATUR
ÖVER ÖPPEN MARK.
UNDERSTRUKNA FREKVENSTAL AVSER BARMARK
EJ UNDERSTRUKNA FREKVENSTAL AVSER SNÖTÄCKT MARK



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 771152-4 från
Statens råd för byggnadsforskning till Meteorologiska
institutionen, Uppsala Universitet.**

R110:1978

ISBN 91-540-2950-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6600810

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 1403
111 84 Stockholm**

Cirkapris: 30 kr exkl moms