



SNÖMÄTNING MED FLYGBUREN  
GAMMASPEKTROMETER  
I KULTSJÖNS AVRINNINGSOMRÅDE

Sten Bergström och Maja Brandt

Projektet är finansierat av Vattenregleringsföretagens  
Samarbetsorgan (VASO), Ångermanälvens Vatten-  
regleringsföretag samt Studsvik Energiteknik AB

SMHI ska som statlig myndighet tillgodose samhällets behov av meteorologisk, klimatologisk, hydrologisk och oceanografisk information.

Verksamheten finansieras till cirka 60 procent av statliga anslag och till cirka 40 procent av inkomster från olika offentliga och privata uppdragsgivare.

Uppdrag utförs inom alla SMHI:s verksamhetsområden, såsom

- speciella väderprognoser för olika näringsgrenar, tex kommunikationer, energiproduktion, lantbruk och byggverksamhet samt prognoser för havet
- meteorologiska mätningar och utvärderingar för prospektering av vind- och solenergi och bebyggelseplanering samt dimensionerade värden för havet; byggnation och energiproduktion
- planering och uppbyggnad av automatiska system för mätningar i luft och vatten
- undersökningar och beräkningar av effekter av existerande och planerade utsläpp i luft och vatten
- flödesprognoser för vattendrag och varningar för översvämningar
- undersökningar av vattentillgång och vattenbalansstudier.

Issuing Agency SMHI	Report number 85. 03. 11.	HO 21
5-601 76 NORRKÖPING SWEDEN	Report title BIBLIOTEKET November 1984	
Author(s) Sten Bergström and Maja Brandt		
Title (and Subtitle) Snow mapping by airborne gamma spectrometry in the Kultsjön basin 1984-1985		
Abstract Snow mapping by airborne gamma spectrometry in the Kultsjön basin in northern Sweden during the winter of 1984-1985. i.e. one flight shortly before the beginning of snow accumulation to measure the terrestrial ground activity, and one when the snowpack is at its maximum. The project has showned that		
<p style="text-align: center;"><b>SNÖMÄTNING MED FLYGBUREN GAMMASPEKTROMETER I KULTSJÖNS AVRINNINGSOMRÅDE</b></p> <p style="text-align: right;">Sten Bergström och Maja Brandt</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- the results are sensitive to the variations of the background activity, i.e. the cosmic radiation, airborne radon, the radiation from the airplane and instrument.</li> <li>- the integration length shall be as short as possible. Due to non-linearities the estimated water equivalent of the snowpack drops as the integration length increases.</li> <li>- the repeatability of a flight line when flown twice is good both for the terrestrial ground activity and the winter measurement.</li> <li>- verification of the method is difficult. A conceptual runoff model can provide valuable support to the verification procedure.</li> <li>- verification against conventional snowmeasurement and georadar shows that the gammamethod can not be used for snow mapping in detail, i.e. separate lines shorter than 2 km.</li> <li>- the results must be corrected empirically to give a correct value for the area.</li> <li>- the gammatechnique may - after a few years of measurements - provide a better estimate of the basinwide snowpack than methods based entirely on precipitation measurements. Better springflood forecasts may be expected after winters with unusual areal snowdistribution.</li> </ul>		
Key words Snow-mapping, gamma-ray spectrometry, hydrological forecasting		
Supplementary notes	Number of pages 65	Language Swedish
WSN and title		
Report available from: SMHI tryckeri, Norrköping 1984 av försvarsstaben Flygpliden godkänd för spridning 1984-02-28 Jörgen Nilsson, SMHI Omslagsfoto: Flygpliden godkänd för spridning 1984-02-28		

Issuing Agency SMHI		Report number HO 21	
S-601 76 NORRKÖPING SWEDEN		Report date November 1984	
Author(s) Sten Bergström and Maja Brandt			
Title (and Subtitle) Snow mapping by airborne gamma-ray spectrometry in Kultsjön basin 1980-1984			
Abstract Snow mapping by airborne gamma-ray-spectrometry has been studied in Kultsjön basin in northern Sweden during 1980-1984. The two-flight method has been used, i.e. one flight shortly before the beginning of snow accumulation to measure the terrestrial ground activity, and one when the snowpack is at its maximum. The project has showed that <ul style="list-style-type: none"> <li>- the results are sensitive to the variations of the background activity, i.e. the cosmic radiation, airborne radon, the radiation from the airplane and instrument.</li> <li>- the integration length shall be as short as possible. Due to nonlinearities the estimated water equivalent of the snowpack drops as the integration length increases.</li> <li>- the repeatability of a flight line when flown twice is good both for the terrestrial ground activity and the winter measurement.</li> <li>- verification of the method is difficult. A conceptual runoff model can provide valuable support to the verification procedure.</li> <li>- verification against conventional snowmeasurement and georadar shows that the gammamethod can not be used for snow mapping in detail, i.e. separate lines shorter than 2 km.</li> <li>- the results must be corrected empirically to give a correct value for the area.</li> <li>- the gammatechnique may - after a few years of measurements - provide a better estimate of the basinwide snowpack than methods based entirely on precipitation measurements. Better springflood forecasts may be expected after winters with unusual areal snowdistribution.</li> </ul>			
Key words Snow-mapping, gamma-ray spectrometry, hydrological forecasting			
Supplementary notes		Number of pages 65	Language Swedish
ISSN and title 0282-2601 SMHI HO-rapport			
Report available from: SMHI november 1984. S-601.76 NORRKÖPING SWEDEN			

Omslagsfoto: Flygbild taget väster om Saxnäs, maj 1979.  
Jörgen Nilsson, SMHI  
Flygbilden godkänd för spridning 1984-09-28  
av Försvarsstaben  
SMHIs tryckeri, Norrköping 1984

FÖRORD

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sid.

Snömätning med flygburen gammaspektrometer har utförts under åren 1980-1984 för att studera gammametodens användbarhet för hydrologisk prognosering. Uppläggningsen av projektet diskuterades vid ett WMO-möte i Voss, Norge 1979 och har följts upp vid nordiska expertmöten om snömätning med gammastrålningsteknik i Norrköping 1982 och i Rovaniemi, Finland 1984, samt vid årliga möten tillsammans med Vattenregleringsföretagens samarbetsorgan (VASO). Resultat har successivt redovisats i interna PM (se t ex Brandt, 1983) och vid ett IAHS-symposium i Hamburg augusti 1983 (Bergström och Brandt, 1983). I denna slutrapport har samtliga värden omräknats på grund av att tidigare använd korrektion för bakgrundsstrålningen i luften visat sig vara felaktiga.

Under de första åren finansierades arbetet av Ängermanälvens Vattenregleringsföretag samt Studsvik Energiteknik AB och därefter av Vattenregleringsföretagens Samarbetsorgan.

Följande personer har deltagit i projektet:

- Georg Jonsson (Studsvik Energiteknik AB)
- Ove Landström (" - ) strålningsexpert + projektledare 1979
- Bengt-Herman Forssén (" - ) utveckling av data-program
- Anders Lindén (SGAB)
- Hans Melander (SGAB) författare till avsnitt 1. Beskrivning av gammametoden
- Lennart Krook (SGAB) navigatör
- Peter Ulriksen (LTH) georadarmätningar
- Jörgen Nilsson (SMHI) projektledare 1980-1982
- Sten Bergström (SMHI) " - 1983-1984
- Maja Brandt (SMHI) bearbetning
- Barbro Norlander (SMHI) dataprogram + körningar
- Gun Grahn (SMHI) datakörningar
- Anita Eriksson (SMHI) renskrivning av rapport

Dessutom har ytterligare medarbetare vid SMHI deltagit i diskussioner och bidragit med många synpunkter. Ett varmt tack till alla som bidragit till projektet.

Norrköping i november 1984.

Maja Brandt

Sten Bergström

Report number SMHI		Report date November 1984	
Author(s) Sten Bergström and Maja Brandt		Title (Swedish) Snömätning med flygburen gammastrålningsspektrometri i Norrköping 1980-1984	
Abstract Snow mapping by airborne gamma-ray spectrometry has been studied in Norrköping basin in northern Sweden during 1980-1984. The two-light method has been used, i.e. one flight shortly before the beginning of snow accumulation to measure the terrestrial ground activity, and one when the snowpack is at its maximum. The project has shown that: - the results are sensitive to the variations of the background activity, i.e. the cosmic radiation, airborne radon, the radiation from the alpine and instrument. - the integration length shall be as short as possible. Due to non-linearities the estimated water equivalent of the snowpack drops as the integration length increases. - the repeatability of a flight line when flown twice is good both for the terrestrial ground activity and the winter measurement. - verification of the method is difficult. A conceptual runoff model can provide valuable support to the verification procedure. - verification against conventional snow measurement and georadar shows that the gammamethod can not be used for snow mapping in detail, i.e. separate lines shorter than 2 km. - the results must be corrected empirically to give a correct value for the area. - the gammametric method - after a few years of measurements - provides a better estimate of the statewide snowpack than methods based entirely on precipitation measurements. Better springflood forecasts may be expected after winters with unusual-snow distribution.			
Key words Snow-mapping, gamma-ray spectrometry, hydrological forecasting			
Number of pages 65		Language Swedish	
ISSN and title 0321-3001 SMHI FO-RAPPORT Report evaluation SMHI-88-4881 godkänd för spridning 1984-09-18 nätavdelningen av SMHI tryckeri, Länarkod SMHI			

Snömätning med flyguren gammamätare har utförts under åren 1980-1984 för att studera gammametodens användbarhet för hydrologisk prognosering. Utvärderingen av projektet diskuteras vid ett WMO-möte i Voss, Norge 1978 och har följt upp vid nordiska expertmöten om snömätning med gammamätningsteknik i Norrköping 1982 och i Rovaniemi, Finland 1984, samt vid årliga möten till sammans med Vattenregleringsförbundens samarbetsorgan (VASO). Resultat har successivt redovisats i rapporter PM (se t ex Brandt, 1983) och vid ett IAHN-symposium i Hamburg augusti 1983 (Berström och Brandt, 1983). I denna rapport har samliga värden omräknats på grund av att tidigare använd korrektion för bakgrundstrålningen i lutningen i lutningen visat sig vara felaktiga.

Under de första åren finansierades arbetet av Ågermanstiftelsen. Vattenregleringsförbundet samt Svensk Energiteknik AB och Göteborgs Vattenregleringsförbundens samarbetsorgan.

Följande personer har deltagit i projektet:

Georg Jonsson	(Svensk Energiteknik AB)
Ove Landström	(Svensk Energiteknik AB)
Bengt-Herman Forsén	(Svensk Energiteknik AB)
Anders Lindén	(Svensk Energiteknik AB)
Hans Melander	(Svensk Energiteknik AB)
Lennart Krook	(Svensk Energiteknik AB)
Peter Ulriksson	(Svensk Energiteknik AB)
Jörgen Nilsson	(Svensk Energiteknik AB)
Sten Berström	(Svensk Energiteknik AB)
Maja Brandt	(Svensk Energiteknik AB)
Barbro Norlander	(Svensk Energiteknik AB)
Gun Grann	(Svensk Energiteknik AB)
Anita Eriksson	(Svensk Energiteknik AB)

Desutom har ytterligare medarbetare vid SMHI deltagit i diskussioner och bidragit med många synpunkter. Ett varmt tack till alla som bidragit till projektet.

Norrköping i november 1984.

Maja Brandt  
Sten Berström

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sid.

SAMMANFATTNING	1
1. BESKRIVNING AV GAMMAMETODEN	3
2. TILLÄMPNING AV GAMMAMETODEN I KULTSJÖNS AVRINNINGSMÅN	8
3. KÄNSLIGHETSTESTER AV GAMMAMETODEN	14
3.1 Betydelsen av antalet flyglinjer för det areella medelvärdet	14
3.2 Mätavvikelser mellan olika barmarksflygningar	15
3.3 Mätavvikelser mellan två flygningar i följd	20
4. VERIFIERING AV GAMMAMÄTNINGAR MOT SNÖTAXERINGAR PÅ MARKEN	27
4.1 Jämförelse mellan gammamätningar och konventionell snötaxering med snörör	29
4.2 Jämförelse mellan gammamätningar och snötaxering med georadar	31
4.3 Gammametodens tillförlitlighet vid stora snömängder	39
4.4 Areellt medelvärde av snöns vatteninnehåll	42
5. VERIFIERING AV GAMMAMETODEN MED HJÄLP AV NEDERBÖRD OCH TILLRINNING SAMT HYDROLOGISK MODELLBERÄKNING	44
5.1 Verifiering av gammametoden med hjälp av nederbörds- och hydrologiska mätningar under vintern	44
5.2 Verifiering av gammametoden med hjälp av tillrinning och hydrologisk modellberäkning	46
5.3 Möjligheter att reducera antalet flyglinjer	50
6. STUDIER AV SNÖACKUMULATIONS-MÖNSTRET	55
6.1 Storskalig variation	55
6.2 Snöns höjdberoende	58
7. SLUTSATSER	62
REFERENSER	64

## SAMMANFATTNING

Snömätning med gammastrålningsteknik har utförts i Kultsjöns avrinningsområde i övre Ångermanälven i norra Sverige under åren 1980-1984. Den s k tvåflygningsmetoden har utnyttjats: Den naturliga barmarksstrålningen mäts med flygburen spektrometer längs utvalda flyglinjer på hösten. När snöackumulationen nått sitt maximum på vintern görs en förnyad mätning. Dämpningen i strålning mellan barmarks- och vinterflygningen kan omräknas till snöns vattenvärde.

Kultsjöns avrinningsområde är 1 109 km<sup>2</sup>. Det består till hälften av kalffjäll och har en typisk fjällkaraktär med branta sluttningar ned mot en central del.

Tester och försök under projektets gång visar att:

- resultatet från gammamätningarna är känsliga för bakgrundsstrålningens variation. Bakgrundsstrålningen orsakas av kosmisk strålning, luftburen radon samt flygplanets och instrumentets egenstrålning.
- snöns vattenvärde skall beräknas på korta integrationslängder. Vid ökad intervalllängd minskar medelvärdet för en flyglinje, eftersom partier med bara fläckar och lite snö blir överrepresenterade som följd av att sambandet mellan vattenvärde och gammastrålning inte är linjärt.
- reperterbarheten vid upprepad mätning är god. Detta gäller såväl snömätning som barmarksmätning.
- verifieringen av metoden är svår. Den underlättas om mätverksamheten kompletteras med en hydrologisk modell.
- verifieringen mot snötaxering med snörör och georadar visar att gammamätningarna inte kan användas för detaljstudier, dvs enstaka mätlinjer kortare än ca 2 km.
- resultaten från gammamätningarna i Kultsjön måste, trots det täta nätet, korrigeras empiriskt för att ge ett riktigt värde.

- projektet visar att gammametoden kan - efter några års mätningar
- ge ett bättre arealvärde på snöackumuleringen än de metoder som baserar sig på nederbördsräkning. En förbättring av prognoserna kan förväntas efter vintrar med en sned snöfördelning som inte registreras av det ordinarie nederbördsstationsnätet.

## 1. BESKRIVNING AV GAMMAMETODEN

Naturligt radioaktiva element i jord- och bergarter ger upphov till gammastrålning från markytan. De viktigaste radioaktiva isotoperna är kalium-40, uran-238 och torium-232. Deras koncentration varierar kraftigt, både för bergarter och jordarter. Det finns ett samband mellan bergarters surhet ( $\text{SiO}_2$ -innehåll) och deras gammastrålning. En sur bergart, som t ex granit, kan avge gammastrålning med tiofalt högre intensitet än en basisk bergart, som t ex gabbro.

Övriga strålningskällor i naturen än de tre elementen ovan betraktas vid geologiska arbeten som bakgrund och elimineras ur mätningarna före den slutliga presentationen. Bakgrundsstrålningens viktigaste komponenter är:

1. Kosmisk strålning
2. Egenstrålning från instrument och mätplattform (flygplan)
3. Strålning från luftburen radon

Bakgrunden bestäms genom att mäta över stora sjötor. Den kosmiska strålningens funktion av lufttryck (höjd över havet) kan bestämmas genom mätningar på olika höjder. Bakgrundsstrålningen utgör vanligtvis mindre än 20 % av den totala strålningsnivån på t ex moränmark.

Strålningen från marken dämpas i biomassa och vatten. Dämpningen i biomassa är liten. Vatten i vattendrag, sjöar och myrar dämpar vanligtvis all strålning från underliggande mark. Markfuktigheten påverkar strålningsnivån till en grad som bestäms av tillgänglig porvolym. För bergarter, vars porositet normalt är låg, är påverkan mycket liten, medan den för jordarter är större.

Om markytan täcks av is och snö dämpas strålningen. Det finns ett samband mellan denna dämpning och snötäckets vatteninnehåll. Genom att mäta strålningen från markytan utan och med snötäcke kan snötäckets ekvivalenta vatteninnehåll bestämmas ur ekvation 1 (den s k tvåflygningmetoden). Markfuktigheten förutsätts här lika vid de båda mättillfällena.

$$D = (1/uw) * \ln(Ib/Is) \quad (1)$$

där,

D = snötäckets ekvivalenta vattenvärde

Ib = gammastrålning från barmark

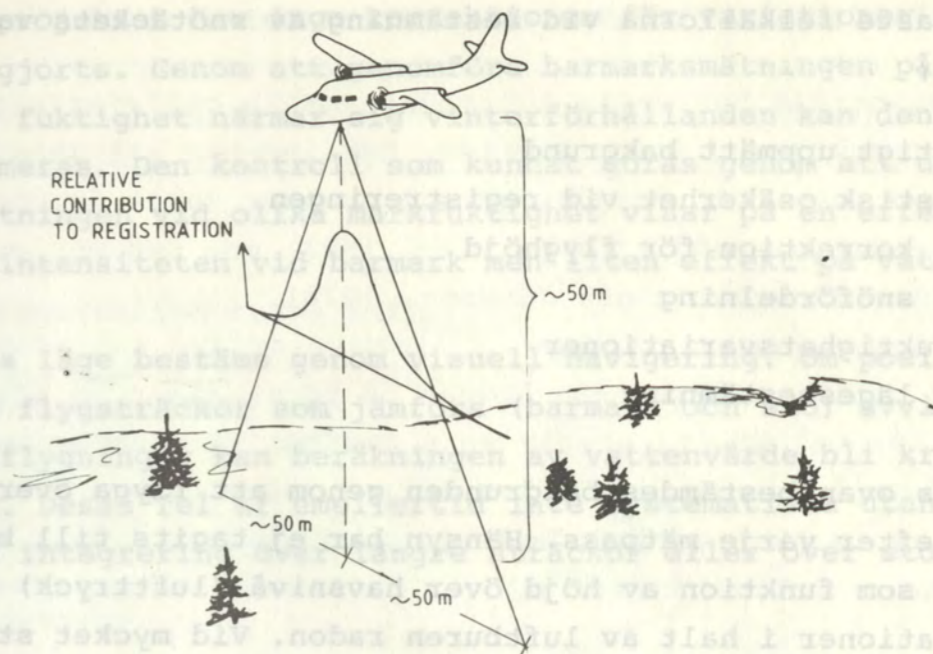
Is = gammastrålning vid snötäcke

uw = linjär absorptionskoefficient för vatten

I detta projekt har gammastrålningen mätts med en flygburen gamma-spektrometer som ägs av SGAB (Sveriges Geologiska AB) och som normalt används vid geologisk prospektering och kartering. Instrumentet är monterat i ett tvåmotorigt flygplan av typ Aero Commander 680E. Det består av en detektorenhet (NaI) med 16,8 liters volym och spektrometer med primärt 256 kanaler.

En sammanslagning har gjorts till 38 kanaler inom energi-intervallet 250-3 000 keV vilket innefattar den totala strålningen från kalium-40, uran-238 samt torium-232. Dessutom registrerade två samlingskanaler 0-250 och 3 000 keV och uppåt. Ett registreringsintervall är 0,3 s vilket approximativt svarar mot 20 meters flygning. Flyghöjd över markyta mäts med radiorhöjdmätare och registreras digitalt på magnetbandet tillsammans med information från spektrometer, klocka och navigationsfixar. Nominell flyghöjd har varit 50 meter, i praktiken vanligtvis mellan 30 och 50 meter. Positionsbestämning har skett genom visuell navigering och med hjälp av fixmarkering vid passage av kända terrängpunkter. Vid den preliminära bearbetningen har alla registreringsintervall tilldelats koordinater i rikets x/y-nät och en konvertering av data till ASCII-format gjorts.

Gammastrålningen uppfångas från ett stråk som är ca 2 flyghöjder. Det innebär att relativa bidraget från centrumlinjen är större än bidraget från randområdet, som visas schematiskt i figur 1. Övergången sker gradvis och någon definitiv gräns för bidraget till strålningen kan inte sättas.



Figur 1. Principskiss av fördelningen av markens relativa bidrag vid mätning av gammastrålning från flygplan

Schematic presentation of the distribution of relative contribution from the ground to the airborne instrument.

Flygstråken har planlagts utifrån kunskaper om områdets geologi, markförhållanden, hydrologi och flygtekniska förhållanden. Strålningen längs flygstråken har mätts vid barkmarksförhållanden på hösten och när snöackumuleringen har nått sitt maximum (månadskiftet mars/april). Bakgrundsstrålningen har mätts genom att flyga stråk över Kultsjön före och efter varje mätpass.

Den linjära absorptionskoefficienten för vatten (snö) som krävs vid beräkning av det ekvivalenta vattenvärdet bestämdes i projektets inledning experimentellt genom att flyga över normal och homogen mark på ett flertal höjder. Absorptionen i luft kan i det aktuella energiintervallet (400-3 000 keV) likställas med den i vatten. Vid beräkning av vattenvärde längs en flyglinje måste strålningen integreras över en viss flygsträcka för att erhålla tillräcklig statistisk noggrannhet. En rullande medelvärdesbildning har använts med integrationslängderna 200, 1 000 och 2 000 meter.



De viktigaste felkällorna vid bestämning av snötäckets vattenekvivalent är:

1. Felaktigt uppmätt bakgrund
2. Statistisk osäkerhet vid registreringen
3. Fel i korrektion för flyghöjd
4. Ojämn snöfördelning
5. Markfuktighetsvariationer
6. Fel i lägesbestämning

Som nämnts ovan bestämdes bakgrunden genom att flyga över Kultsjön före och efter varje mätpass. Hänsyn har ej tagits till bakgrundens variation som funktion av höjd över havsnivå (lufttryck) ej heller till variationer i halt av luftburen radon. Vid mycket stora ekvivalenta vattenvärden torde en bättre noggrannhet kunna uppnås genom att göra en mer sofistikerad korrektion för bakgrundsstrålningen, vilken skulle innefatta den variation som är en funktion av lufttryck på mätsträckan. Bestämning av luftburen radon är vanskelig. Genom att eliminera uranstrålning från det uppmätta spektrumet kan en av radonhalt oberoende bestämning göras.

Den statistiska osäkerheten ökar vid ökande ekvivalent vattenvärde, ökande flyghöjd, minskande markstrålning, ökande bakgrundsstrålning, mindre kristallvolym, ökande flyghastighet och kortare integrationsstider. Osäkerheten kompenseras enklast genom att öka integrationslängden.

Flyghöjden bestämdes med radiohöjdmätare. Konstant lufttryck förutsattes. Genom att noggrannare "väga" den luftpelare som ligger mellan flygplan och markyta kan sannolikt en något bättre noggrannhet uppnås.

Snöfördelningen är alltid ojämn p g a markens ojämnheter och vindens modulerande effekt på snötäcket. En ojämn snöfördelning ger, p g a att dämpningen inte är linjär, en underskattning av snötäckets ekvivalenta vattenvärde. En kortare mätsträcka och en så låg flyghöjd som möjligt minskar felet, samtidigt som den statistiska osäkerheten ökar.

I det här projektet har inga korrektioner för variationer i markfuktighet gjorts. Genom att genomföra barmarksmätningen på hösten då markens fuktighet närmar sig vinterförhållanden kan denna felkälla minimeras. Den kontroll som kunnat göras genom att upprepa barmarksmätningen vid olika markfuktighet visar på en effekt på strålningsintensiteten vid barmark men liten effekt på vattenvärde.

Flygplanets läge bestäms genom visuell navigering. Om positionen för de två flygsträckor som jämförs (barmark och snö) avviker p g a snedflygningar kan beräkningen av vattenvärde bli kraftigt varierande. Dessa fel är emellertid inte systematiska utan utjämnas vid integrering över längre sträckor eller över stora ytor.

Om det areella medelvärdet önskas bestämt med högre precision än vad som varit möjligt i det här projektet bör man överväga följande åtgärder:

1. En bättre korrektion för bakgrunden som innefattar lufttrycksberoende och radonstörningar.
2. En bättre bestämning av dämpningen i luften mellan flygplan och snötäcke.
3. En noggrannare bestämning av absorptionskoefficienten och dess energiberoende.

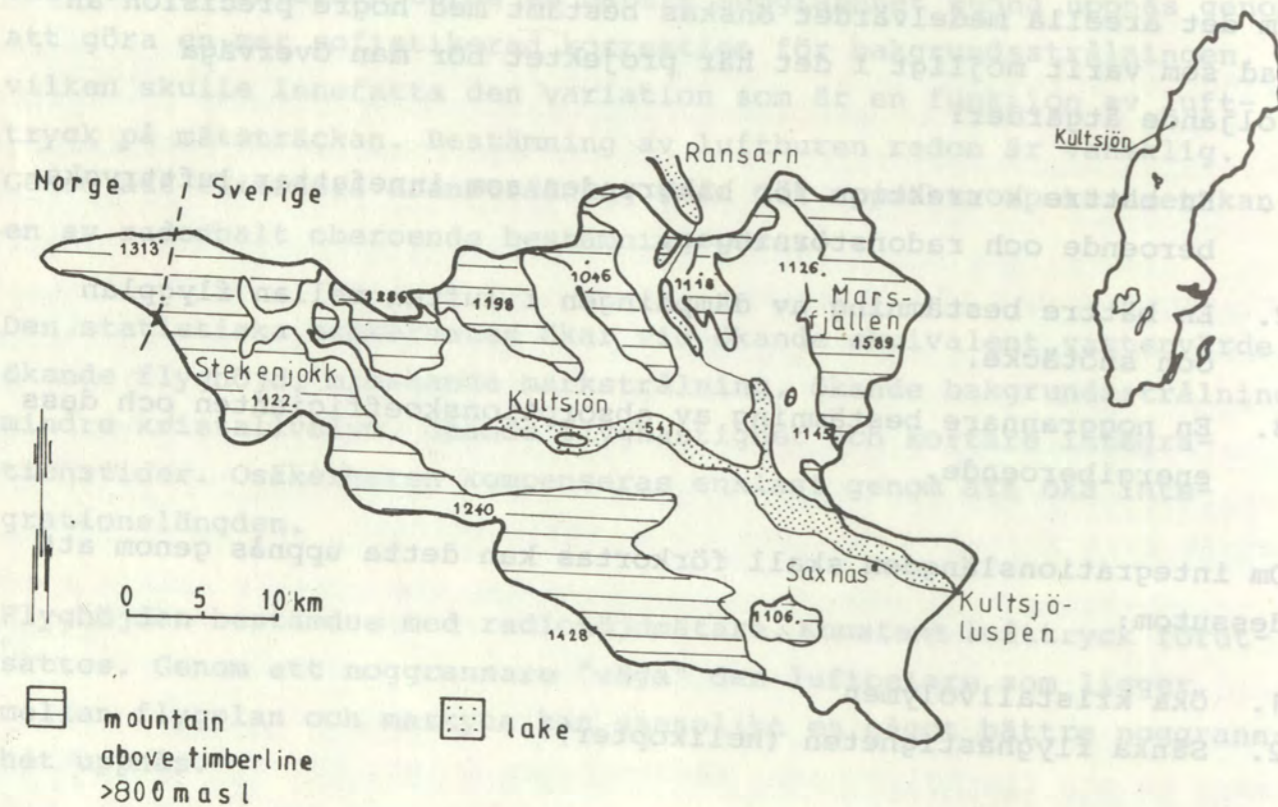
Om integrationslängden skall förkortas kan detta uppnås genom att dessutom:

1. Öka kristallvolymen
2. Sänka flyghastigheten (helikopter)

## 2. TILLÄMPNING AV GAMMAMETODEN I KULTSJÖNS AVRINNINGSSOMRÅDE

Som försöksområde har valts Kultsjöns lokala tillrinningsområde i övre Ångermanälven i norra Sverige. Det innebär att Ransarns område räknas bort. För området görs prognoser varje år med såväl en enkel regressionsmetod (Häggström, 1982) som den mer avancerade HBV-modellen (Bergström och Jönsson, 1976).

Kultsjöns tillrinningsområde ligger på östra sidan av fjällkedjan. Det är 1 109 km<sup>2</sup> stort, består av 6 % sjöar, 6 % myrar och 51 % kalfjäll. Höjdintervallet är 540 till 1 580 m ö h. I figur 2 återfinns en karta över området med 800 m höjdkurvan inlagd som ungefär motsvarar gräns för kalfjäll.

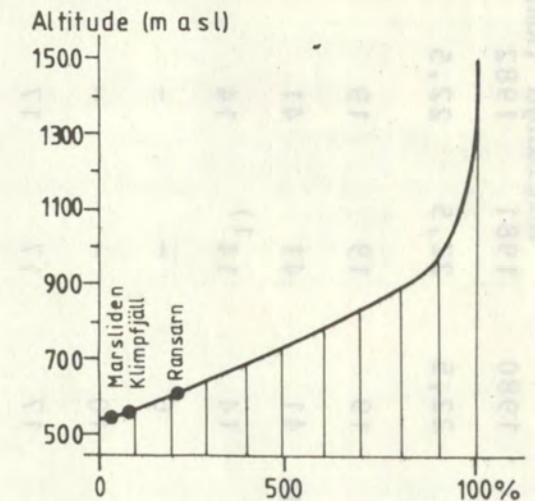


Figur 2. Läge, topografi och namn i Kultsjöns avrinningsområde  
Location, topography and names in the Kultsjön - basin

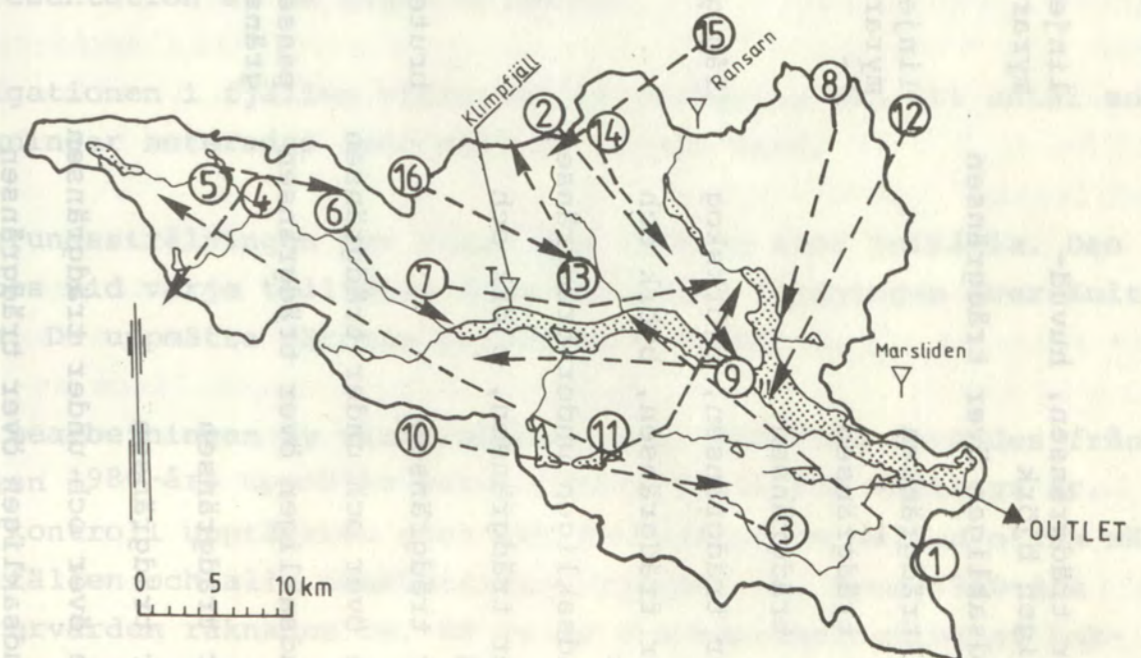
Den hypsografiska kurvan framgår av figur 3. Tre nederbördsstationer och en temperaturstation finns i eller i närheten av området (se figur 4). Dessa stationer är lågt belägna. Avrinningen bestäms av tappningen genom Stalons kraftverk och förbitappningen vid Kultsjöluspen.

Figur 3. Hypsografisk kurva för Kultsjöns avrinningsområde med inlagt höjdläge för nederbörds- och temperaturstationerna.

Hypsographic curve for the Kultsjö basin with altitude for the precipitation and temperature stations.



De ursprungliga flyglinjernas sträckning framgår av figur 4. Projektet startade med 16 flyglinjer, som successivt reducerats till 7. Mätningarnas omfattning för varje år redovisas i tabell 1. I tabell 2 redovisas flygdatum.



Figur 4. Kultsjöns avrinningsområde med de flyglinjer som ursprungligen valdes.  
The original set of flight lines covering the Kultsjön basin  
▽ = nederbördsstation (precipitation station)  
T = temperaturstation (temperature station)

Tabell 1. Beskrivning av flyglinjerna

Flyglinje	Typ	Kommentar	Mätlängd (km)			
			1980	1981	1982	1983
1	under trädgränsen, huvudsakligen björk	linjen avkortad pga myrar	22,5	22,5	22,5	11
2	huvudsakligen över trädgränsen		19	19	19	19 <sup>2)</sup>
3	över trädgränsen	linjen avkortad ngt pga myrar	41	41	41	35,5 <sup>2)</sup>
4	över trädgränsen	"	14	14 <sup>1)</sup>	14	13,5 <sup>2)</sup>
5	över trädgränsen		6	-	-	-
6	under trädgränsen, björkskog	låg gammaaktivitet	10	-	-	-
7	under trädgränsen, björk och gran		17	17	17	17 <sup>2)</sup>
8	huvudsakligen under trädgränsen		22 <sup>1)</sup>	22	22	-
9	under trädgränsen, björk och gran		22 <sup>1)</sup>	22	22	-
10	över trädgränsen	bruten terräng	19	-	19	-
11	både över och under trädgränsen		15	15	15 <sup>1)</sup>	11 <sup>2)</sup>
12	huvudsakligen över trädgränsen	passerar över bergartsgräns med olika gammaaktiviteter	17,5 <sup>1)</sup>	17,5	17,5	17,5 <sup>2)</sup>
13	över trädgränsen		7	7	7	-
14	över trädgränsen		8 <sup>1)</sup>	8	8	-
15	både över och under trädgränsen		12	-	-	-
16	huvudsakligen över trädgränsen		10,5	10,5	10,5	-
1) snedflygning			262,5	215,5	234,5	124,5
2) flygning två gånger						124,5

Tabell 2. Mättillfällen

Datum/År	Flygtyp
13/8 1979	Endast bakgrundsstrålning över sjöar
29/8 1979	"
2/9 1979	Barmarksmätning
27/3 1980	Vintermätning
25/3 1981	Vintermätning
29/3 1982	Vintermätning
14/8 1983	Barmarksmätning
25/3 1983	Vintermätning
27/3 1983	Vintermätning
2/4 1984	Vintermätning

Det är svårt att bedöma, om linjerna är helt representativa. Vid val av dessa har försök gjorts att sprida dem över hela området. Partier av flyglinjerna med myrar har fått utgå på grund av för låga naturliga strålningsintensiteter, vilket medför en underrepresentation av de lägre höjderna.

Navigationen i fjällen vintertid är besvärlig och ett antal snedflygningar noterades speciellt de första åren.

Bakgrundsstrålningen har visat sig vara en stor felkälla. Den mättes vid varje tillfälle före och efter flygningen över Kultsjön. De uppmätta värdena redovisas i tabell 3.

Vid bearbetningen av vintermätningarna 1980-1983 användes från början 1980-års uppmätta bakgrundsstrålning för samtliga år. Vid kontroll upptäcktes dock att den varierade mellan olika mättillfällen och alla bearbetningar gjordes om. Även 1980-års vintervärden räknades om. En av de tre bestämningarna av bakgrundsstrålningen vid flygtillfället var inte representativ eftersom den mättes över en annan sjö utanför området.

Tabell 3. Bakgrundsstrålning. Medelvärde av antalet registrerade pulser under en registreringstid om 0,3 sekunder. (Sammanslagning av 38 kanaler inom energiintervallet 250-3 000 keV).

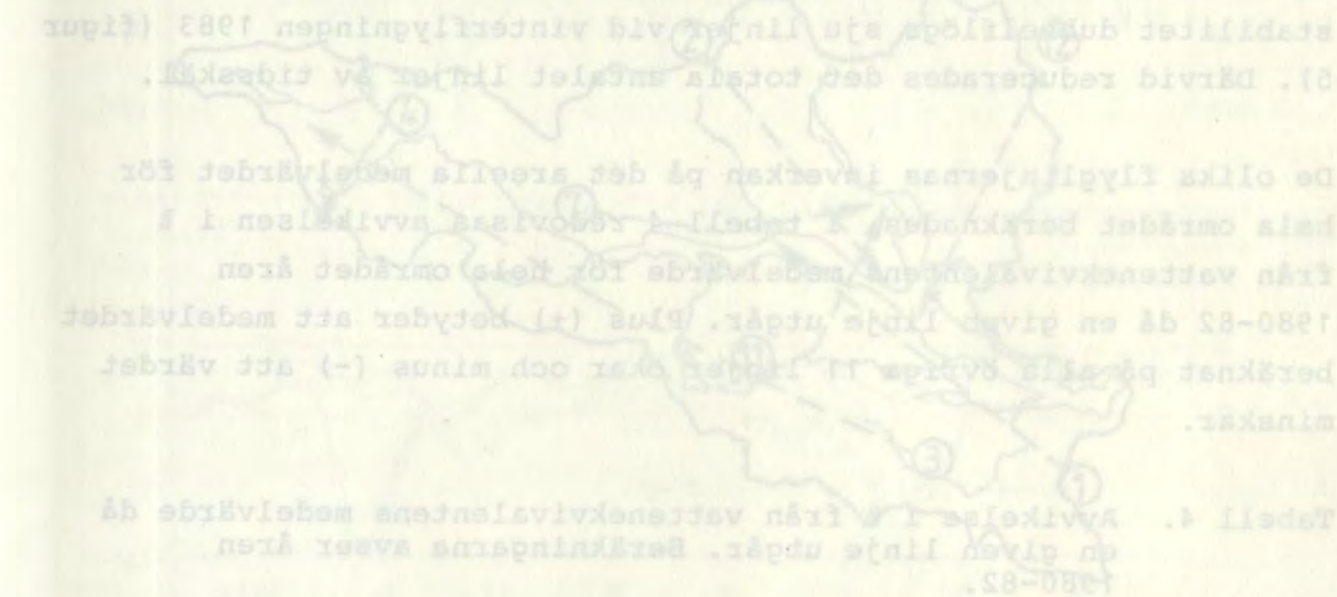
Datum	13/8	29/8	2/9	27/3	25/3	29/3	14/8	25/3	27/3	2/4
År	1979	1979	1979	1980	1981	1982	1983	1983	1983	1984
före flygning	68.3	54.1	57.2	60.0	55.6	55.6	53.8	64.5	62.6	65.0
efter flygning	67.7	54.3	57.5	58.9	51.7	54.5	57.5	61.8	61.9	60.8
medelvärde	68.0	54.2	57.4	59.5	53.7	54.9	55.6	63.3	62.2	62.5

En felanalys baserad på 7 linjer visar, att medelvattenekvivalenten för hela området blir ca 1,3 % för lågt vid en överskattning av bakgrundsstrålningen med en puls per 0,3 s. (Vid ett snömagasin på ca 400 mm gör det 5 mm lägre vattenvärde). Som exempel var den felaktigt använda bakgrundsstrålningen för åren 1981 och 1982 ca 10 pulser för hög. Vid en omräkning med verklig mätt bakgrundsstrålning ändrades vattenekvivalenten för hela området med ca 50 mm.

Ändringar i bakgrundsstrålningen över Kultsjön under flygtillfällena åren 1980 till 1984 medför en osäkerhet i hela områdets medelvattenekvivalent. Denna osäkerhet uppskattas till mellan 5 och 15 mm (0,5-2 %). Åren 1981, 1983 och 1984 uppmättes de största förändringarna under flygtillfällena.

Snöns vattenvärde för en linje beräknas genom att registrerade pulser summeras för en viss längd. Integrationslängder som har använts är 200 m, 1 och 2 km. Medelvärdesberäkningen längs en flyglinje tillgår på följande sätt: Ett antal mätpunkter definieras på sommarlinjen, och inom detta intervall beräknas medelvärdet av intensiteterna. 11 mätpunkter motsvarar ca 200 m, 51 ca 1 km och 91 ca 2 km. På basis av koordinatangivelserna kan motsvarande intervall och medelvärde för vinterflygningen bestämmas. Vattenvärdet erhålles sedan ur ekvation 1 och avser alltså ett medelvärde inom intervallet. Successiva intervall beräknas så, att ett glidande medelvärde erhålles. Vidare beräknas medelvärdet av vattenmängden längs hela linjen.

Medelvärdet för en hel flyglinje blir dock inte lika om intervalllängden ändras på grund av att sambandet mellan vattenvärdet och gammastrålningen inte är linjärt. Ökar intervalllängden så minskar medelvärdet, eftersom partier med bara fläckar och lite snö blir överrepresenterade. Felen minimeras genom att använda så korta intervall som möjligt samtidigt som antalet registrerade strålningspulser inte får bli för lågt på grund av att osäkerheten då ökar. En intervalllängd på 200 m ger ca 4 % högre vattenvärde för hela området än en intervalllängd på 2 km. Vid beräkningar av areellt medelvärde har 200 m integrationslängd använts.



Figur 5. De sju linjerna som användes från och med 1980.

2.2 Mätavvikelse mellan vinterflygning och sommarflygning

Vid tvåflygningssmetoden görs normalt barmarkflygningen på hösten och sommarflygningen på våren. Detta innebär att de två flygningarna görs vid olika tidpunkter under året. Detta kan ge upphov till skillnader i vattenvärdet på grund av variationer i den naturliga strålningen, markfuktigheten och snödjupet. För att testa den osäkerhet som orsakas av dessa variationer i den naturliga strålningen, markfuktigheten och snödjupet gjordes två flygningar på samma linje (Flyglinje 1) under hösten 1983. Sju linjer flygs då två gånger på samma dag. I figurerna 6 och 7 redovisas plottningar av differenserna mellan 1979 och 1983 års barmarkstrålning (flygning 1) för Flyglinje 1 och 7 och 12 med olika integrationslängder (pulser/0,3 sekunder). För 1 km integrationslängd redovisas motsvarande skillnad även för Flygning 2, 1983.

### 3. KÄNSLIGHETSTESTER AV GAMMAMETODEN

För att undersöka gammametodens känslighet har bl a följande tester utförts: Barmarksflygningen 1979 flögs om 1983 för att testa dess stabilitet. Sju vinterlinjer dubbelflögs 1983 och tre 1984.

#### 3.1 Betydelsen av antalet flyglinjer för det areella medelvärdet

Det ursprungliga antalet flyglinjer var 16 stycken. Några utgick redan efter första årets flygning på grund av tidsnöd eller att de av andra skäl visade sig olämpliga. För att kunna testa metodens stabilitet dubbelflögs sju linjer vid vinterflygningen 1983 (figur 5). Därvid reducerades det totala antalet linjer av tidsskäl.

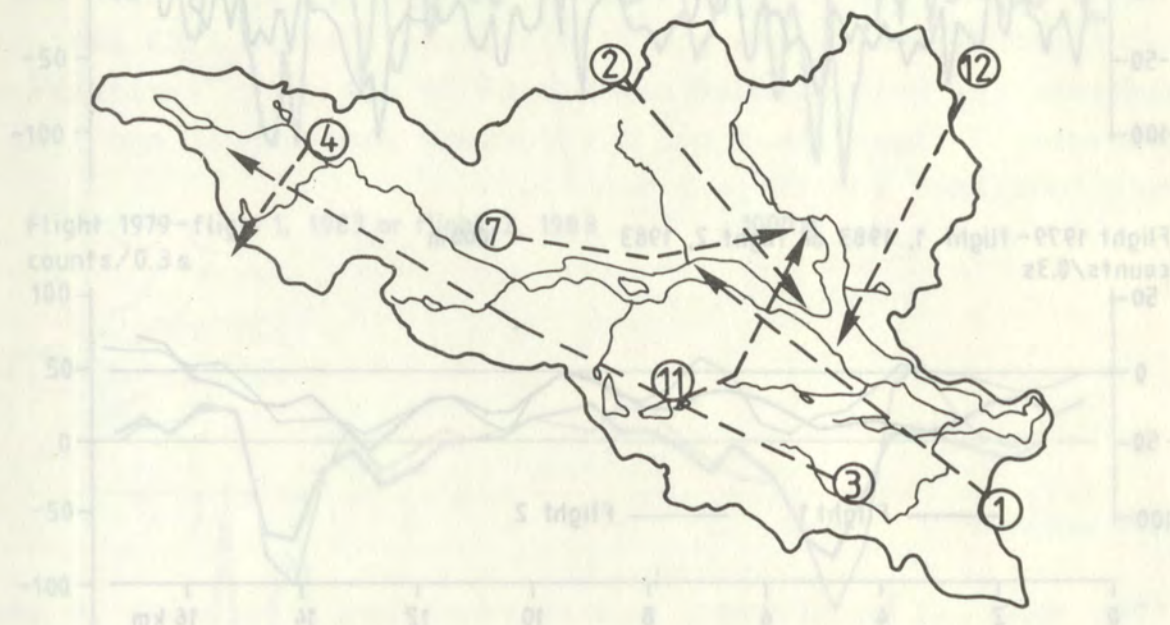
De olika flyglinjernas inverkan på det areella medelvärdet för hela området beräknades. I tabell 4 redovisas avvikelsen i % från vattenekvivalentens medelvärde för hela området åren 1980-82 då en given linje utgår. Plus (+) betyder att medelvärdet beräknat på alla övriga 11 linjer ökar och minus (-) att värdet minskar.

Tabell 4. Avvikelse i % från vattenekvivalentens medelvärde då en given linje utgår. Beräkningarna avser åren 1980-82.

Utelämnad flyglinje	1980	1981	1982
1	0	+1	-1 %
2	+1	+1	+1
3	-3	-3	-2
4	-3	+1	-2
7	+1	0	+1
8	+1	+1	-1
9	+1	-1	-1
11	-1	0	-1
12	+1	+2	+3
13	0	0	0
14	+1	+1	+1
16	0	0	0

Linje 3, 4 och 12 påverkade medelvärdet mest. Linje 3 är lång och får representera fjällområdet syd Kultsjön. Linje 4 får representera högfjällsområdet mot Norge och linje 12 delar av Marsfjället i nordost. För att få en så god täckning som möjligt av området utvaldes dessutom linjerna 1, 2, 7 och 11.

Medelvärdet för 1980 ändrades från 353 mm till 362 mm (3 %), när antalet flyglinjer reducerades från tretton till sju stycken (baserat på 200 m integrationslängd).



Figur 5. De sju flyglinjerna som användes från och med 1983.

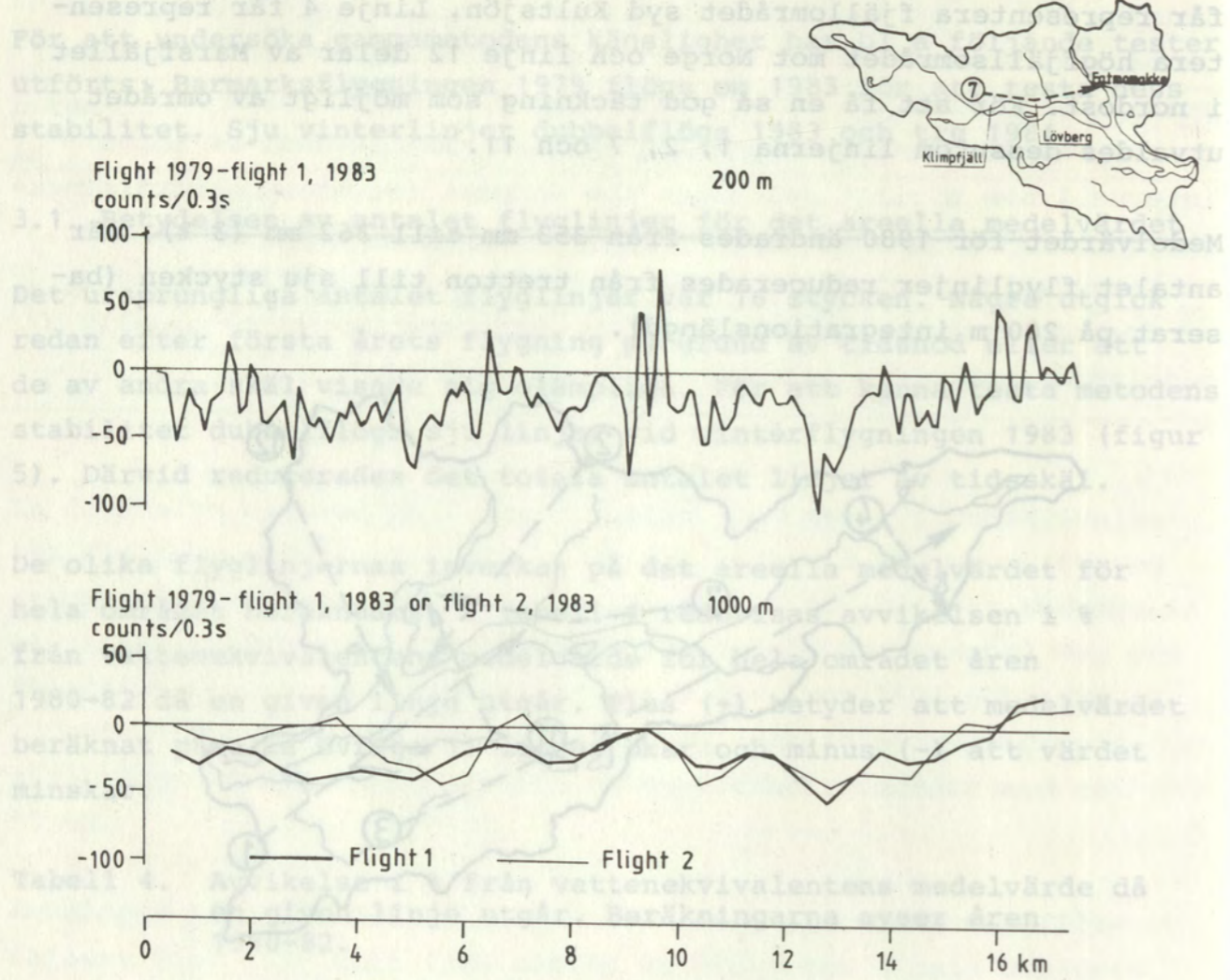
The seven flight lines used in 1983 and 1984.

#### 3.2 Mätavvikelser mellan olika barmarksflygningar

Vid tvåflygningsmetoden görs normalt barmarksflygningen på hösten endast vid ett tillfälle och den mätningen används sedan mot samtliga vintermätningar. För att testa den osäkerhet som orsakas av variationer i den naturliga strålningen, markfuktigheten och lägesfel utfördes förutom barmarksmätningen 1979 ytterligare en hösten 1983. Sju linjer flögs då två gånger i följd samma dag.

I figurerna 6 och 7 redovisas plottningar av differenserna mellan 1979 och 1983 års barmarksstrålning (flygning 1) för flyglinje 7 och 12 med olika integrationslängd uttryckt i pulser/0,3 sekunder. För 1 km integrationslängd redovisas motsvarande skillnad även för flygning 2, 1983.

Länge 3, 4 och 12 påverkade medelvärdena. Linje 4 får repren-

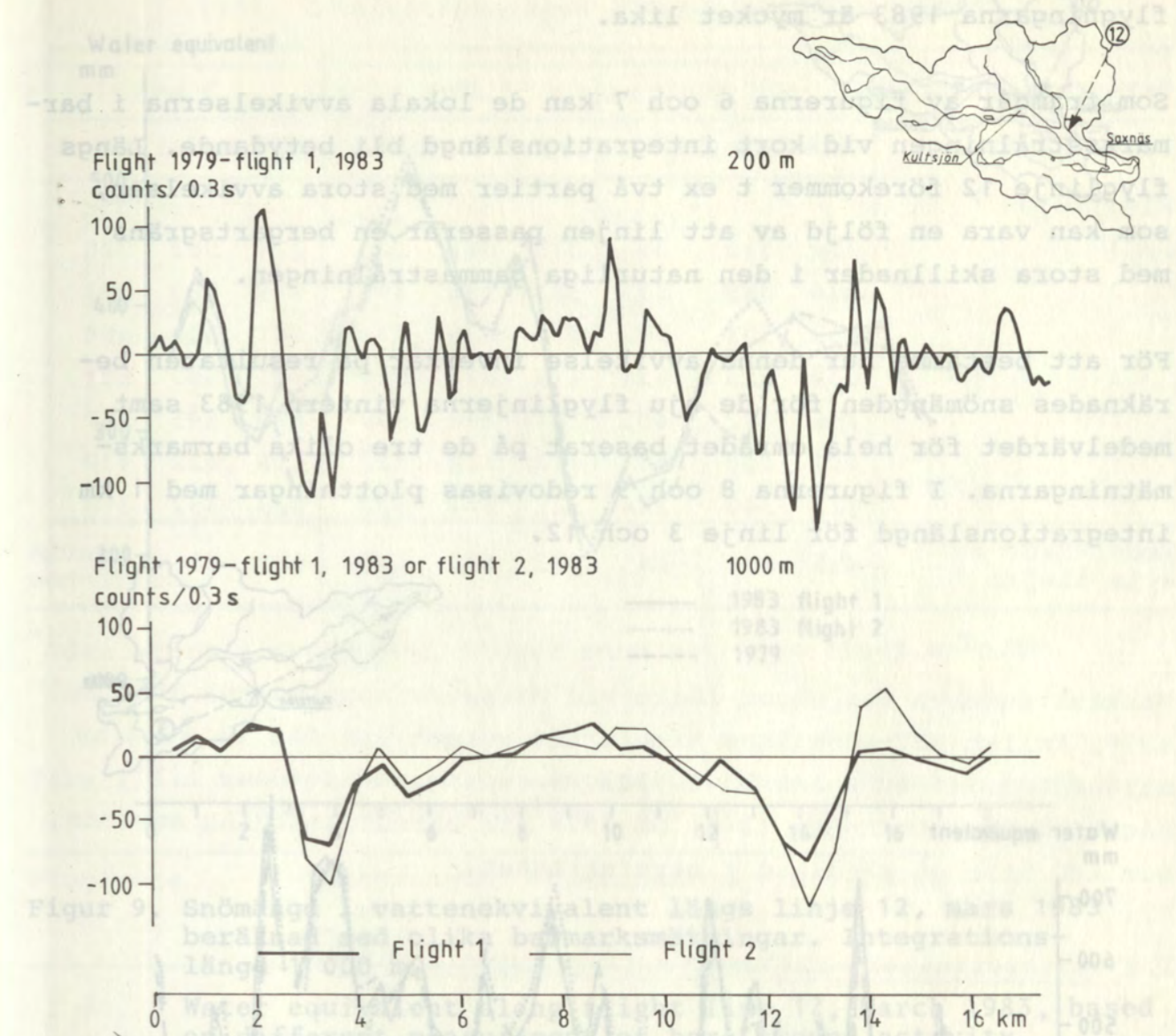


Figur 6. Differens i barmarksstrålning mellan 1979 och 1983 års mätning längs flyglinje 7. Integrationslängd 200 m och 1 000 m.

Differences in activity between the bare ground measurements 1979 and 1983, along flight line 7. Integration lengths 200 m and 1 000 m.

I figurerna 6 och 7 redovisas plotningar av differenserna mellan 1979 och 1983 års barmarksstrålning (flygning 7) för flyglinje 7 och 12 med olika integrationslängd uttryckt i pulser/0,3 sekunder. För 1 km integrationslängd redovisas motsvarande skillnad även för

Plotningarna för 1 km integrationslängd visar att de två barmarks-



Figur 7. Differens i barmarksstrålning mellan 1979 och 1983 års mätning längs flyglinje 12. Integrationslängd 200 m och 1 000 m.

Differences in activity between the bare ground measurements 1979 and 1983 along flight line 12. Integration lengths 200 m and 1 000 m.

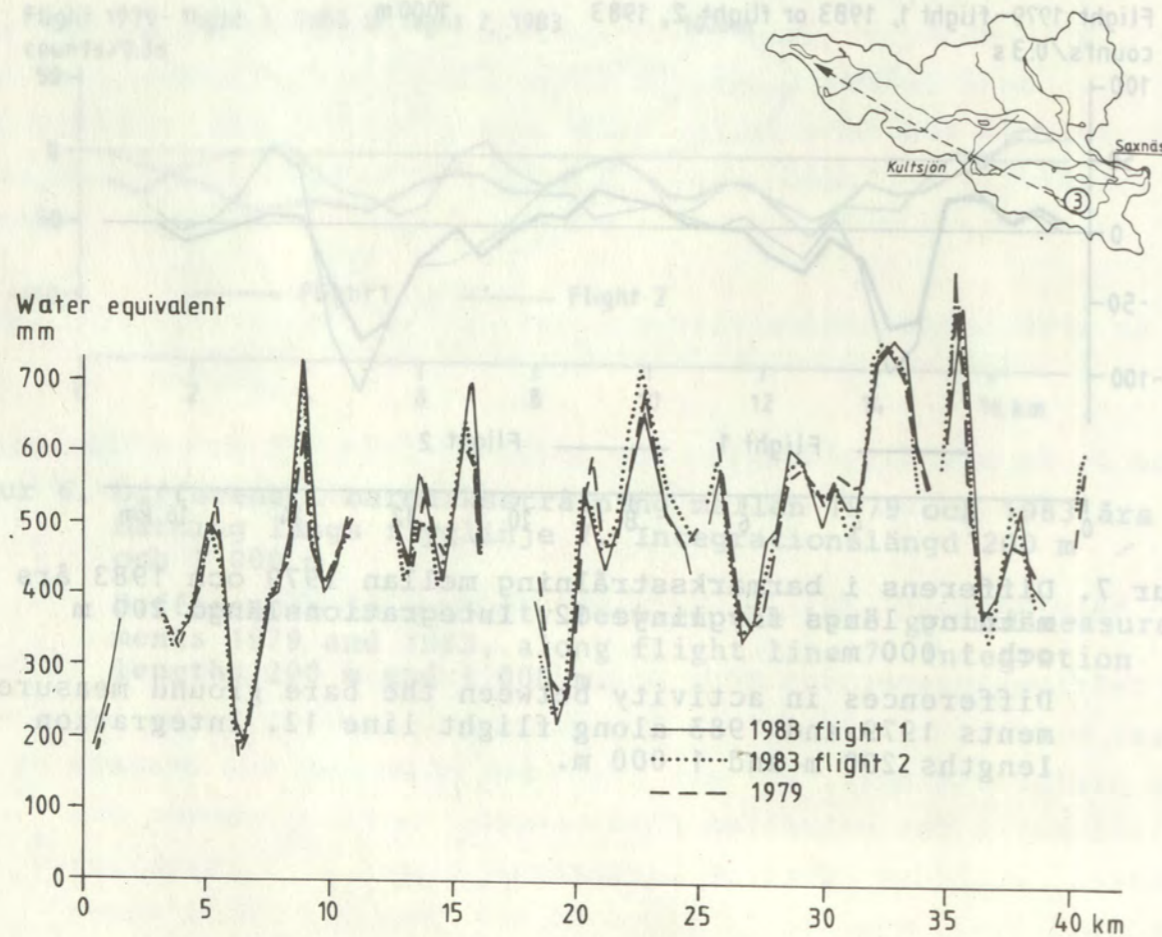
Figur 8. Sammandrag av barmarksstrålning i olika barmarksstrålnings- områden med olika barmarksstrålnings- områden. Integrations- längd 1 000 m.

Water equivalent along flight line 3, March 1983, based on different measurements of bare ground activity. Integration length 1 000 m.

Plottningarna för 1 km integrationslängd visar att de två barmarksflygningarna 1983 är mycket lika.

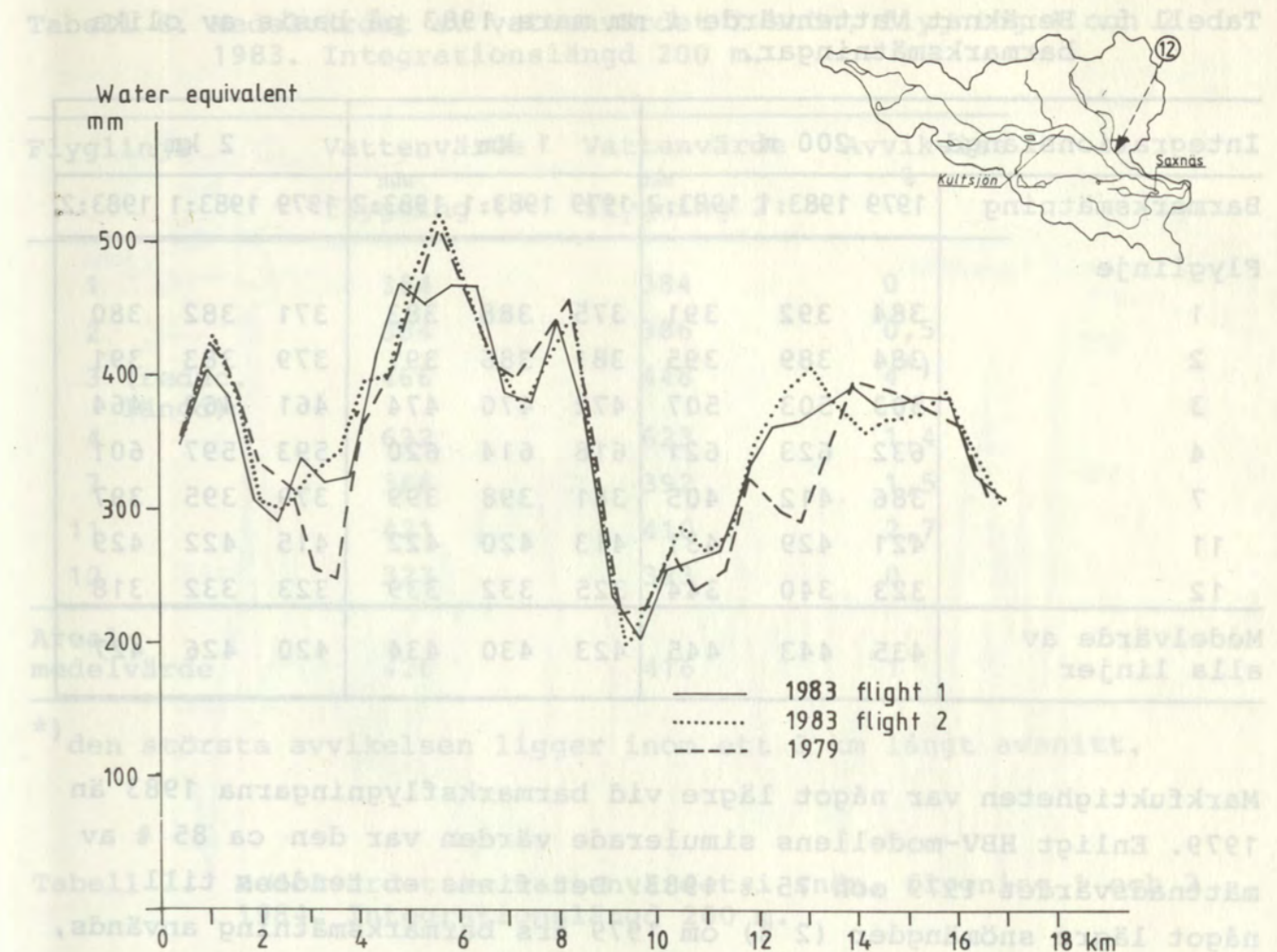
Som framgår av figurerna 6 och 7 kan de lokala avvikelserna i barmarksstrålningen vid kort integrationslängd bli betydande. Längs flyglinje 12 förekommer t ex två partier med stora avvikelser, som kan vara en följd av att linjen passerar en bergartsgräns med stora skillnader i den naturliga gammastrålningen.

För att bestämma hur denna avvikelse inverkar på resultaten beräknades snömängden för de sju flyglinjerna vintern 1983 samt medelvärdet för hela området baserat på de tre olika barmarksmätningarna. I figurerna 8 och 9 redovisas plottningar med 1 km integrationslängd för linje 3 och 12.



Figur 8. Snömängd i vattenekvivalent längs linje 3, mars 1983 beräknad med olika barmarksmätningar. Integrationslängd 1 000 m.

Water equivalent along flight line 3, March 1983, based on different measurements of bare ground activity. Integration length 1 000 m.



Figur 9. Snömängd i vattenekvivalent längs linje 12, mars 1983 beräknad med olika barmarksmätningar. Integrationslängd 1 000 m.

Water equivalent along flight line 12, March 1983, based on different measurement of bare ground activity. Integration length 1 000 m.

Som framgår av figur 9 medförde de stora differenserna i barmarksstrålningen längs linje 12 vid 3 och 12 km en differens på ca 80 mm. För hela linjen var differensen maximalt 21 mm, dvs 7 % av snöns vattenvärde. Motsvarande beräkning för samtliga linjer redovisas i tabell 5. Det framgår av tabellen att differensen i det areella medelvärdet, som mest blir 10 mm, vilket motsvarar 2 %, om olika barmarksflygningar väljs.

Tabell 5. Beräknat vattenvärde i mm mars 1983 på basis av olika barmarksmätningar.

Integrationslängd	200 m			1 km			2 km		
	1979	1983:1	1983:2	1979	1983:1	1983:2	1979	1983:1	1983:2
Barmarksmätning									
Flyglinje									
1	384	392	391	375	388	383	371	382	380
2	384	389	395	381	386	391	379	383	391
3	503	503	507	472	470	474	461	462	464
4	632	623	621	618	614	620	593	597	601
7	386	412	405	381	398	399	379	395	397
11	421	429	431	413	420	422	415	422	429
12	323	340	344	325	332	339	323	332	318
Medelvärde av alla linjer	435	443	445	423	430	434	420	426	427

Markfuktigheten var något lägre vid barmarksflygningarna 1983 än 1979. Enligt HBV-modellens simulerade värden var den ca 85 % av mättnadsvärdet 1979 och 75 % 1983. Det finns en tendens till något lägre snömängder (2 %) om 1979 års barmarksmätning används, som kan bero på skillnad i markfuktighet.

### 3.3 Mätavvikelser mellan två flygningar i följd

Vid vintermätningen 1983 flögs sju flyglinjer och 1984 tre flyglinjer två gånger i följd för att kunna studera variabiliteten mellan två flygningar.

I tabell 6 framgår medelvärdet av vattenvärdet för de enskilda flyglinjerna samt ett medelvärde för hela området för de båda flygningarna 1983. De enskilda flyglinjernas medelvärde har viktats med hänsyn till flyglängden vid medelvärdesberäkningen för området. (Vid den andra flygningen 1983 utgick 10 km av flyglinje 3 på grund av siktproblem. Denna sträcka har utgått vid bearbetningen). I tabell 7 redovisas dubbelflygningarna 1984 på samma sätt.

Tabell 6. Medelvärdet av vattenvärdet i snön, flygning 1 och 2 1983. Integrationslängd 200 m.

Flyglinje	Vattenvärde mm flygning 1	Vattenvärde mm flygning 2	Avvikelse %
1	384	384	0
2	384	386	0,5
3 (reduc. längd)	466	448	4*)
4	632	623	1,4
7	386	392	1,5
11	421	410	2,7
12	323	323	0
Areal- medelvärde	420	416	1

\*) den största avvikelsen ligger inom ett 3 km långt avsnitt.

Tabell 7. Medelvärdet av vattenvärdet i snön, flygning 1 och 2 1984. Integrationslängd 200 m.

Flyglinje	Vattenvärde mm flygning 1	Vattenvärde mm flygning 2	Avvikelse %
4	666	674	1,2
11	465	461	0,9
12	428	445*)	(3,9)

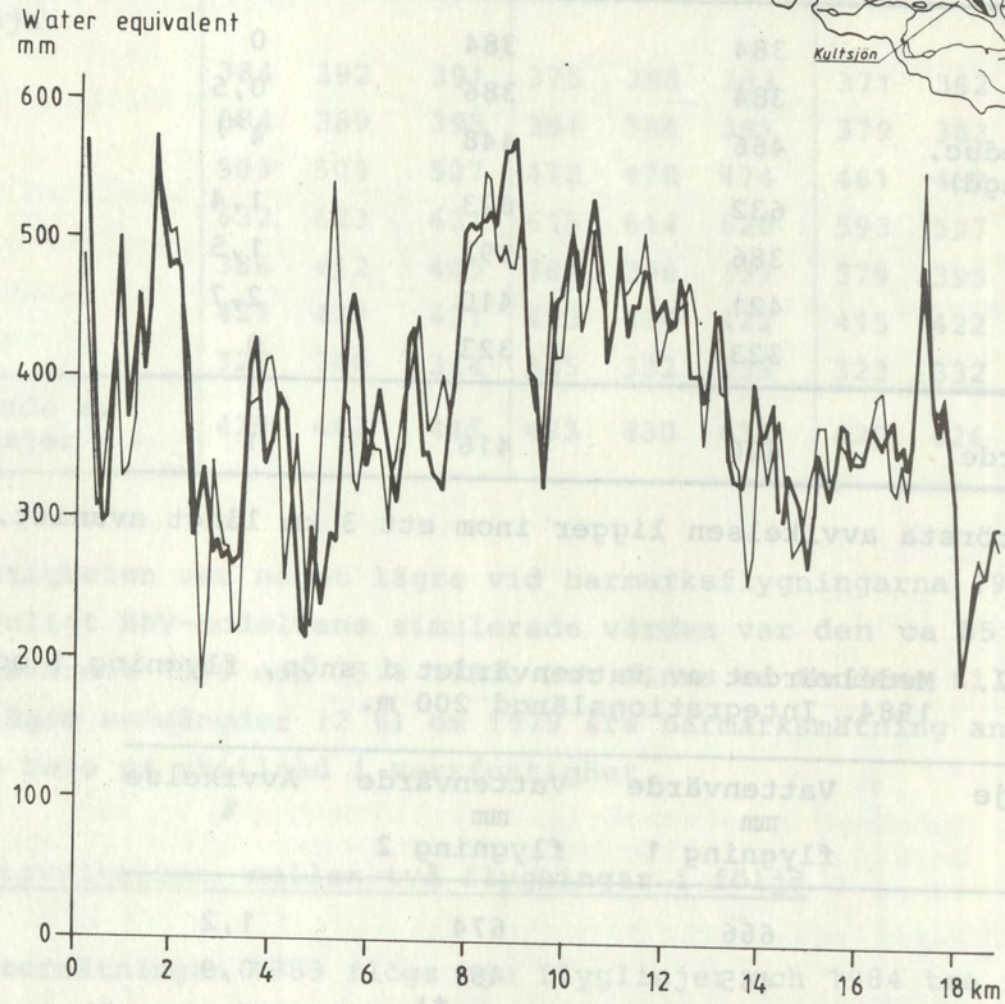
\*) snedflygning

Avvikelsen mellan medelvärdena för de två flygningarna 1983 är liten (1 % för hela området). För enskilda flyglinjer varierar den mellan 0 och 4 %.

I figurerna 10 - 12 redovisas vattenvärdet beräknat på 200 m intervall för flyglinje 2, 7 och 11 för de två flygningarna 1983. Linje 2 uppvisar den bästa överensstämmelsen mellan de två flygningarna.

I stort sett uppvisar de olika flygningarna ett likartat mönster för alla flyglinjer, men lokala avvikelser förekommer.

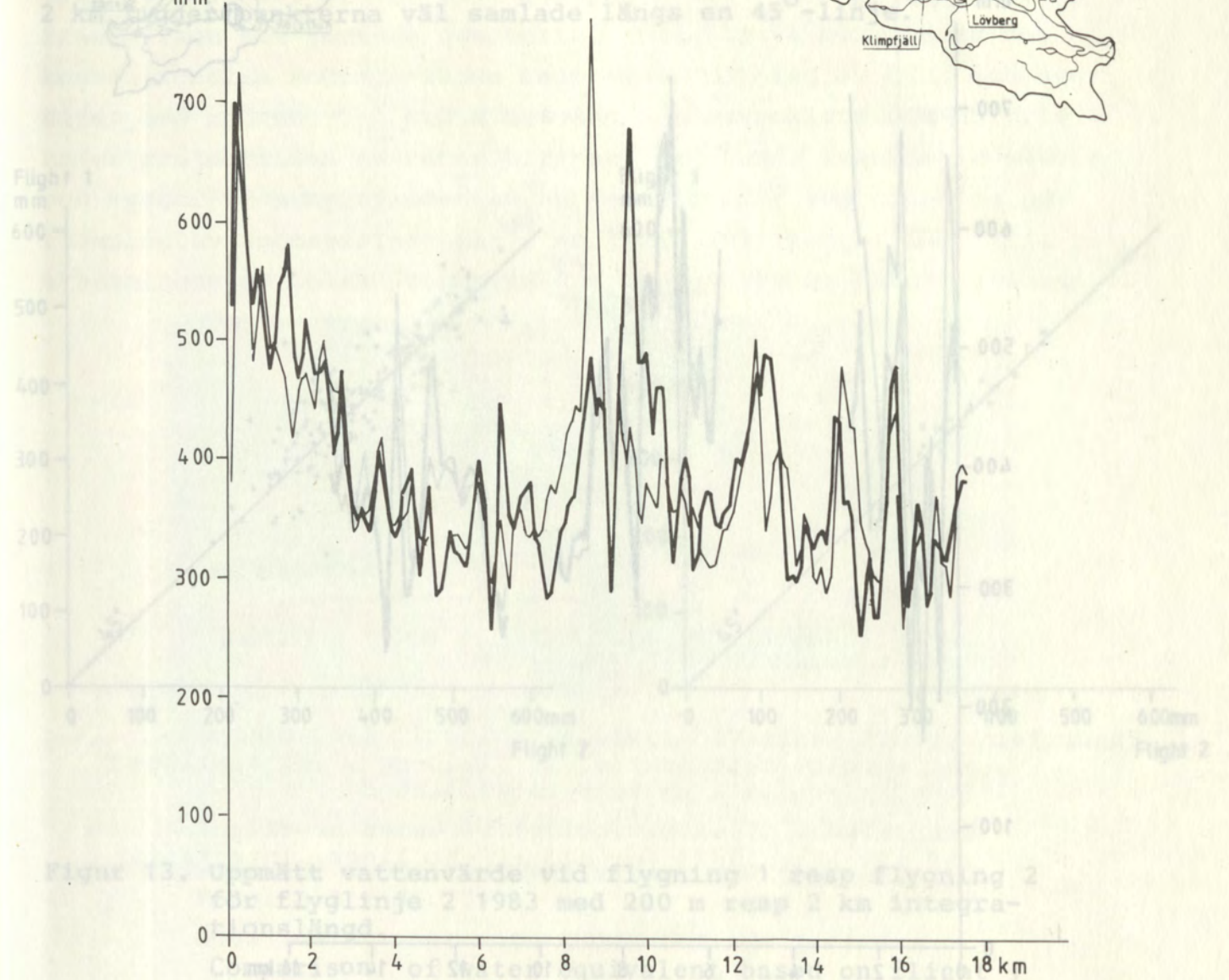




Figur 10. Vattenvärde längs flyglinje 2 (200 m integrationslängd) flygning 1 och 2 1983.

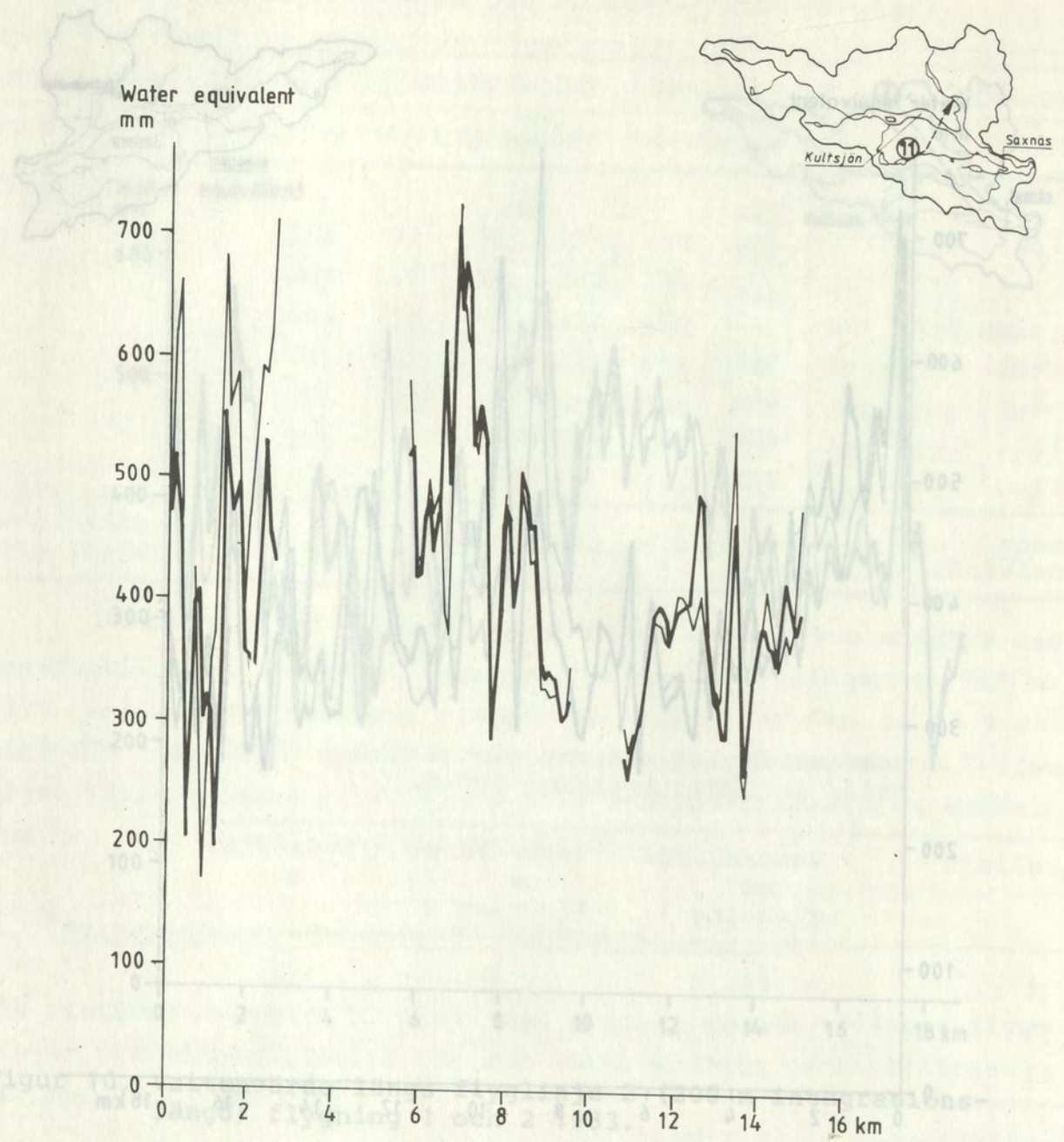
Example of reproduction of the snow registration on line 2 when flown twice 1983. (200 m integration length).

Water equivalent  
mm



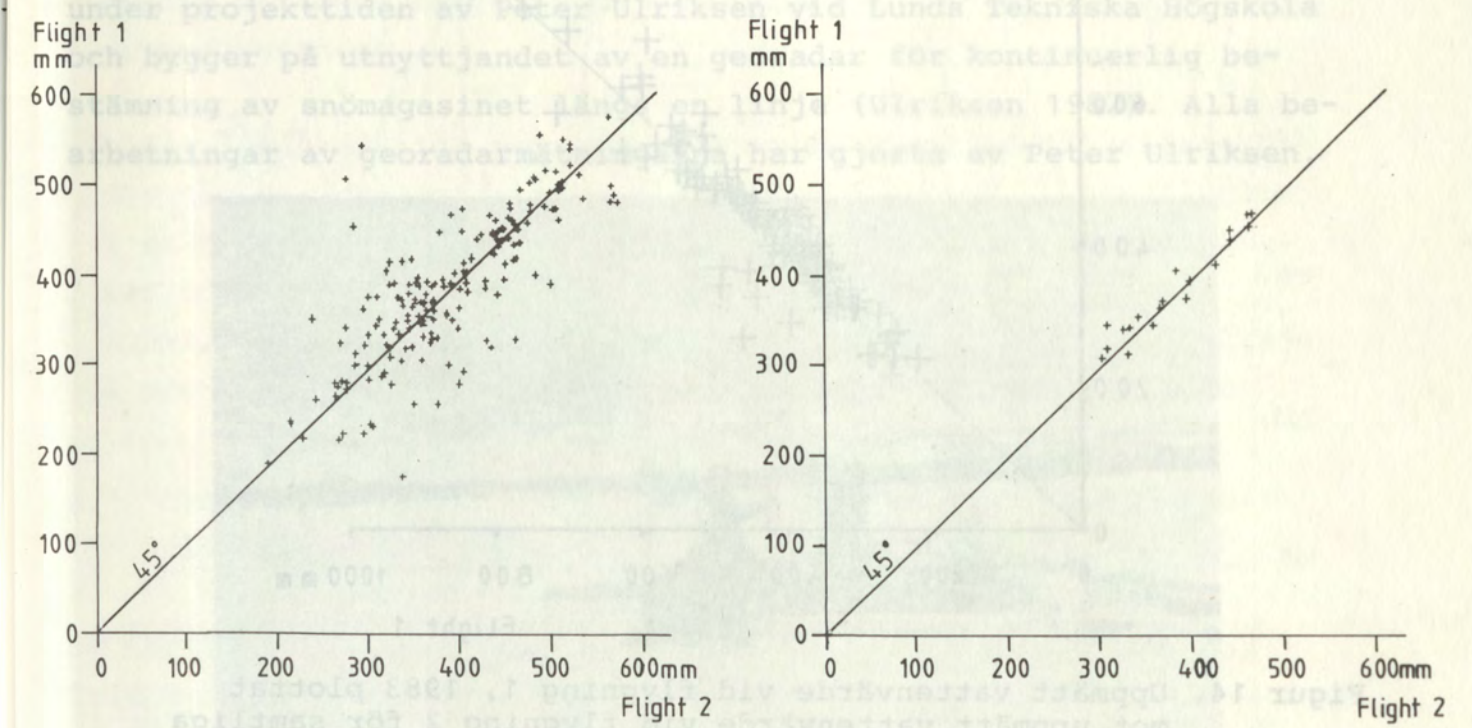
Figur 11. Vattenvärde längs flyglinje 7 (200 m integrationslängd) flygning 1 och 2 1983.

Example of reproduction of the snow registration on line 7 when flown twice 1983. (200 m integration length).



Figur 12. Vattenvärde längs flyglinje 11 (200 m integrationslängd) flygning 1 och 2 1983.  
 Example of reproduction of the snow registration on line 11 when flown twice 1983. (200 m integration length).

I figur 13 har uppmätt vattenvärde för flyglinje 2 vid flygning 1 plottats mot uppmätt vattenvärde vid flygning 2 för en integrationslängd av 200 m och 2 km. För den kortaste integrationslängden är spridningen relativt stor, men vid integrationslängden 2 km ligger punkterna väl samlade längs en 45°-linje.

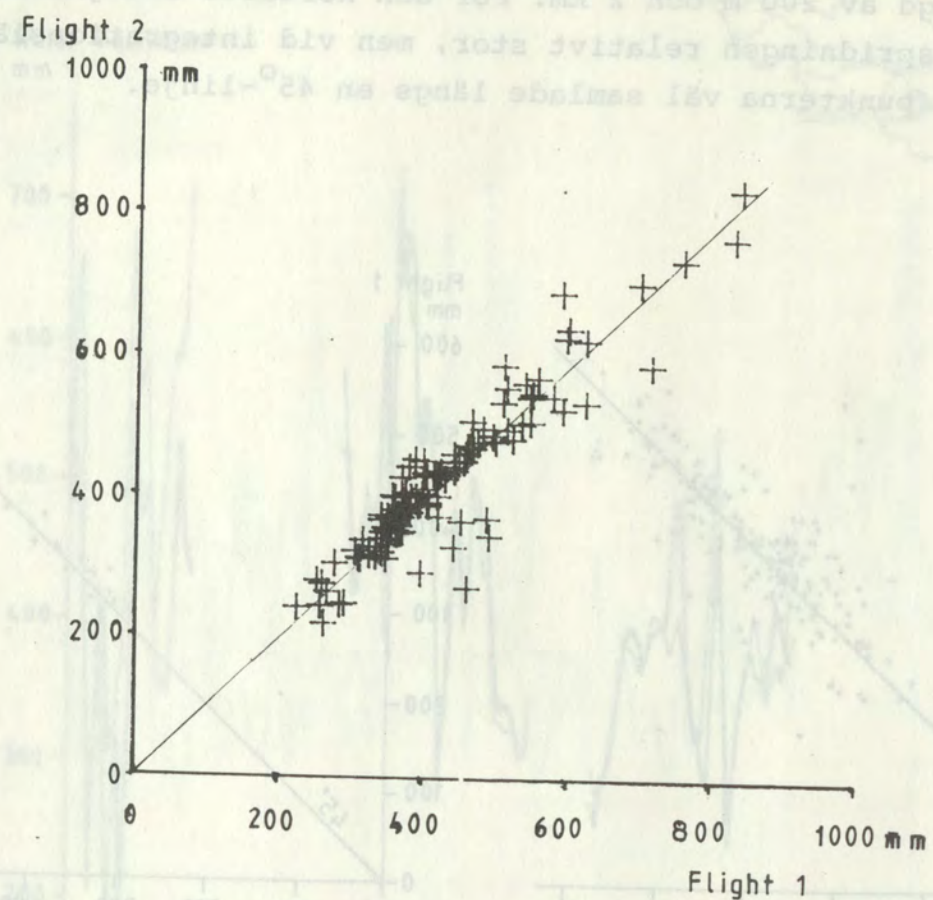


Figur 13. Uppmätt vattenvärde vid flygning 1 resp flygning 2 för flyglinje 2 1983 med 200 m resp 2 km integrationslängd.

Comparison of water equivalent based on flight 1 and flight 2, 1983 for flight line 2. Integration length 200 m and 2 km.

Comparison of water equivalent based on flight 1 and flight 2, 1983 for flight line 2. Integration length 200 m and 2 km. Comparison of water equivalent based on flight 1 and flight 2, 1983 for flight line 2. Integration length 200 m and 2 km. Comparison of water equivalent based on flight 1 and flight 2, 1983 for flight line 2. Integration length 200 m and 2 km.

I figur 14 har motsvarande plottning utförts för samtliga linjer 1983 med 2 km integrationslängd.



Figur 14. Uppmätt vattenvärde vid flygning 1, 1983 plottat mot uppmätt vattenvärde vid flygning 2 för samtliga flyglinjer med 2 km integrationslängd.

Comparison of water equivalent based on flight 1 and flight 2, 1983 for all flight lines. Integration length 2 km.

Slutsatsen av testen är att variabiliteten kan vara relativt stor lokalt, men för sträckor om 2 km eller mer är reperterbarheten god. Det areella medelvärdet på snömagasinet skiljer sig ca 1 % mellan de två flygningarna 1983.

#### 4. VERIFIERING AV GAMMAMÄTNINGAR MOT SNÖTAXERING PÅ MARKEN

Under hela projektets gång har vi arbetat med frågan om hur man lämpligast verifierar de mätningar av snömagasinet som registreras från flygplanet. Vi har valt att pröva två typer av snötaxering från marken som jämförelsematerial. Den första metoden är den konventionella snötaxeringen baserad på mätning av djup och densitet med snörör. Den andra metoden har utvecklats och utförts under projektiden av Peter Ulriksen vid Lunds Tekniska Högskola och bygger på utnyttjandet av en georadar för kontinuerlig bestämning av snömagasinet längs en linje (Ulriksen 1982). Alla bearbetningar av georadarmätningarna har gjorts av Peter Ulriksen.

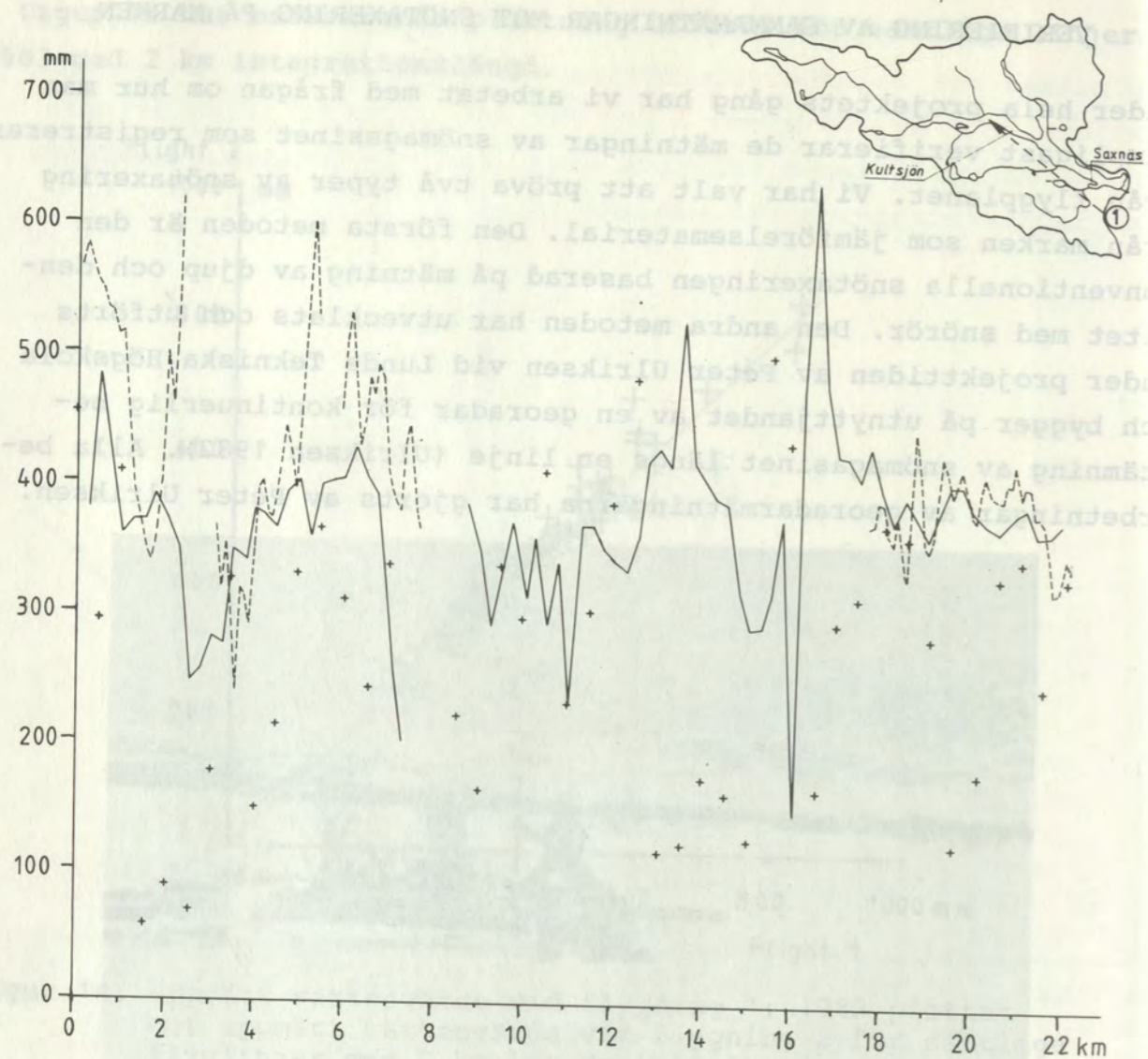


Samtidig snömätning med snörör och georadar

Foto: M Brandt, 1984

Snow measurement with snowtubes and georadar

De tre metoderna är långt ifrån jämförbara. Gammametoden mäter ett fält med approximativt 100 meters bredd och en integrationslängd längs linjen som i detta projekt varierat mellan 200 och 2 000 m (se figur 1). Georadarn registrerar kontinuerligt snömäktigheten längs en linje och den konventionella snötaxeringen inskränker sig till diskreta punktmätningar. Med kännedom om den stora variabilitet som snötäcket uppvisar, speciellt ovanför trädgränsen, är det därför naturligt att en jämförelse måste baseras på medelvärden över relativt långa sträckor. Problemet illustreras av figur 15 som är en direkt jämförelse mellan de tre metoderna längs ca 15 km av flyglinje 1 1984.



Figur 15. Jämförelse mellan vatteninnehåll längs flyglinje 1 1984 uppmätt med radar (-), gamma (--) och snötaxering (+). Integrationslängd för gamma ca 200 m.  
Comparison of water equivalents along flight line 1 1984 measured with radar (-), gamma (--) and snow tubes (+). Integrations length for gamma 200 m.

Material till utvärdering från marken av gammaflygningarna har samlats vid ett flertal kampanjmätningar:

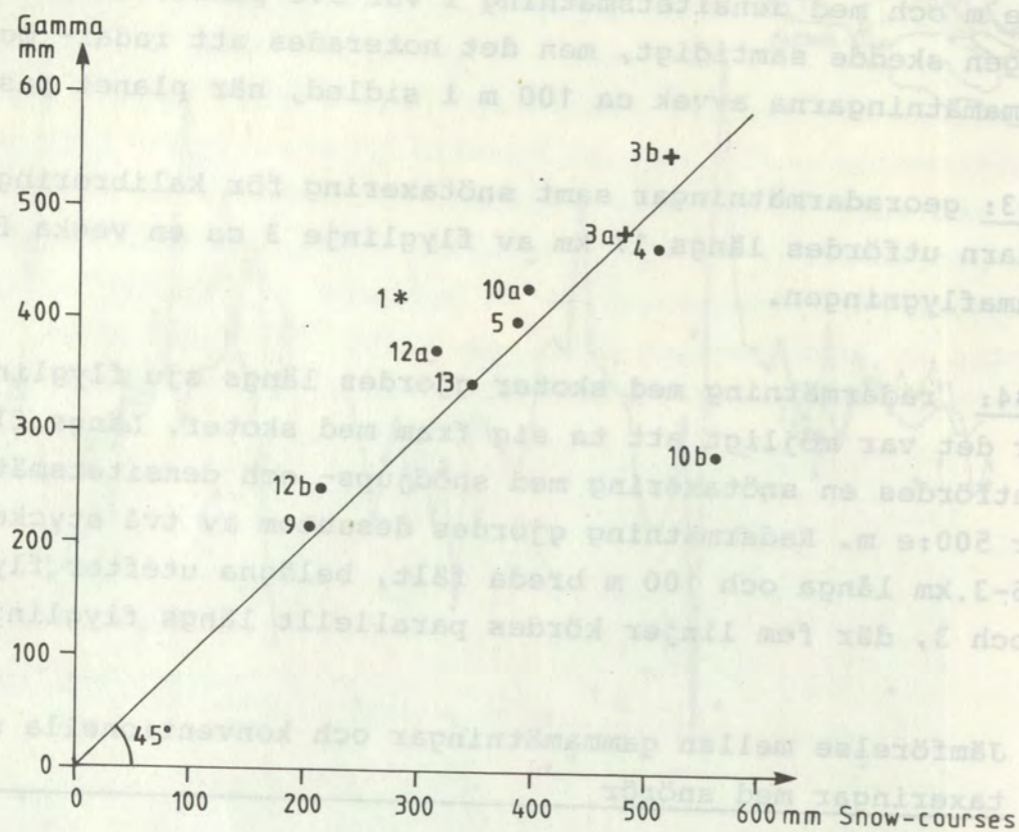
-1980: manuell snötaxering utfördes längs 8 stycken sträckor om ca 2 km vardera. Avståndet mellan mätpunkterna var 50 m för snödjups- och 100 m för densitetsprover. Två av provsträckorna gick i ren granskog, en delvis i björkskog och de resterande fem på rent kalvfjäll. Sträckorna var spridda över hela området och utgjorde partier av flyglinjerna 4, 5, 9, 10, 12 och 13.

- 1982: georadarmätningar utfördes längs 17 km av flyglinje 3. Snötaxering gjordes parallellt 13 km med snödjupsmätning var 50:e m och med densitetsmätning i var 5:e punkt. Gammaflygningen skedde samtidigt, men det noterades att radar- och gammamätningarna avvek ca 100 m i sidled, när planet passerade.
- 1983: georadarmätningar samt snötaxering för kalibrering av radarn utfördes längs 17 km av flyglinje 3 ca en vecka före gammaflygningen.
- 1984: radarmätning med skoter gjordes längs sju flyglinjer, där det var möjligt att ta sig fram med skoter. Längs flyglinje 1 utfördes en snötaxering med snödjups- och densitetsmätning var 500:e m. Radarmätning gjordes dessutom av två stycken 2,5-3 km långa och 100 m breda fält, belägna utefter flyglinje 2 och 3, där fem linjer kördes parallellt längs flyglinjen.

#### 4.1 Jämförelse mellan gammamätningar och konventionella snötaxeringar med snörör

De första resultaten från en jämförelse mellan gammamätningar från luften och konventionella markmätningar redovisades av Nilsson m fl (1980). Resultaten, som har omräknats och kompletterats med data från nya kampanjmätningar, redovisas i figur 16. Beräkningarna för gammavärdena bygger på en integrationslängd av 200 m.

1980 var provsträckorna ca 2 km, 1983 mellan 18 och 26 km och 1984 ca 12 km. Snötaxeringen 1984 utfördes endast var 500:e m. Linje 1, 9 och 12b är belägna under trädgränsen i kuperad björk - granskog. 1980 varierade densiteten i skog mellan 190 och 350 kg/m<sup>3</sup> och låg i regel kring 250 kg/m<sup>3</sup>. Variationerna i vatteninnehåll var små. 1984 varierade densiteten betydligt mer i skogen och föreföll att variera mer än normalt. Finska mätningar i skog under många år uppvisar betydligt lägre variation (Kuusisto, 1984).



Figur 16. Jämförelse mellan konventionell snötaxering och gamma-mätningar 1980 (•), 1983 (+) och 1984 (\*). Varje punkt motsvarar en sträcka av 2 km eller längre.

Comparison between conventional snow-courses and results from gamma-measurements. Each points represents a 2 km line or longer.

Pulsfrekvensen vid gammamätningen 1984 längs ca 300 m av provsträckan 4 var mycket låg. Den delen av sträckan fick utgå vid beräkningen, vilket medför att gammavärdet för denna linje troligen är för lågt. Provsträckan 10b 1980 uppvisar en stor avvikelse från 45°-linjen. Terrängen är storblockig och snön var ojämnt fördelad med snödjup från 0 till 3,5 m. I en sådan terräng underskattar gammametoden snömängden.

#### 4.2 Jämförelse mellan gammamätningar och snötaxering med georadar

Det första försöket att jämföra gammamätningen med mätningar med georadarn genomfördes 1982 längs en 13 km lång sträcka av linje 3. Försöket misslyckades delvis eftersom flygningen och georadarmätningens linje låg 100 m ifrån varandra. Vid gammabearbetningen användes 200 m integrationslängd. Försöket uppvisade ett mönster som liknar det som redovisats i figur 15 även om avvikelserna var mindre mellan metoderna. Medelvärdet för gammamätningen blev 443 mm mot 471 mm för snötaxeringen med georadarn.

Försöket gjordes om 1983 även denna gång längs linje 3. Stora träkors sattes upp för att förhindra en förskjutning i sidled mellan radar och flyg. Flygningen skedde en vecka senare än radarmätningen. Under tiden föll ca 8 mm i form av snö. Mätvärdena för de två delsträckorna om 21 km (snoweast) och 17 km (snowwest) redovisas i tabell 8. Där visas även medelvärdet av ca 30 stycken snörörsmätningar utefter vardera delsträcka som användes för att kalibrera georadarn.

Tabell 8. Jämförelse mellan vattenvärde beräknat på basis av gamma, radar och snörör för delsträckor av linje 3

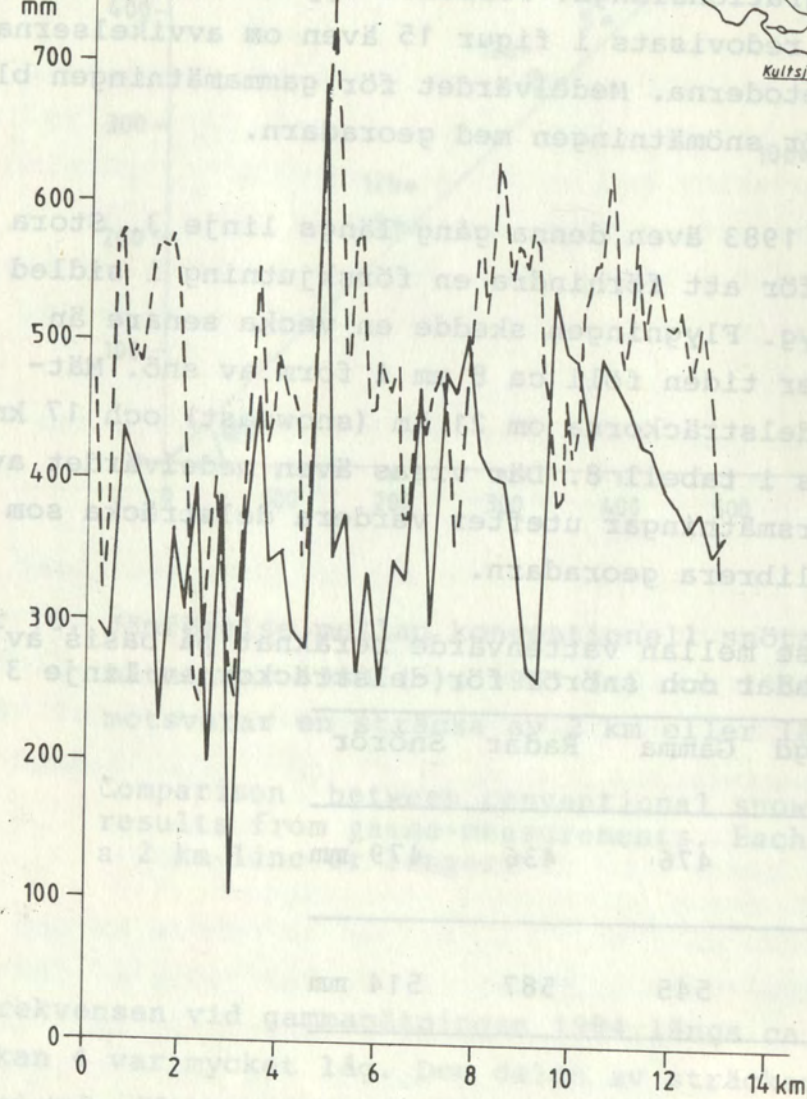
Linje	Längd km	Gamma	Radar	Snörör
3a, snoweast	21	476	436	479 mm
3b, snowwest	17	545	587	514 mm

1984 utfördes radarmätningar längs alla flyglinjer, där det var möjligt. I figurerna 17-19 redovisas exempel på resultaten från de två metoderna för linjerna 2, 4 och 7. Linje 1 återfinns i figur 15. Radarmätningen utfördes knappt en vecka före (olika för

olika linjer). Under den tiden föll några mm nederbörd i form av snö.

Flygvägen blir alltid kortare vid bruten terräng än skotervägen på marken, vilket gör att det kan bli en förskjutning mellan de båda resultaten i längsled.

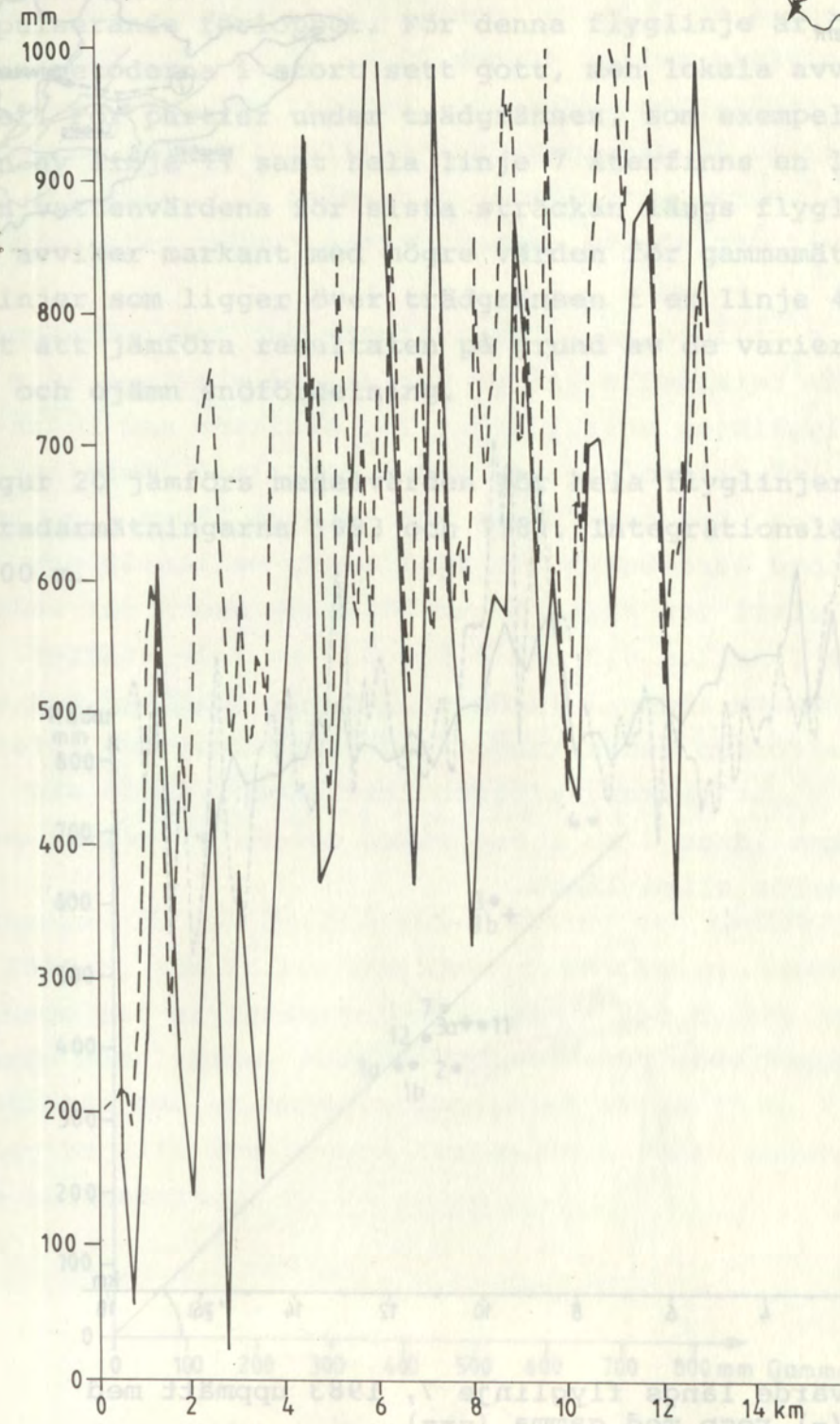
Water equivalent  
mm



Figur 17. Vattenvärde längs flyglinje 2, 1983, uppmätt med radar (-) resp. med gamma (---)

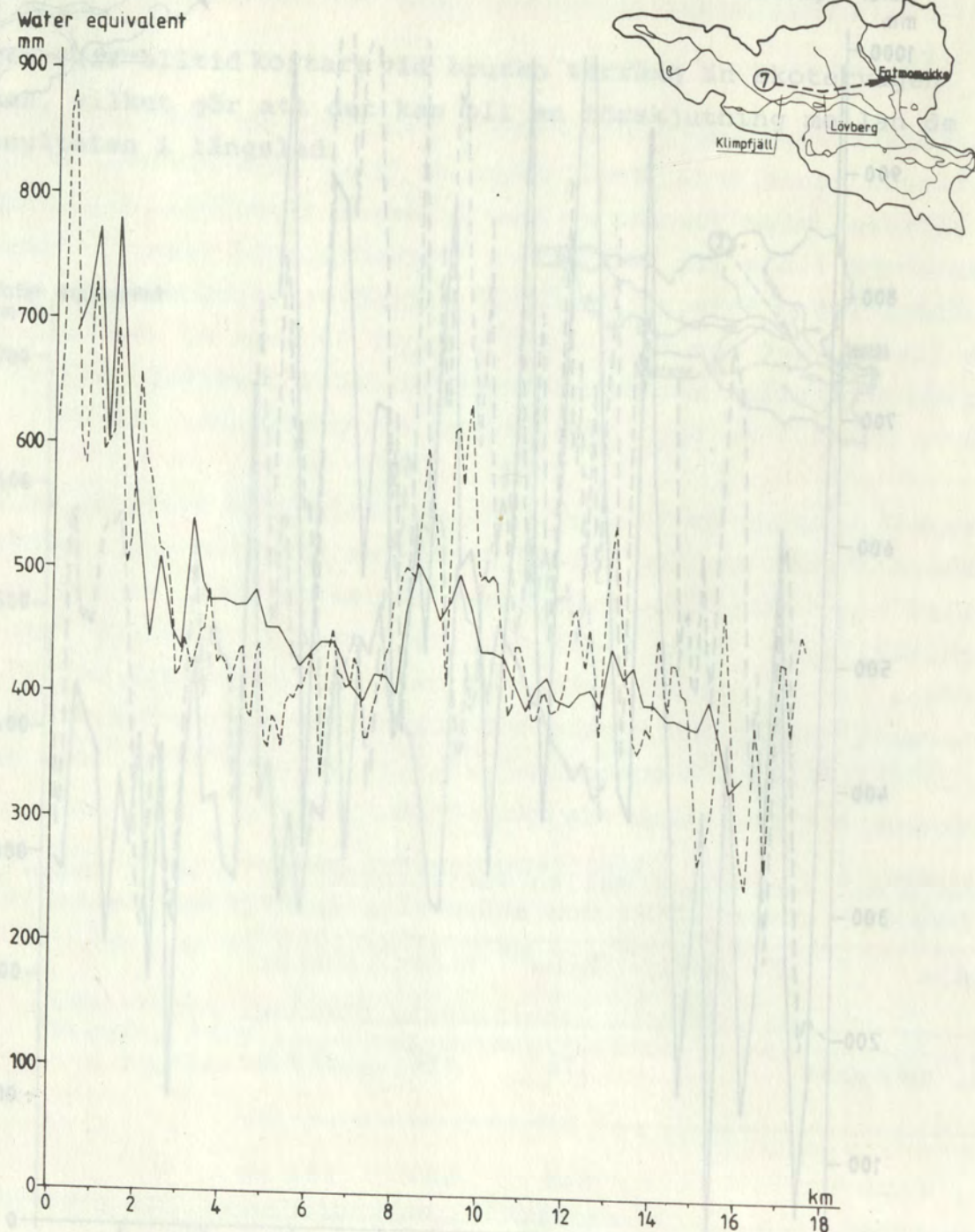
Water equivalent along flight line 2 measured with georadar (-) and with gamma (---).

Water equivalent  
mm



Figur 18. Vattenvärde längs flyglinje 4, 1983 uppmätt med radar (-) resp med gamma (---).

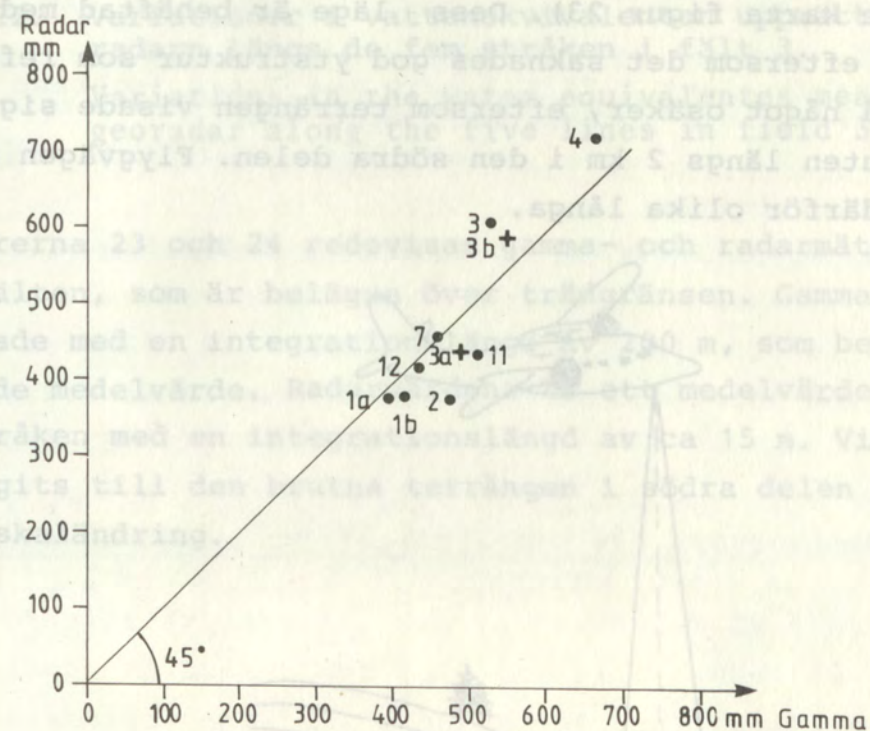
Water equivalent along flight line 4 measured with georadar (-) and with gamma (---).



Figur 19. Vattenvärde längs flyglinje 7, 1983 uppmätt med radar (-) resp med gamma (---).  
Water equivalent along flight line 7 measured with radar (-) and with gamma (---).

För flyglinje 7 återfinns samma trend med minskande snömängd mot öster. De första 3 km var snömängderna ojämna vilket märks på det pulserande förloppet. För denna flyglinje är överensstämmelsen mellan metoderna i stort sett gott, men lokala avvikelser förekommer. För partier under trädgränsen, som exempelvis sista delen av linje 11 samt hela linje 7 återfinns en likartad bild, medan vattenvärdena för sista sträckan längs flyglinje 2 genom skog avviker markant med högre värden för gammamätningarna. För de linjer som ligger över trädgränsen t ex linje 4 är det mycket svårt att jämföra resultaten på grund av de varierande snömängderna och ojämn snöfördelning.

I figur 20 jämförs medelvärden för hela flyglinjer mellan gamma- och radarmätningarna 1983 och 1984. Integrationslängd för gamma är 200 m.

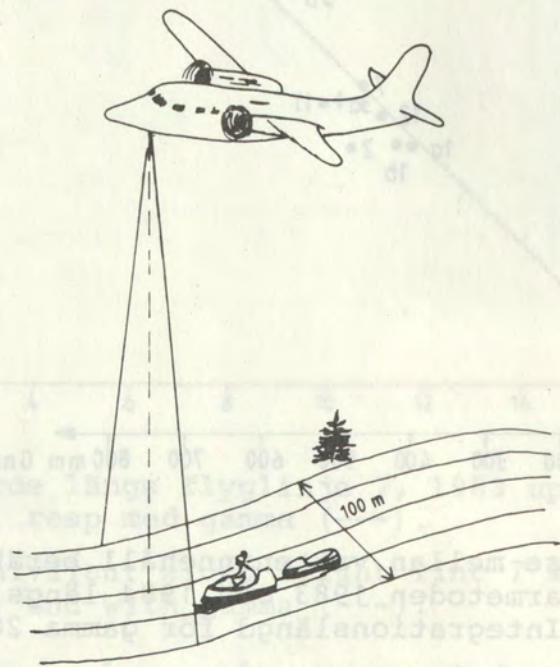


Figur 20. Jämförelse mellan vatteninnehåll beräknat med gamma- resp radarmetoden 1983 och 1984 längs olika flyglinjer. Integrationslängd för gamma 200 m.

Comparison between georadar- and gammameasurements of snow water equivalent for different flight lines 1983 and 1984.

Med undantag för flyglinje 3, 3b och 4 gav radarmätningarna genomgående lägre medelvärden. Differensen varierade mellan 5 och 95 mm. För flyglinje 3 och 4 med högsta uppmätta medelvärdena var radarmätningarnas medelvärde mellan 40 och 85 mm högre. Det kan bero på att det på de sträckorna förekommer partier med snömängder som överskrider den gräns då gammametodens tillförlitlighet minskar. Detta problem diskuteras utförligare i avsnitt 4.3. 1984 års värde för flyglinje 4 var det högsta, som uppmättes under hela projektet.

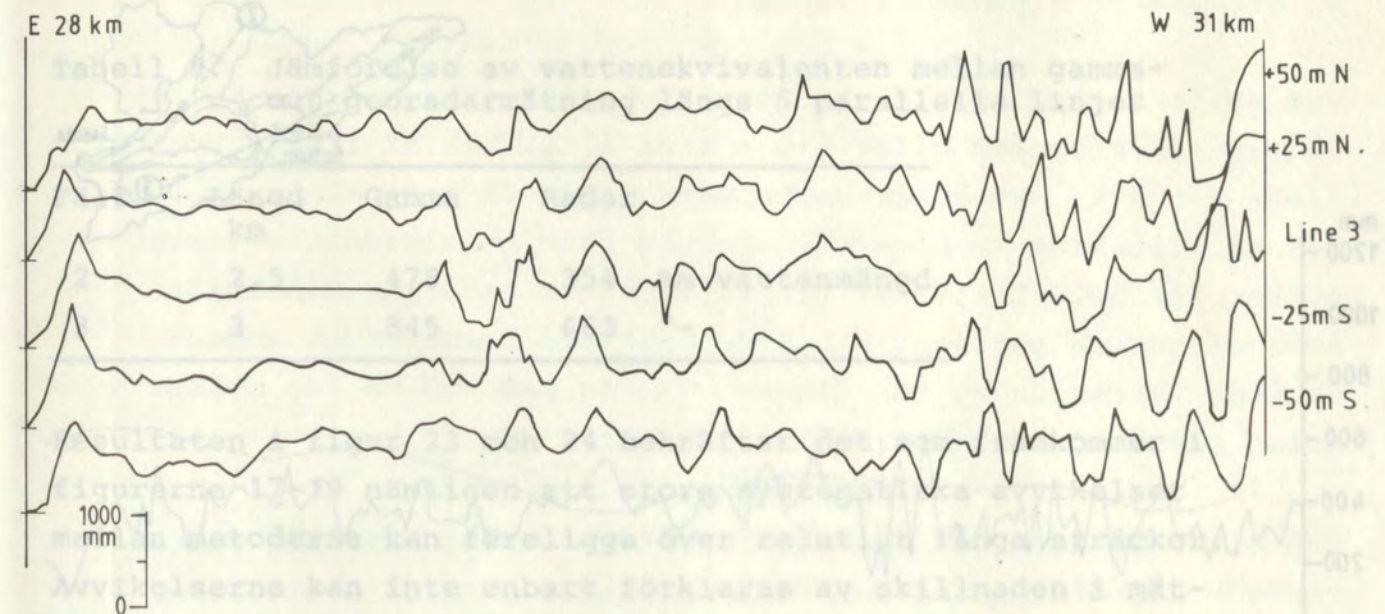
1984 genomfördes slutligen en intensivstudie med radarmätningar i två fält med fem parallella linjer med de två yttersta 50 m på var sida av flyglinjen enligt figur 21. Avsikten med radarmätningarna i de två fälten var att göra dessa mer jämförbara med gammamätningarna. Det ena fältet var beläget längs flyglinje 3 på högslätten nord Dåresbakko och Tjallingen mellan 28 och 31 km från flyglinjens start (se karta figur 23). Det andra var beläget utefter flyglinje 2 mellan 6,3 och 8,5 - 8,8 km från starten Makkentjakke (se karta figur 23). Dess läge är behäftad med en viss osäkerhet, eftersom det saknades god ytstruktur som referens. Längden är också något osäker, eftersom terrängen visade sig vara ytterst bruten längs 2 km i den södra delen. Flygvägen och skotervägen är därför olika långa.



Figur 21. Principskiss över gammamätning och radarmätning i fält vid intensivstudier 1984.

Schematic presentation of the gamma- and georadar-measurements along two 2,5 km fields in 1984.

I figur 22 redovisas vattenvärdesvariationer uppmätta med georadar längs den fem stråken i fältet utefter flyglinje 3.

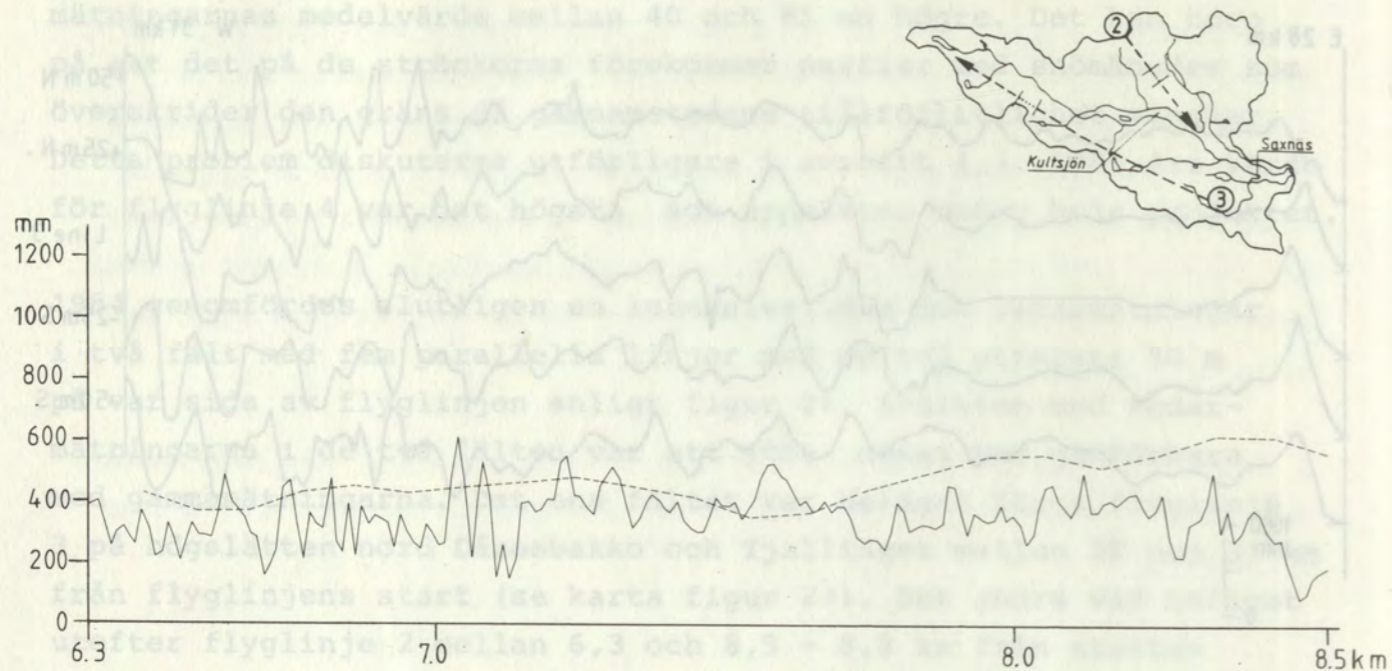


Figur 22. Variationer i vattenekvivalenten uppmätt med georadarn längs de fem stråken i fält 3.

Variations in the water equivalentes measured with georadar along the five lines in field 3.

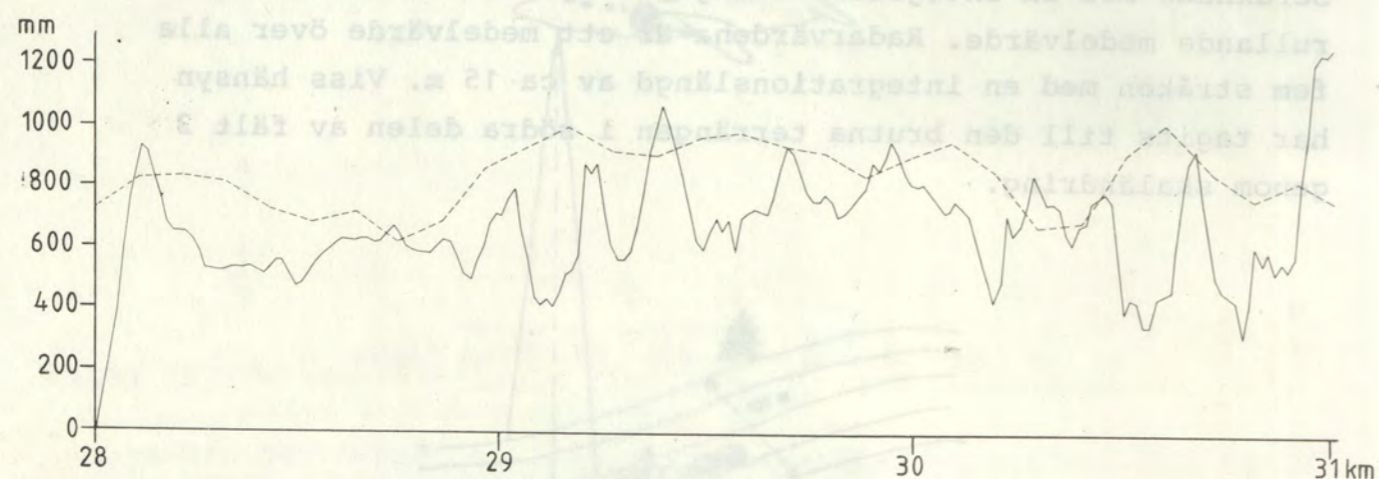
I figurerna 23 och 24 redovisas gamma- och radarmätningarna i de båda fälten, som är belägna över trädgränsen. Gammavärdena är beräknade med en integrationslängd av 200 m, som beräknas som rullande medelvärde. Radarvärdena är ett medelvärde över alla fem stråken med en integrationslängd av ca 15 m. Viss hänsyn har tagits till den brutna terrängen i södra delen av fält 2 genom skaländring.





Figur 23. Vattenekvivalent i fält 2 mätt med radar (—) resp gamma (---) vid intensivmätningar 1984.

Water equivalent in field 2 measured with radar (—) and gamma (---).



Figur 24. Vattenekvivalent i fält 3 mätt med radar (—) resp gamma (---) vid intensivmätningar 1984.

Water equivalent in field 3 measured with radar (—) and gamma (---).

Genomgående gav radarn lägre vattenvärden i fälten. Den större variationen längs fälten för radar beror på att gammametoden integrerar över en större yta.

Tabell 9. Jämförelse av vattnekvivalenten mellan gamma- och georadarmätning längs 5 parallella linjer 1984

Fält	Längd km	Gamma	Radar
2	2,5	478	354 mm vattenmängd
3	3	845	663 "-

Resultaten i figur 23 och 24 bekräftar det som framkommer i figurerna 17-19 nämligen att stora systematiska avvikelser mellan metoderna kan föreligga över relativt långa sträckor. Avvikelsen kan inte enbart förklaras av skillnaden i mätprincip eftersom de kvarstår i fält 2 och 3 där georadarn använts i fem parallella linjer kring flyglinjen. Avvikelsen minskar naturligtvis med ökande jämförelsesträcka men även den jämförelse baserad på hela flyglinjer som redovisas i figur 20 visar stor spridning.

Om areellt medelvärde beräknas på grundval av gammamätningar resp georadarmätningar för de sju flyglinjerna 1984 erhålls 497 mm resp 507 mm. Medelvärdesberäkningen bygger enbart på de sträckor av flyglinjerna som båda metoderna mätt (107 km). Skillnaden är alltså ca 2%.

#### 4.3 Gammametodens tillförlitlighet vid stora snömängder

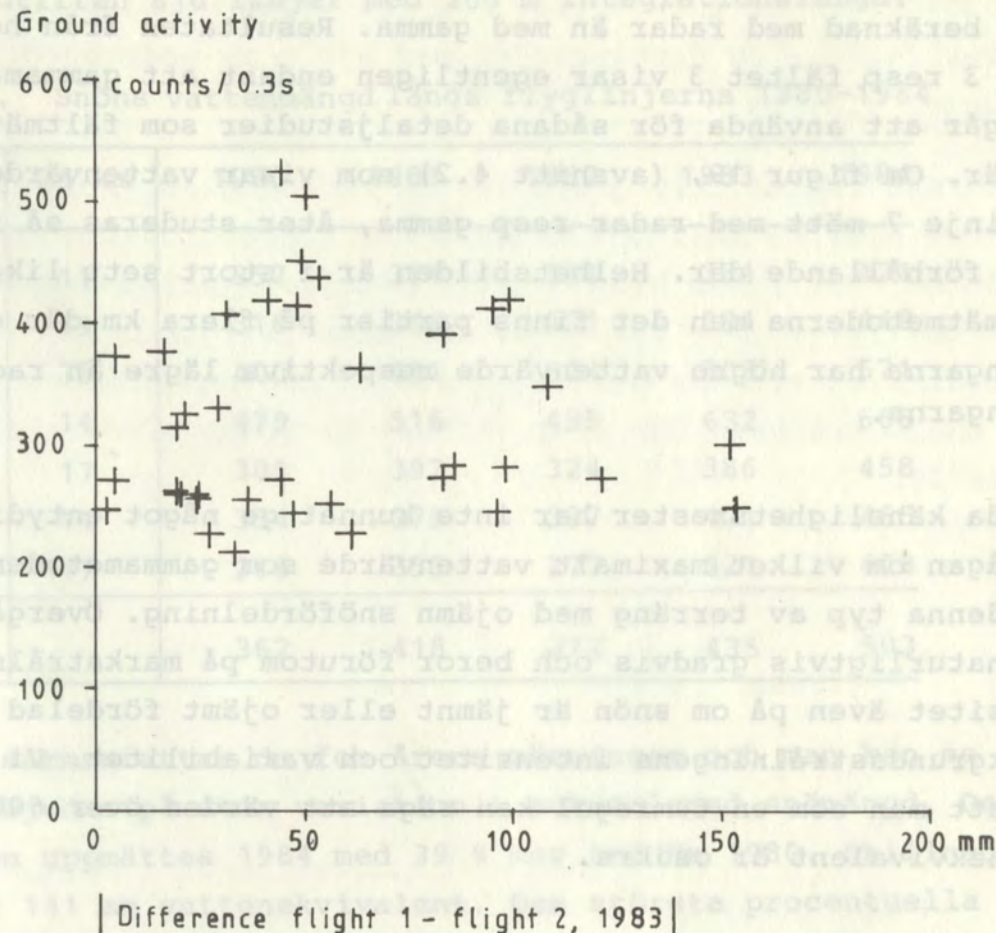
När snötäcket är mäktigt, dvs vattenvärdet är högt, dämpas gammastrålningen så mycket att pulserna blir mycket få och kan ge helt felaktiga resultat. Gränsen för tillförlitliga mätresultat beror på barmarksstrålningens och bakgrundstrålningens intensitet. Inom detta projekt har vi arbetat med att försöka hitta en gräns för vilka vattenvärden som kan accepteras vid bearbetningen. Tveit (1980) anger en gräns vid 600 mm, men anger inte något underlag för värdet. I en rysk rapport (Nikiforov, 1980) anges noggrannheter på 10-15 % för 2 000 - 5 000 mm vattenvärde. Mätningarna i fjällen sker då med heli-

kopter på låg höjd, vilket naturligtvis ger helt andra möjligheter än ett snabbt flygande flygplan.

Vid varje flygtillfälle har det förekommit sträckor med mycket låga pulsfrekvenser eller t o m inga alls. Det är främst utefter linje 3 och 4. Uträknade vattenvärden har då i regel legat över 800 mm. Eftersom de höga värdena påverkar medelvärdet relativt mycket för hela linjen är det viktigt att veta hur man skall behandla dessa partier. Utgår de helt vid beräkningen underskattas vattenvärdet för linjen. Tas de med kan de öka osäkerheten för linjens medelvärde.

Två olika metoder har använts för att bestämma maximalt vattenvärde - dubbelflygning och radarmätningar i fält. I figurerna 13 och 14 återfinns plottningar av resultat från två dubbelflygningar längs en linje resp för alla linjer. Med en integrationslängd på 200 m var spridningen stor mellan flygningarna. Vid 2 km integrationslängd blev sambandet bättre även vid höga vattenvärden, vilket skulle tala för att vattenvärden även över 800 mm skulle kunna klaras av vid någorlunda stark barmarksstrålning. Det finns dock en risk med en test som utgår ifrån samma mätmetodik, eftersom felkällorna kan upprepa sig.

I figur 25 redovisas en test för att studera betydelsen av barmarksstrålningens intensitet på osäkerheten hos vattenvärdena. Där har absolutbeloppet av skillnaden mellan flygning 1 och 2, 1983 plottats mot barmarksstrålningen för alla vattenvärden större än 500 mm (integrationslängd 1 km). Värdena har hämtats från samtliga linjer. Partier med barmarksstrålning som understiger ca 175 registreringar/0,3 s har uteslutits vid samtliga bearbetningar av linjernas vattenvärde. Resultatet ger inget entydigt samband mellan barmarksstrålning och avvikelse mellan flygning 1 och flygning 2.



Figur 25. Spridning av vattenvärdena vid olika intensitet hos barmarksstrålningen för vattenekvivalenter överstigande 500 mm för alla linjer. Spridningen anges som differensen i mm mellan flygning 1 och 2 1983 med 1 000 mm integrationslängd.

The difference between flight no 1 and no 2 of observation of snowpacks exceeding 500 mm as a function of bare ground activity. All lines, 1 000 mm integration length.

1984 gjordes ett nytt försök att bestämma maximalt vattenvärde genom att jämföra med radarmätningar i fält (se avsnitt 4.2).

I figur 23 och 24 redovisas vattenvärdena mätta med gamma resp radar för de två fälten. Som tidigare nämnts ligger radarvärdena vid detta tillfälle genomgående lägre än gammavärdena. Vid 900 mm vattenvärde för fält 3 var pulsfrekvensen ca 5 registreringar/0,3 s och vid 800 mm ca 7 registreringar/0,3 s. Barmarksstrålningen var tyvärr relativt låg inom fältet. Det varierade mellan 260 och 400 registreringar/0,3 s. Av figur 20, där

medelvärden för hela flyglinjer beräknade med gamma resp radar jämförs, framgår att för flyglinjerna 3 och 4 blev vattenvärdet högre beräknad med radar än med gamma. Resultaten från hela flyglinje 3 resp fältet 3 visar egentligen endast att gammamätningar inte går att använda för sådana detaljstudier som fältmätningarna innebär. Om figur 19, (avsnitt 4.2) som visar vattenvärdet längs flyglinje 7 mätt med radar resp gamma, åter studeras så framgår samma förhållande där. Helhetsbilden är i stort sett lika för båda mätmetoderna men det finns partier på flera km där gammamätningarna har högre vattenvärde respektive lägre än radar-mätningarna.

Utförda känslighetstester har inte kunnat ge något entydigt svar på frågan om vilket maximalt vattenvärde som gammametoden klarar av i denna typ av terräng med ojämn snöfördelning. Övergången sker naturligtvis gradvis och beror förutom på markstrålningens intensitet även på om snön är jämnt eller ojämnt fördelad samt på bakgrundsstrålningens intensitet och variabilitet. Vi anser dock att man som en tumregel kan säga att värden över 600-800 mm vattenekvivalent är osäkra.

#### 4.4 Areellt medelvärde av snöns vatteninnehåll

De första tre åren, 1980-1982, utnyttjades 12 - 13 flyglinjer för att beräkna det areella medelvärdet. Några av de ursprungliga 16 flyglinjerna utgick av olika skäl. 1983 och 1984 flögs endast 7 av linjerna för att bereda plats för ett antal tester, såsom dubbelflygningar inom projektet. Dessutom plockades sträckor med låg barmarksstrålning bort från linjerna. Låg barmarksstrålning uppstår t ex vid stort inslag av våtmarker. Främst berör det linje 1 som halverades och linje 11, som förkortades med flera km. Vid mycket låg pulsfrekvens på vintermätningen, när gamma-metoden befinner sig vid sin övre mätgräns och osäkerheten är stor, har värdet ersatts mot ca 800 mm. Det kan ge en under-skattning av medelvärdet för främst linje 4 och linje 3.

Det areella medelvärdet har beräknats med en integrationslängd av 200 m. Linjernas värde har viktats mot respektive längd.

I tabell 10 återfinns det areella medelvärdet för åren 1980-1984 beräknat utifrån sju linjer med 200 m integrationslängd.

Tabell 10. Snöns vattenmängd längs flyglinjerna 1980-1984

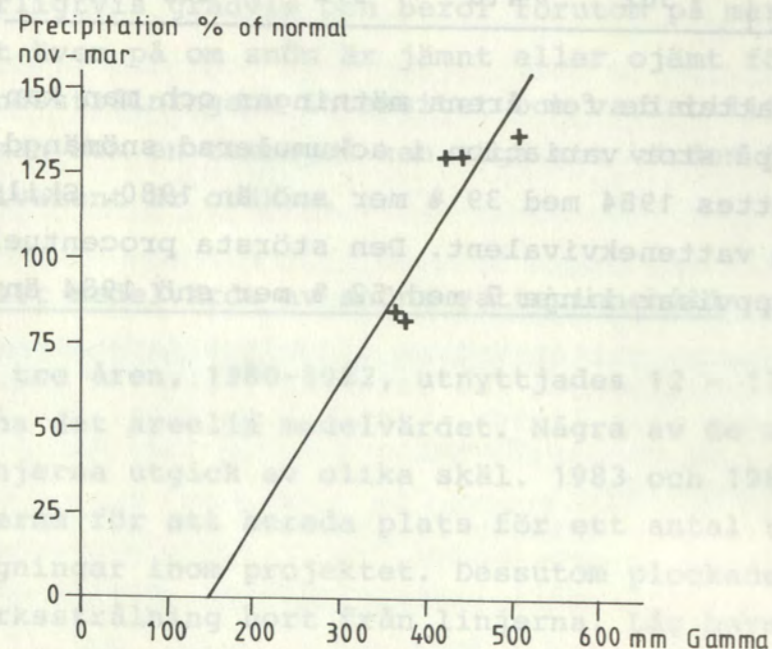
Flyglinje	Ca km	1980	1981	1982	1983	1984
1	11	357	371	371	384	421
2	19	316	366	351	384	448
3	35	400	481	424	503	571
4	14	479	516	495	632	666
7	17	301	397	324	386	458
11	11	354	379	397	421	465
12	17	316	353	277	321	428
Medel- värde		362	418	372	435	503

Tabellen sammanfattar de fem årens mätningar och man kan se att perioden bjuder på stor variation i ackumulerad snömängd. Den mesta snön uppmättes 1984 med 39 % mer snö än 1980. Skillnaden motsvarar 141 mm vattenekvivalent. Den största procentuella variabiliteten uppvisar linje 7 med 52 % mer snö 1984 än 1980.

5. VERIFIERING AV GAMMAMETODEN MED HJÄLP AV NEDERBÖRD OCH  
TILLRINNING SAMT HYDROLOGISK MODELLBERÄKNING

5.1 Verifiering av gammametoden med hjälp av nederbörds­mätningar under vintern

Nederbörden ligger till grund för de hydrologiska prognoser som idag levereras av SMHI med såväl enkla regressionssamband (Häggström, 1982) som hydrologiska modeller (HBV-modellen, Bergström, 1976). Det ligger därför nära till hands att jämföra de erhållna resultaten med gammametoden med den summerade uppmätta snönederbörden för resp vinter. En sådan jämförelse visas i figur 26.

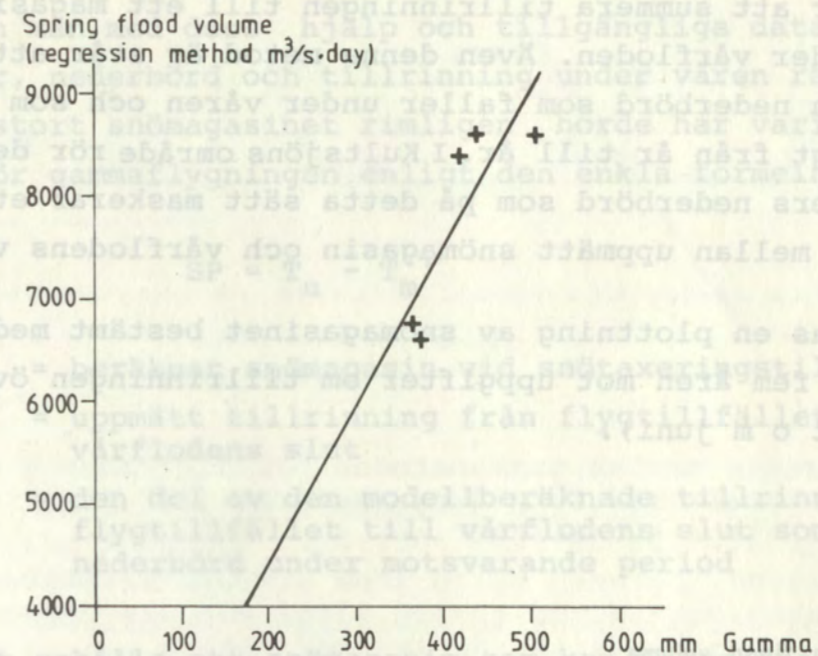


Figur 26. Jämförelse mellan gammametoden och nederbörd under nov-mars i procent av normalt (7 flyglinjer, 200 m integrationslängd).

Comparison between basin snow storage estimated by the gamma-method and winter precipitation during Nov-March.

Figuren visar inget övertygande samband och är svårtolkat eftersom vi inte med säkerhet kan säga hur väl nederbörden beskriver snömagasinets storlek om vi inte tar hänsyn till vinterns till-

ringning. Det kan ju ha inträffat smältperioder och flöden som minskat snömagasinet. Denna hänsyn tas i de prognoser som räknas fram med regressionsmetoden och som utnyttjas i en ny jämförelse i figur 27.



Figur 27. Jämförelse mellan gammametoden och prognoser enligt regressionsmetoden (7 flyglinjer, 200 m integrationslängd).

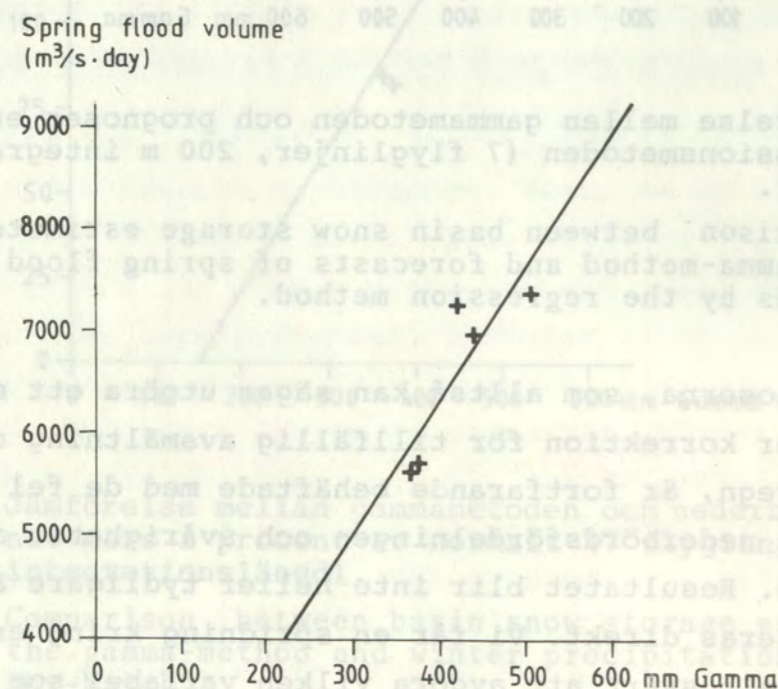
Comparison between basin snow storage estimated by the gamma-method and forecasts of spring flood volumes by the regression method.

Regressionsprognoserna, som alltså kan sägas utgöra ett mått på nederbörden efter korrektion för tillfällig avsmältning och eventuella höstregn, är fortfarande behäftade med de fel som orsakas av ojämn nederbördsfördelningen och svårigheter att mäta snöfall m m. Resultatet blir inte heller tydligare än om nederbörden studeras direkt. Vi får en spridning kring en linje men har helt enkelt svårt att avgöra vilken variabel som har det största felet.

## 5.2 Verifiering av gammametoden med hjälp av tillrinning och hydrologisk modellberäkning

I de föregående avsnitten har vi försökt att verifiera gammamätningarna mot mätningar av snömagasinet på marken eller mot nederbörden. Det ger en något oklar bild eftersom samtliga metoder lider av osäkerheter som vi trots intensiva mätningar inte helt kan klarlägga. Ytterligare en metod att uppskatta snömagasinet i ett område är att summera tillrinningen till ett magasin eller avrinningen under vårfloden. Även denna metod är svår att använda på grund av den nederbörd som faller under våren och som kan variera kraftigt från år till år. I Kultsjöns område rör det sig om ca 3½ månaders nederbörd som på detta sätt maskerar ett eventuellt samband mellan uppmätt snömagasin och vårflodens volym.

I figur 28 visas en plottning av snömagasinet bestämt med gammametoden för de fem åren mot uppgifter om tillrinningen över vårfloden (maj - t o m juni).



Figur 28. Plottning av gammametodens snömagasin mot uppmätt tillrinning till Kultsjön under maj t o m juni (7 flyglinjer, 200 m integrationslängd).

Comparison between snow-storage estimated by the gamma-method and the measured spring flood volume.

Resultatet är inte entydigt och kan egentligen inte användas för att dra några säkra slutsatser om gammametoden utan en noggrann analys av vårens nederbördsförhållanden och deras inverkan på avrinningen.

För att få kontroll över bidraget från den nederbörd som fallit under våren kan en avrinningsmodell användas. Om man antar att modellen på ett någorlunda riktigt sätt beskriver avrinningsförloppet kan man med dess hjälp och tillgängliga data över lufttemperatur, nederbörd och tillrinning under våren räkna sig fram till hur stort snömagasinet rimligen borde ha varit vid tidpunkten för gammaflygningen enligt den enkla formeln:

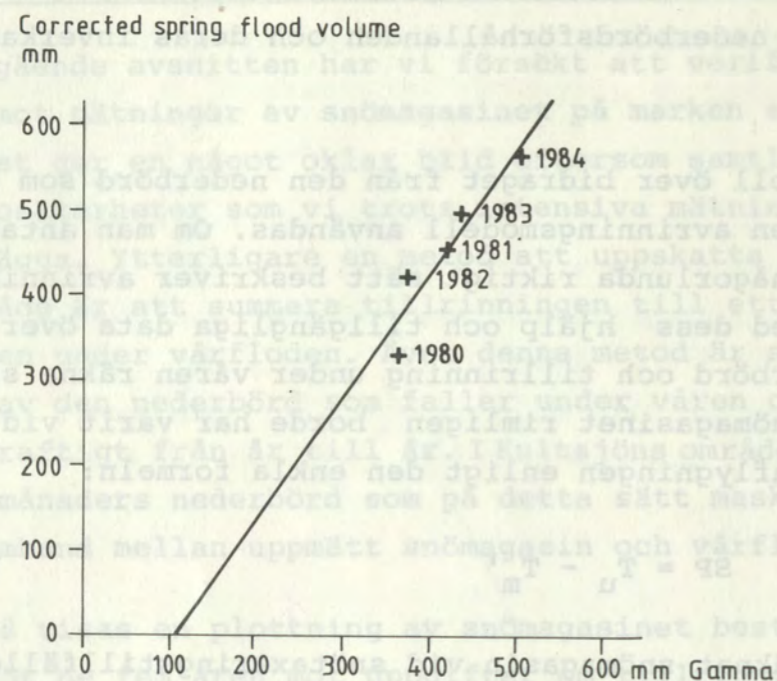
$$SP = T_u - T_m' \quad (2)$$

där: SP = beräknat snömagasin vid snötaxeringstillfället  
 $T_u$  = uppmätt tillrinning från flygtillfället till vårflodens slut  
 $T_m'$  = den del av den modellberäknade tillrinningen från flygtillfället till vårflodens slut som beror på nederbörd under motsvarande period

På så sätt erhålls ett snömagasin som kan betraktas som sant åtminstone i så måtto att uppskattat snömagasin, beräknat bidrag från vårens nederbörd och uppmätt tillrinning stämmer överens.

Det är vår uppfattning att denna metod att bestämma snön vid flygtillfället är betydligt säkrare än att utgå ifrån nederbördssumman under vintern eller enbart tillrinning under våren. Osäkerheten ligger främst i modellens förmåga att omräkna vårens nederbörd till tillrinning samt i mätningen av nederbörd och tillrinning.

På ovan beskrivna sätt har tillrinningsdata och HBV-modellen använts för att räkna fram det snömagasin som gällde vid varje gammaflygning under femårsperioden. I figur 29 jämförs detta med det snömagasin som flygningarna ger.



Figur 29. Jämförelse mellan gammametoden och tillrinning under våren korrigerad för vårens nederbörd (7 flyglinjer, 200 m integrationslängd).

Comparison between basin snow storage estimated by the gamma-method and spring flood volumes corrected for the precipitation during the spring.

Som framgår av figuren föreligger ett samband som är betydligt bättre än det som erhöles med uppmätt nederbörd (figur 26) eller tillrinning (figur 28). Relationen kan uttryckas i följande form:

$$S_s = S_{\text{gamma}} \cdot 1.46 - 156 \quad (3)$$

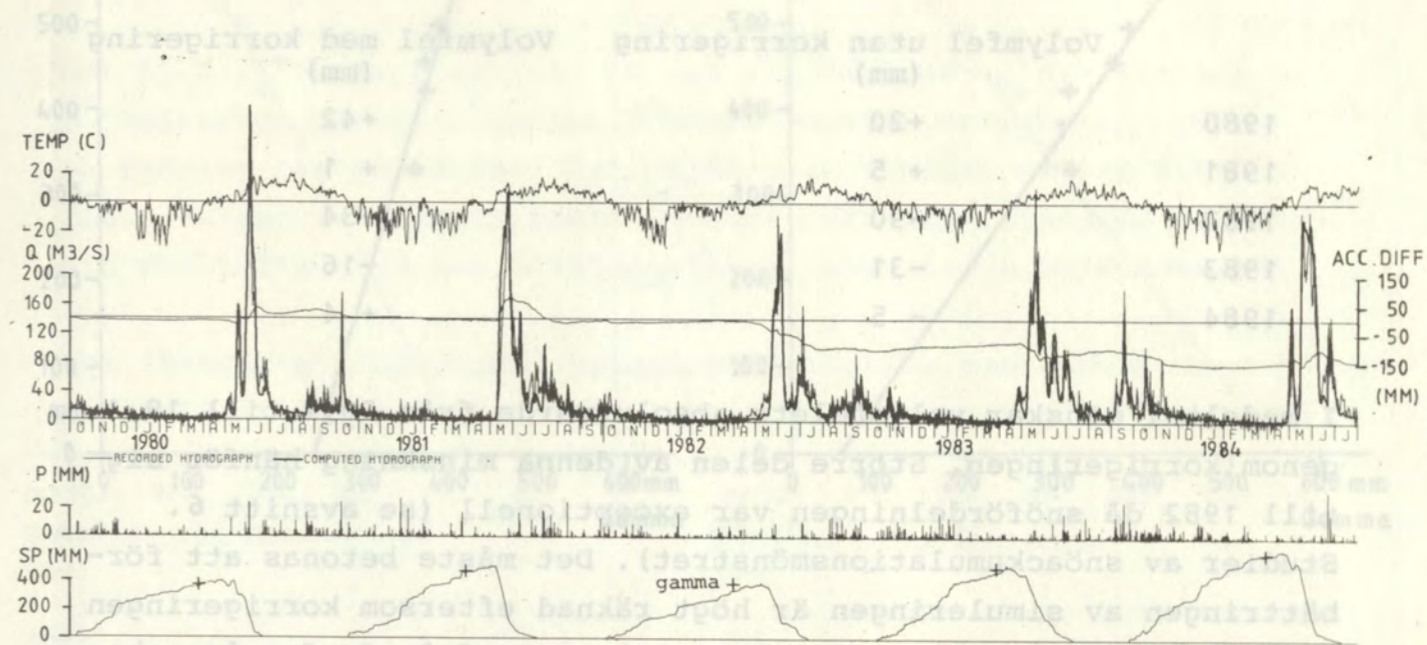
där:  $S_s$  = det snömagasin som ger volymriktig simulering med HBV-modellen

$S_{\text{gamma}}$  = det snömagasin som erhålls med de sju flyglinjerna

Det bör betonas att fem punkter är ett mycket litet material för att fastlägga ett samband av denna typ och att osäkerheten därför blir stor. Dessutom får sambandet inte extrapoleras alltför långt utanför de punkter som de grundar sig på.

För att ge en känsla för hur mycket gammametoden skulle kunna påverka en prognos med HBV-modellen har ett snömagasin enligt

ekvation 3 lagts in i en modellsimulering med HBV-modellen över de fem åren i figur 30.



Figur 30. Simulering av snömagasin och tillrinning med HBV-modellen för Kultsjön 1980-1984 samt snömagasin uppskattat med gammametoden.

Results of simulations of snowpack and reservoir inflow to the Kultsjön-basin and snowpack estimated by the gamma-method.

- TEMP = mean daily air temperature
- P = daily total precipitation
- SP = computed snowpack (mm water equivalent)
- + = computed snowpack with the gamma-method
- Q = runoff
- Thick line = simulation
- Thin line = observation
- Acc.diff = accumulated volume error of the model

Figur 30 visar exempelvis att gammametoden skulle inneburet en höjning av modellens snömagasin 1982 då modellen kraftigt underskattade vårfloden (jämför ACC.DIFF-kurvan över vårfloden med + tecknets avvikelse från beräknat snömagasin).

I tabell 11 sammanfattas simuleringselet över vårfloden med HBV-modellen för de fem åren med och utan korrigering av snömagasinet enligt ekvation 2.

Tabell 11. Sammanfattning av effekten av korrigering av snömagasinet i HBV-modellen med hjälp av gammamätningar. Volymfelet är beräknat från flygtillfället till vårflodens slut.

	Volymfel utan korrigering (mm)	Volymfel med korrigering (mm)
1980	+20	+42
1981	+ 5	+ 1
1982	-90	-34
1983	-31	-16
1984	- 5	+ 4

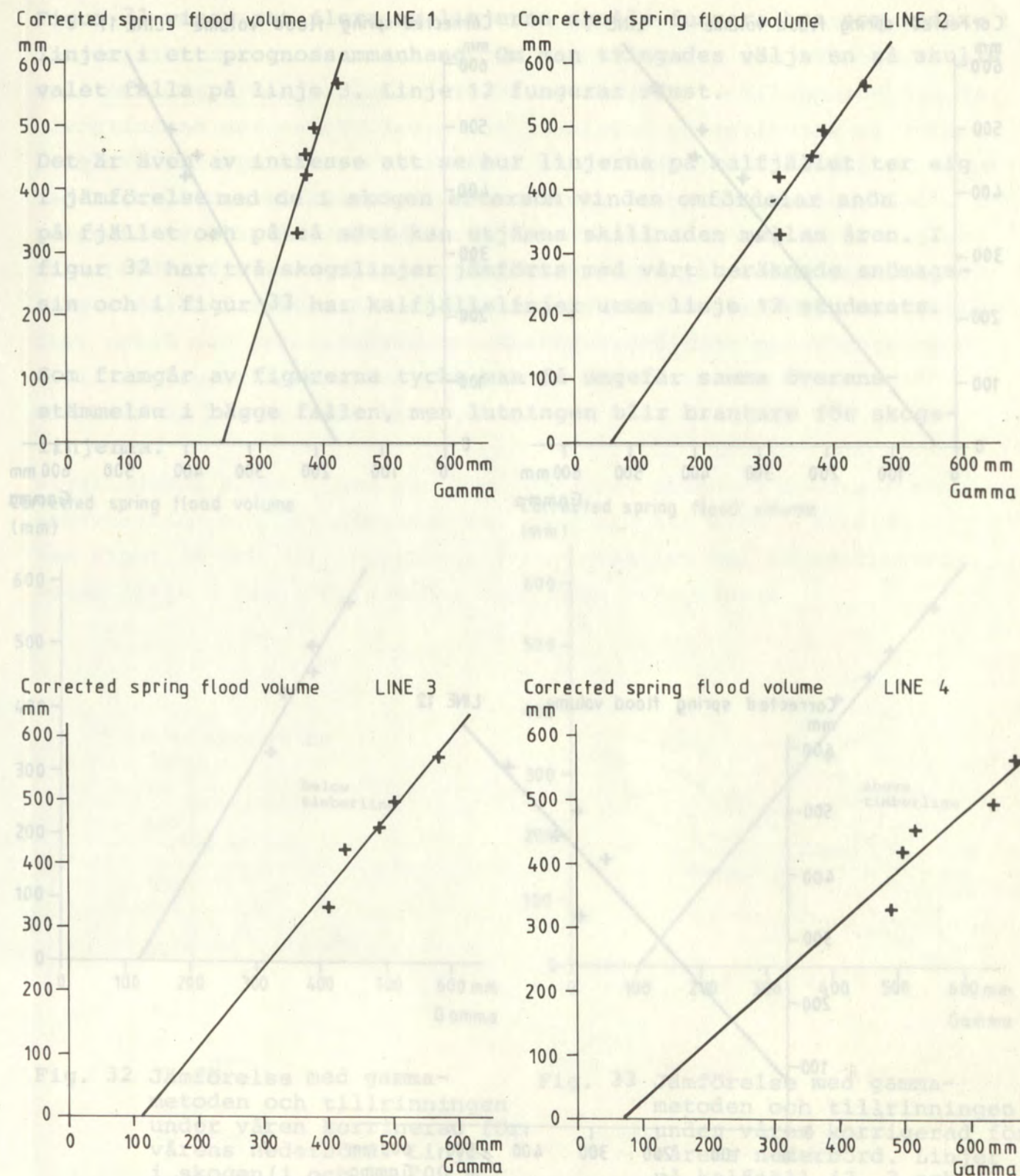
I medeltal minskar volymfelets absolutvärde från 30,2 till 19,4 mm genom korrigeringen. Större delen av denna minskning hänförs till 1982 då snöfördelningen var exceptionell (se avsnitt 6. Studier av snöackumulationsmönstret). Det måste betonas att förbättringen av simuleringen är högt räknad eftersom korrigeringen inte utgör ett oberoende datamaterial. Data från de fem åren har ju använts till att fastlägga det samband som vi använder vid korrigeringen.

Sammanfattningsvis kan sägas att gammametoden ger ett värde på snömagasinet som efter justering stämmer väl med det snömagasin som framräknats ur tillrinningsdata efter korrektion för nederbörden under våren.

Om det funna sambandet används för att uppdatera HBV-modellen vid en simulering så minskar volymfelet över vårfloden signifikant för 1982 och möjligen för 1983. För 1980 ökar volymfelet.

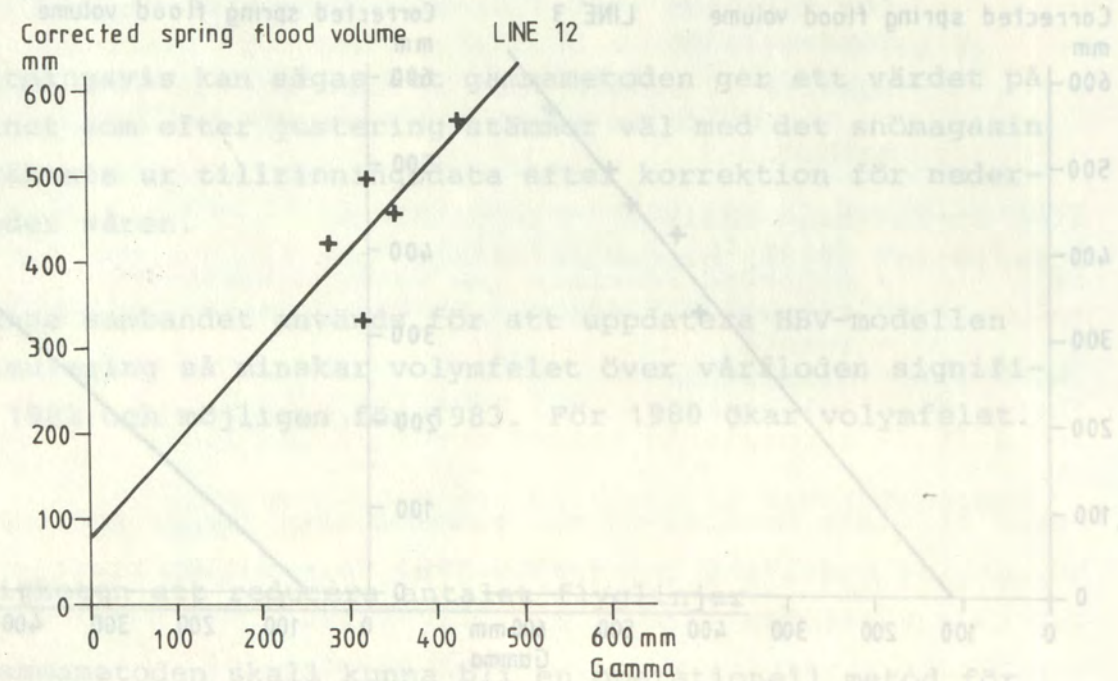
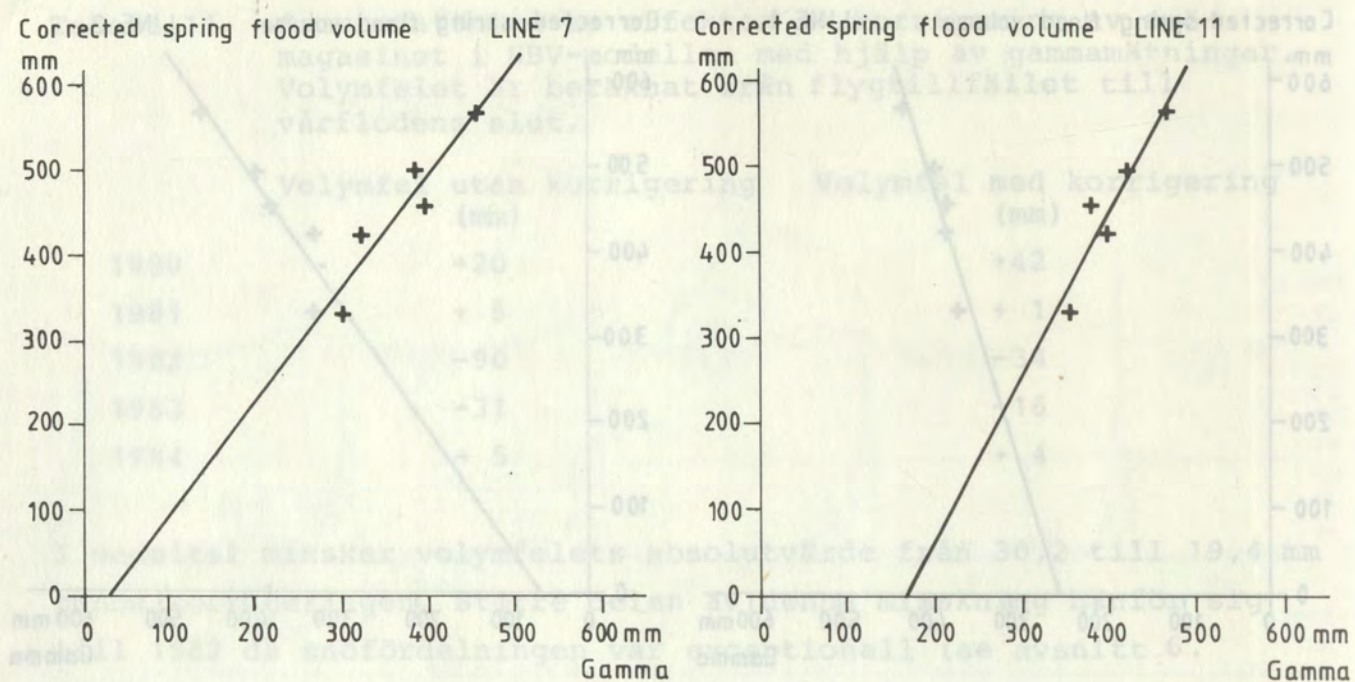
### 5.3 Möjligheten att reducera antalet flyglinjer

För att gammametoden skall kunna bli en operationell metod för hydrologisk prognosering är det nödvändigt att kunna reducera flygsträckan i varje enskild prognosområde. Detta innebär att flyglinjerna betraktas som indexlinjer och ger ett relativt mått på snömängden. I figur 31 visas därför ett samband mellan varje linje för sig och det snömagasin som bestäms av tillrinningsdata och HBV-modellen enligt föregående avsnitt.



Figur 31. Jämförelse mellan snömängd längs resp flyglinje mätt med gamma-metoden och tillrinning under våren korri-gerad för vårens nederbörd (200 m integrationslängd).

Comparison between snow storage along the individual flight lines measured by the gamma-method and the spring flood volume corrected for precipitation during the spring.



Figur 31. Jämförelse mellan snömängd längs resp flyglinje mätt (forts) med gamma-metoden och tillrinning under våren korrigerad för vårens nederbörd (200 m integrationslängd). Comparison between snow storage along the individual flight lines measured by the gamma-method and the spring flood volume corrected for precipitation during the spring.

Figur 31 visar att flera av linjerna skulle fungera bra som indexlinjer i ett prognossammanhang. Om man tvingades välja en så skulle valet falla på linje 3. Linje 12 fungerar sämst.

Det är även av intresse att se hur linjerna på kalvfjället ter sig i jämförelse med de i skogen eftersom vinden omfördelar snön på fjället och på så sätt kan utjämnas skillnaden mellan åren. I figur 32 har två skogslinjer jämförts med vårt beräknade snömagsin och i figur 33 har kalvfjällslinjer utom linje 12 studerats. Som framgår av figurerna tycks man få ungefär samma överensstämmelse i bägge fallen, men lutningen blir brantare för skogslinjerna.

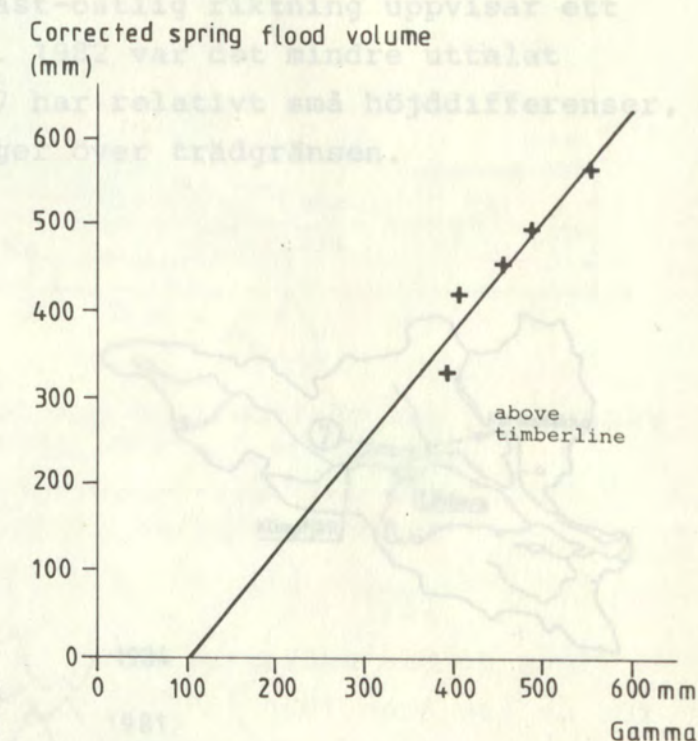
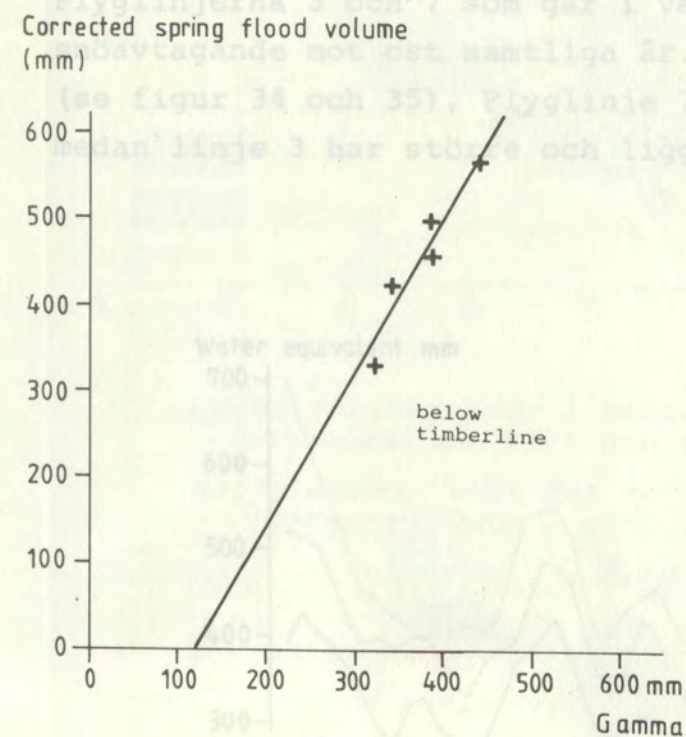


Fig. 32 Jämförelse med gamma-metoden och tillrinningen under våren korrigerad för vårens nederbörd. Linjer i skogen (1 och 7) 200 m integrationslängd.

Comparison between snow storage below the timberline (flight lines 1 and 7) measured by the gamma-method and the spring flood volume corrected for precipitation during the spring.

Fig. 33 Jämförelse med gamma-metoden och tillrinningen under våren korrigerad för vårens nederbörd. Linjer på kalvfjäll (2, 3 och 4), 200 m integrationslängd.

Comparison between snow storage above the timberline (flight lines 2, 3 and 4), measured by the gamma-method and the spring flood volume corrected for precipitation during the spring.



I figurerna 29, 31-33 avviker 1980 års mätningar markant och det är också 1980 som gamma-metoden skulle ha inneburit en försämring av prognosmodellen (tabell 11). Eftersom avvikelserna berör samtliga linjer är snedflygning utesluten som orsak. Felet kan naturligtvis bero på tillfälliga förändringar i bakgrundsstrålningen eller fel i modellens simulering av tillskottet till vårfloden under våren, men det är heller inte helt uteslutet att de senare årens mätningar inneburit en systematisk förändring. En analys av HBV-modellens beräknade markfuktighet vid de olika mättillfällena ger ingen antydning om att 1980 skulle kunna avvika.

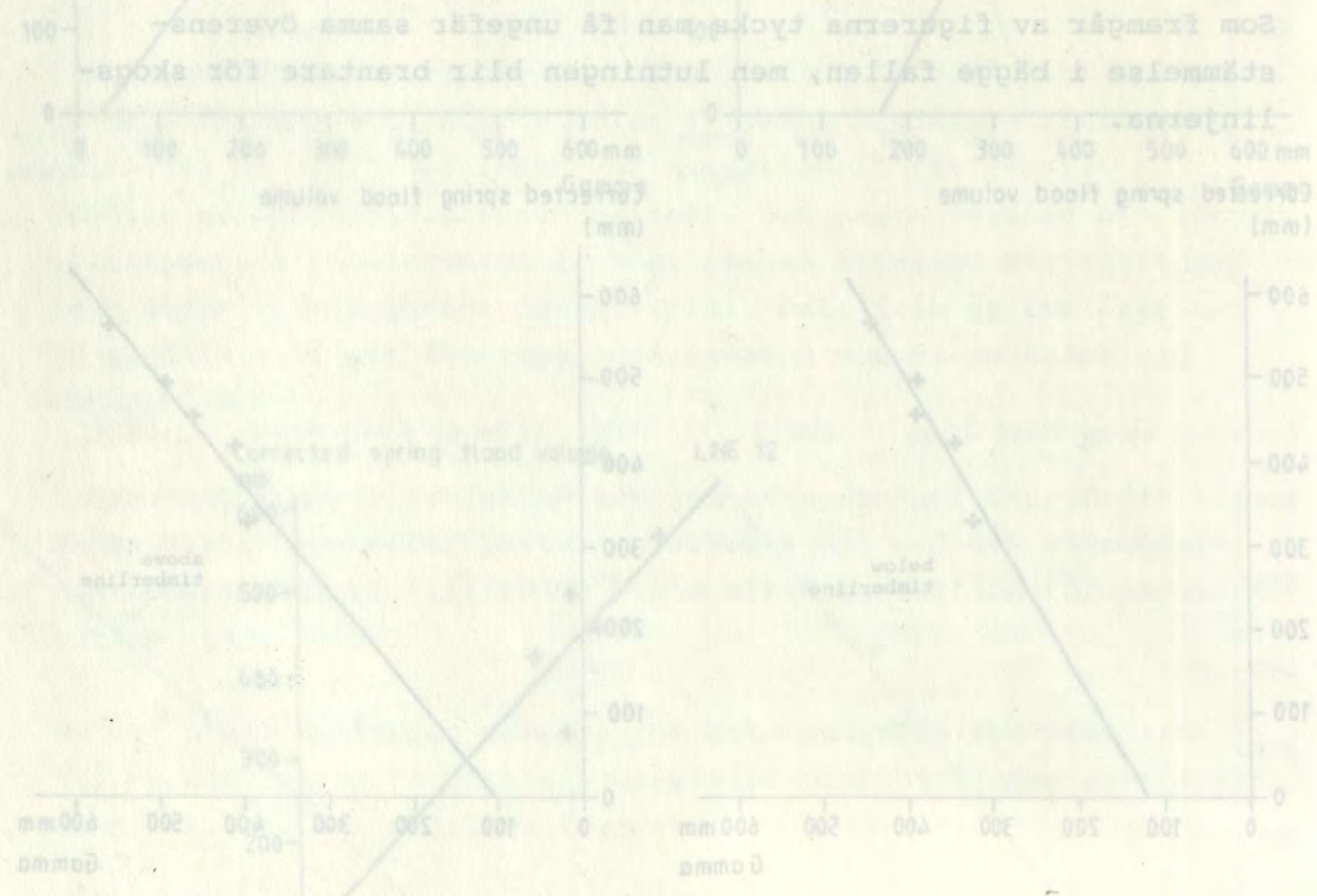


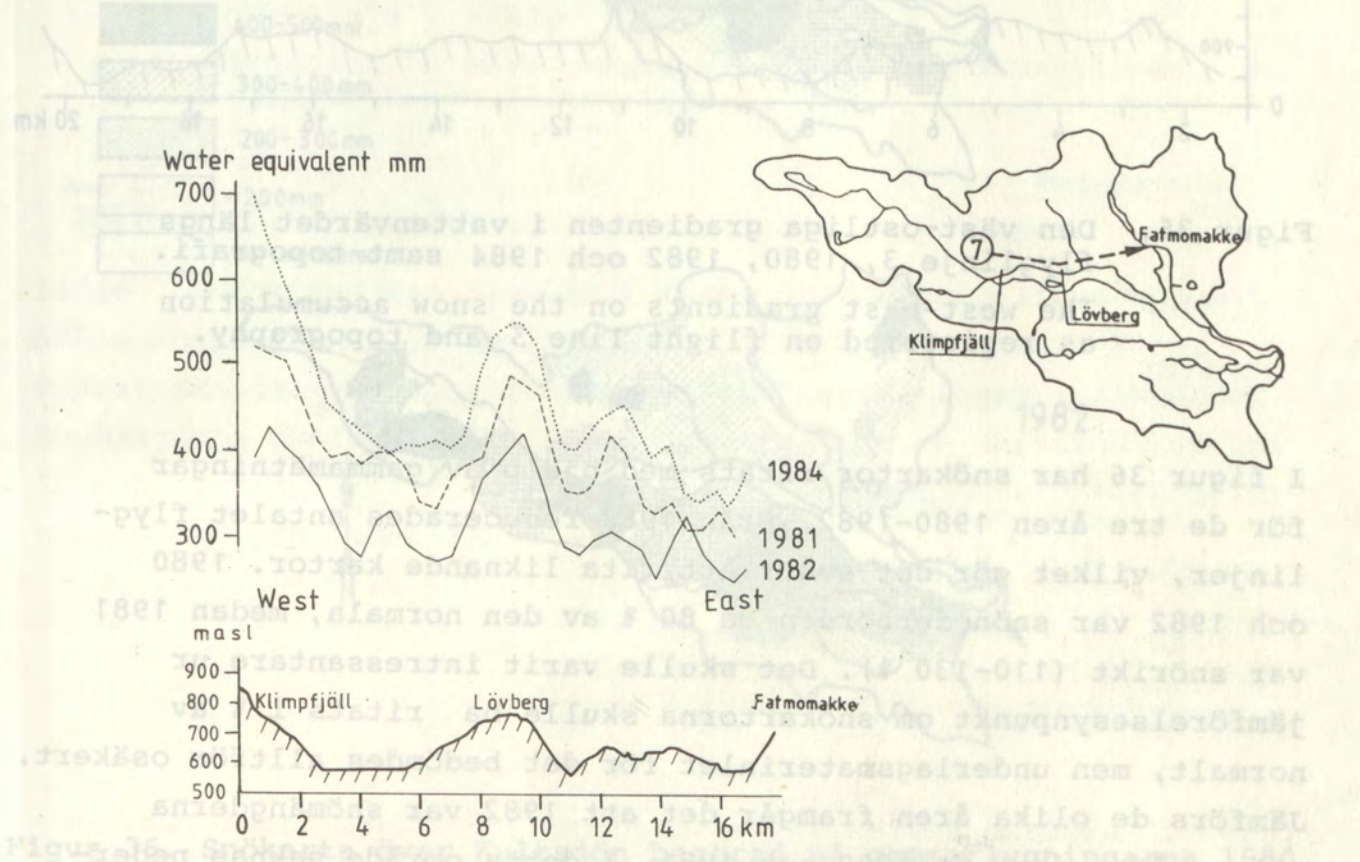
Fig. 33 Jämförelse med gamma-metoden och tillräckningen under våren korrekterad för vårens nederbörd. Linjer i skogen (1 och 2) och i åkogen (3 och 4). 300 m intraktionslängd. Jämförelse mellan mätning och beräkning av vattenvärde i våren korrekterad för vårens nederbörd. Linjer i skogen (1 och 2) och i åkogen (3 och 4). 300 m intraktionslängd. Jämförelse mellan mätning och beräkning av vattenvärde i våren korrekterad för vårens nederbörd. Linjer i skogen (1 och 2) och i åkogen (3 och 4). 300 m intraktionslängd.

## 6. STUDIER AV SNÖACKUMULATIONS MÖNSTRET

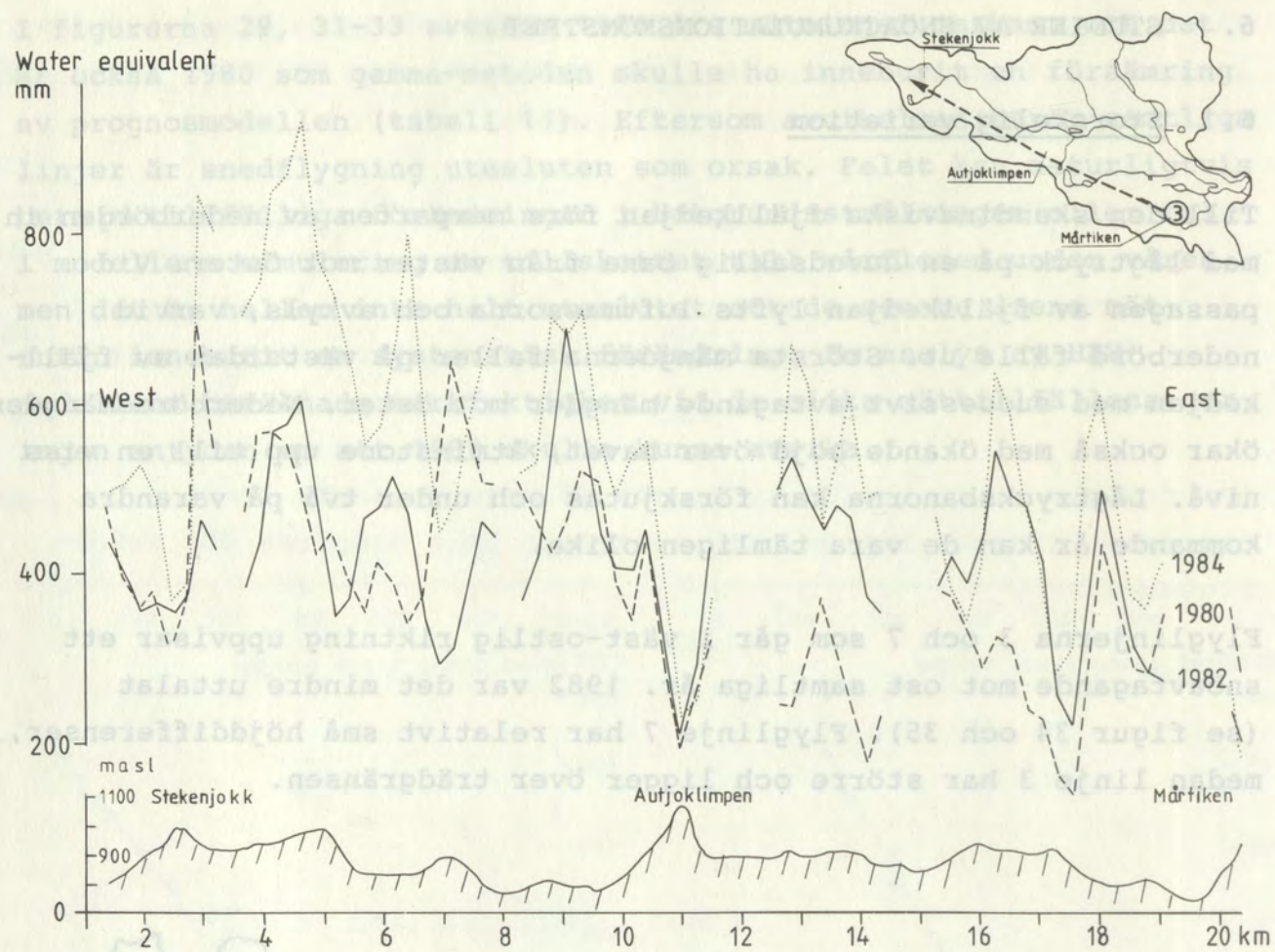
### 6.1 Storskalig variation

Till den skandinaviska fjällkedjan förs merparten av nederbörden in med lågtryck på en huvudsaklig bana från väster mot öster. Vid passagen av fjällkedjan lyfts luftmassorna och avkyls, varvid nederbörd faller ut. Största mängderna faller på västsidan av fjällkedjan med successivt avtagande mängder mot öster. Nederbördsmängden ökar också med ökande höjd över havet, åtminstone upp till en viss nivå. Lågtrycksbanorna kan förskjutas och under två på varandra kommande år kan de vara tämligen olika.

Flyglinjerna 3 och 7 som går i väst-östlig riktning uppvisar ett snöavtagande mot ost samtliga år. 1982 var det mindre uttalat (se figur 34 och 35). Flyglinje 7 har relativt små höjddifferenser, medan linje 3 har större och ligger över trädgränsen.

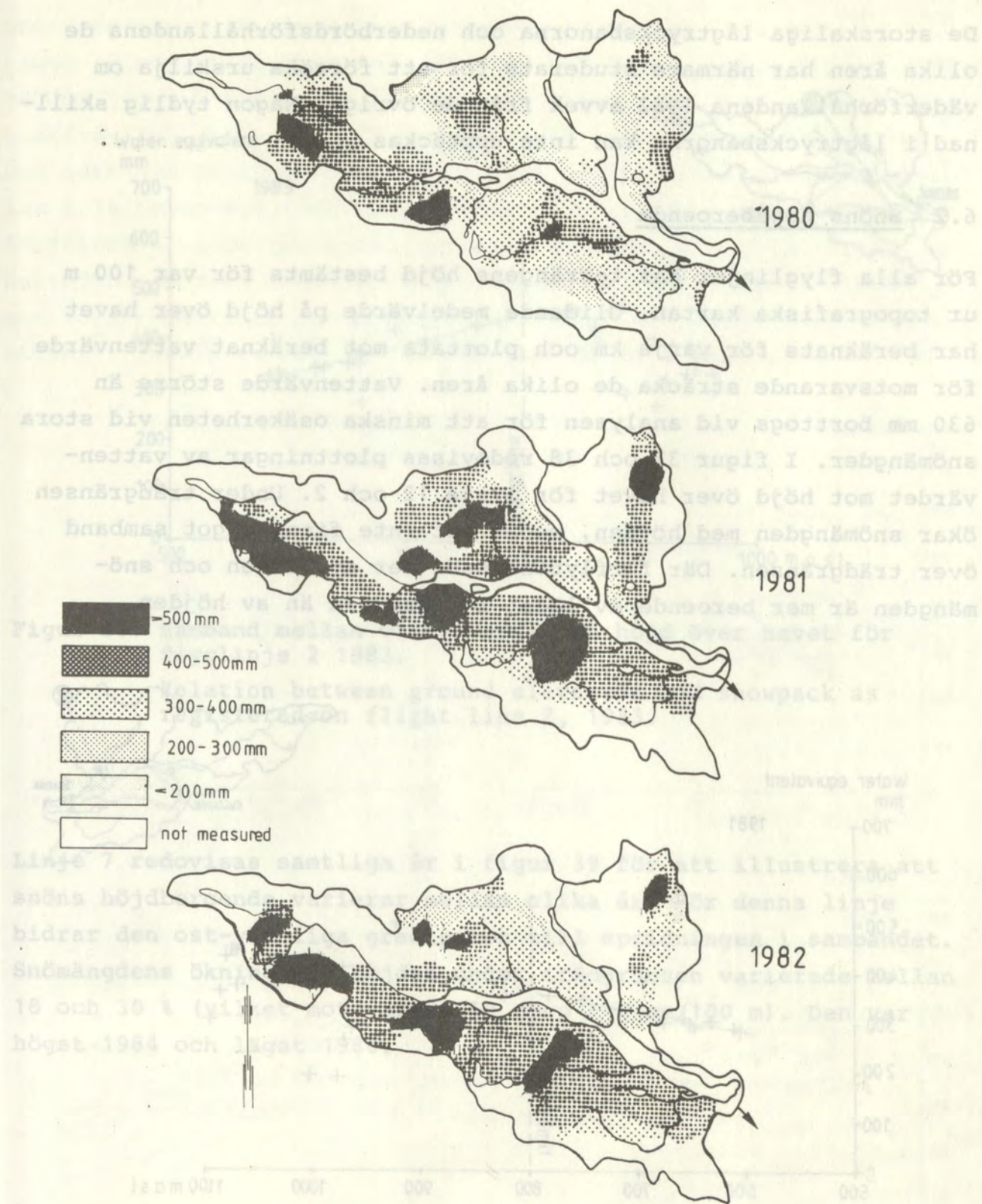


Figur 34. Den väst-östliga gradienten i vattenvärdet längs flyglinje 7 1981, 1982 och 1984 samt topografi. The west-east gradients on the snow accumulation as registered on flight line 7 and topography.



Figur 35. Den väst-östliga gradienten i vattenvärdet längs flyglinje 3, 1980, 1982 och 1984 samt topografi.  
The west-east gradients on the snow accumulation as registered on flight line 3 and topography.

I figur 36 har snökartor ritats med hjälp av gammamätningar för de tre åren 1980-1982. Från 1983 reducerades antalet flyglinjer, vilket gör det svårt att rita liknande kartor. 1980 och 1982 var snönederbörden ca 80 % av den normala, medan 1981 var snörikt (110-130 %). Det skulle varit intressantare ur jämförelsesynpunkt om snökartorna skulle ha ritats i % av normalt, men underlagsmaterialet för det bedömdes alltför osäkert. Jämförs de olika åren framgår det att 1982 var snömängderna större åt sydost än 1980 och 1981. I detta område saknas nederbördsdata (se figur 4), vilket nog är förklaringen till att gammametoden just 1982 avsevärt skulle kunnat ha förbättrat simuleringen med HBV-modellen (se tabell 11).

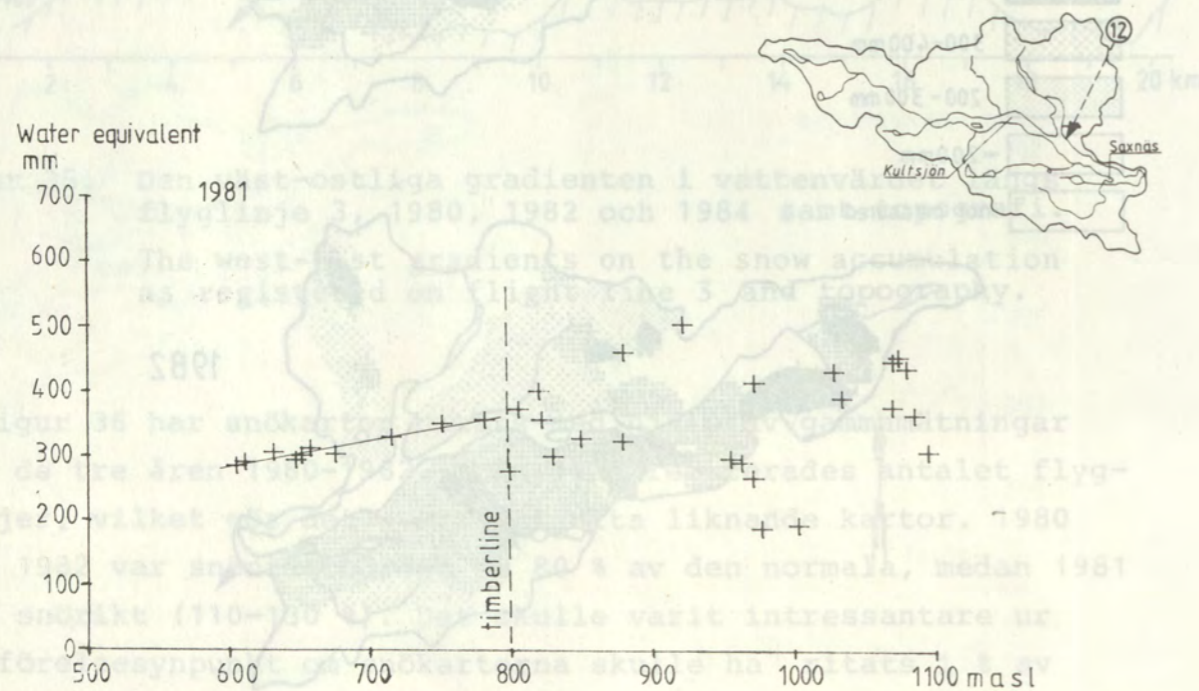


Figur 36. Snökarta över Kultsjön baserad på gammaflygningarna 1980, 1981 och 1982 (vita fläckar har otillräckligt mätunderlag).  
Schematic snow mapping in the Kultsjön basin in 1980, 1981 and 1982.

De storskaliga lågtrycksbanorna och nederbördsförhållandena de olika åren har närmare studerats för att försöka urskilja om väderförhållandena 1982 avvek från de övriga. Någon tydlig skillnad i lågtrycksbanorna kan inte upptäckas.

## 6.2 Snöns höjdberoende

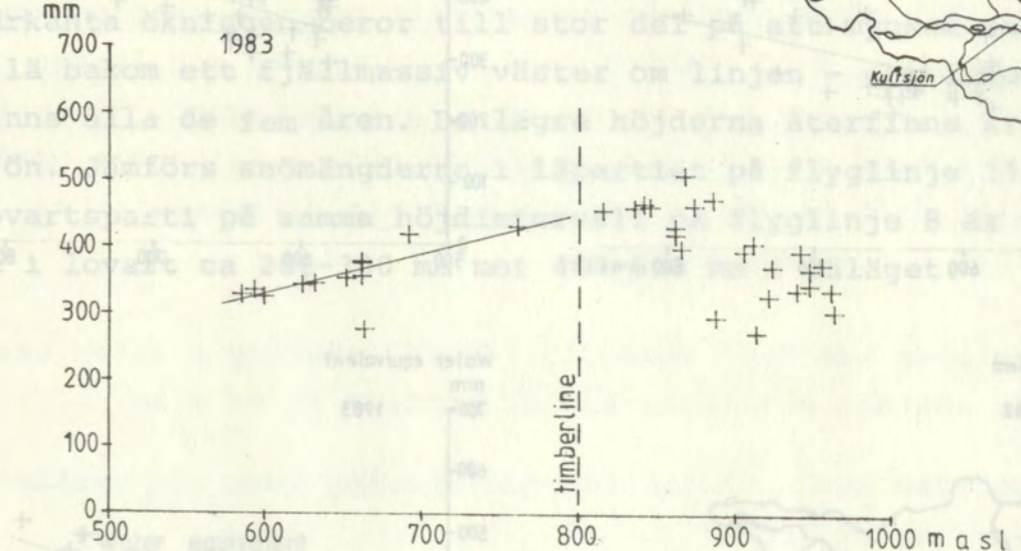
För alla flyglinjer har terrängens höjd bestämts för var 100 m ur topografiska kartan. Glidande medelvärde på höjd över havet har beräknats för varje km och plottats mot beräknat vattenvärde för motsvarande sträcka de olika åren. Vattenvärde större än 630 mm borttogs vid analysen för att minska osäkerheten vid stora snömängder. I figur 37 och 38 redovisas plottningar av vattenvärdet mot höjd över havet för linje 12 och 2. Under trädgränsen ökar snömängden med höjden, medan det inte finns något samband över trädgränsen. Där förflyttas snön mer av vinden och snömängden är mer beroende av läget i terrängen än av höjden.



Figur 37. Samband mellan vattenvärde och höjd över havet för flyglinje 12 1981.

Relation between ground elevation and snowpack as registered on flight line 12, 1981.

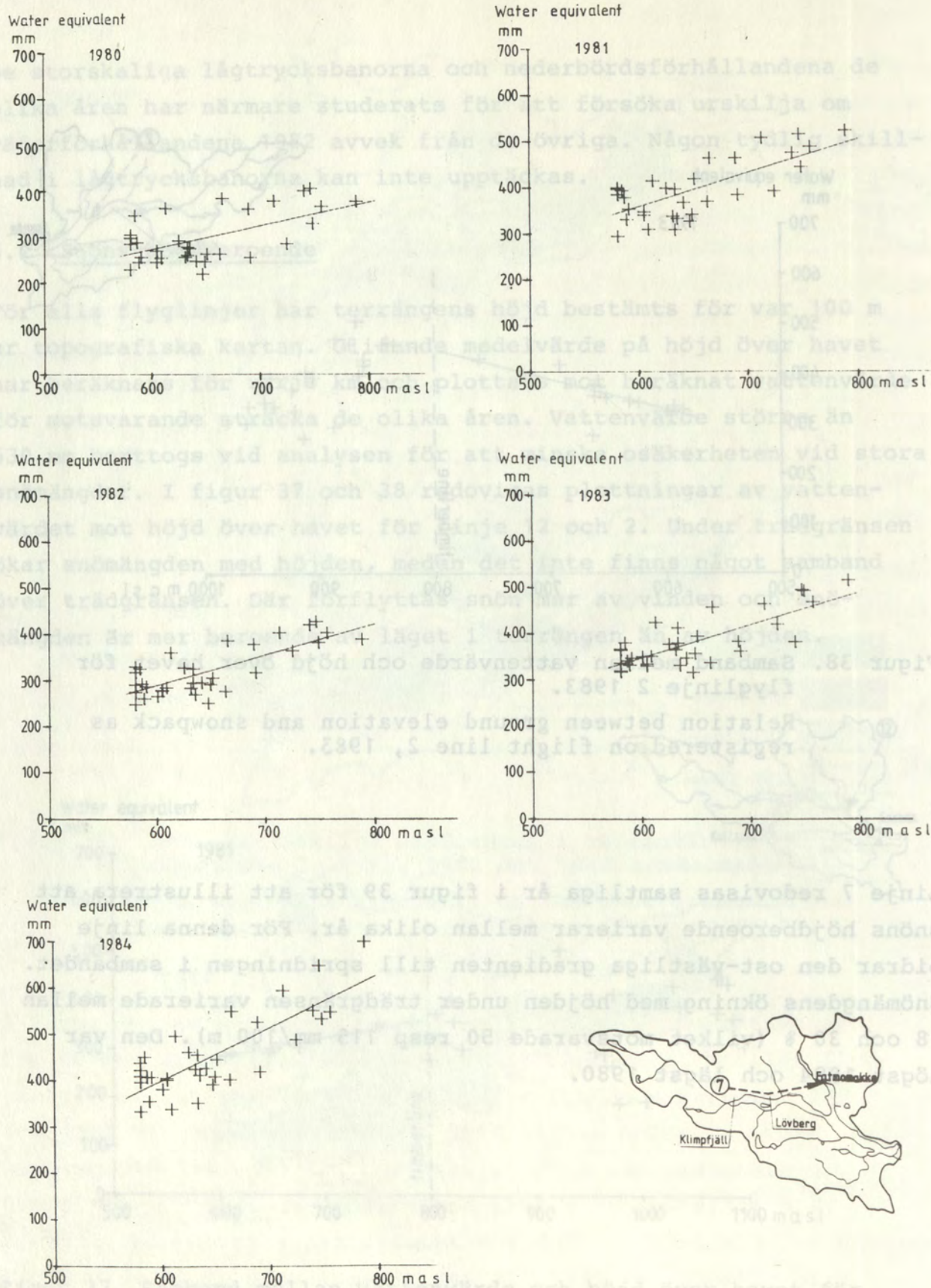
Water equivalent  
mm



Figur 38. Samband mellan vattenvärde och höjd över havet för flyglinje 2 1983.

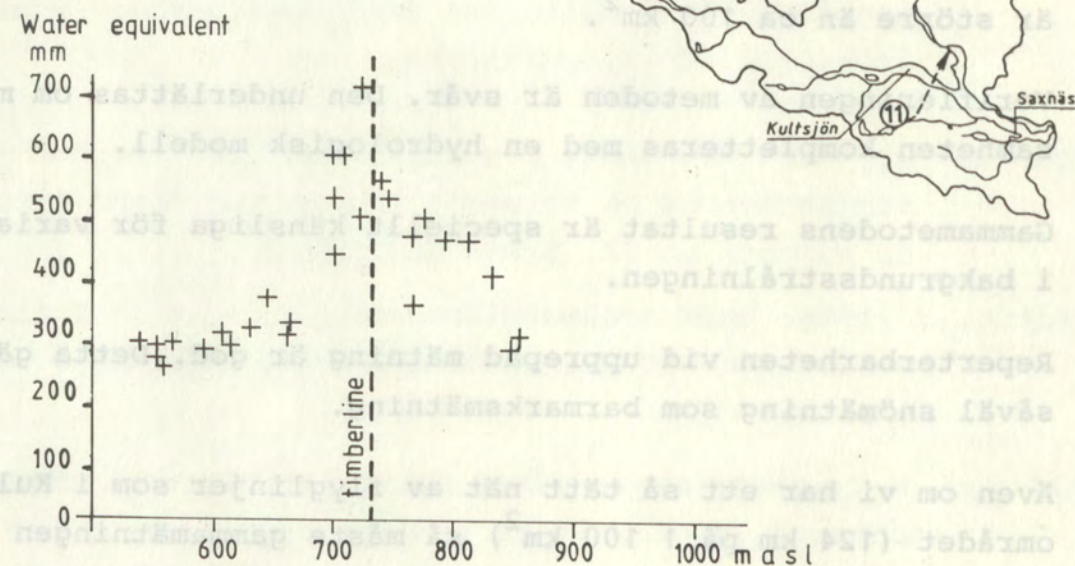
Relation between ground elevation and snowpack as registered on flight line 2, 1983.

Linje 7 redovisas samtliga år i figur 39 för att illustrera att snöns höjdberoende varierar mellan olika år. För denna linje bidrar den ost-västliga gradienten till spridningen i sambandet. Snömängdens ökning med höjden under trädgränsen varierade mellan 18 och 30 % (vilket motsvarade 50 resp 115 mm/100 m). Den var högst 1984 och lägst 1980.



Figur 39. Samband mellan vattenvärde och höjd över havet för flyglinje 7 1980-1984.  
Relation between ground elevation and snowpack as registered on flight line 7, 1980-1984.

Snöfördelningen är inte bara beroende av höjden utan även av läget. Figur 40 som visar flyglinje 11 1980 har ingen större ökning mellan höjden 540 och 670 m över havet, men sedan ökar vattenvärdet drastiskt mellan 700 och 760 m höjd för att avta åter på kalfjället. Den markanta ökningen beror till stor del på att mycket snö ansamlas i lä bakom ett fjällmassiv väster om linjen - ett fenomen som återfinns alla de fem åren. De lägre höjderna återfinns kring Kultsjön. Jämförs snömängderna i läpartiet på flyglinje 11 med ett lovartsparti på samma höj dintervall på flyglinje 8 är vattenvärdet i lovart ca 200-300 mm mot 480-600 mm i läläget.



Figur 40. Samband mellan vattenvärde och höjd över havet längs flyglinje 11 1980.  
Relation between ground elevation and snowpack as registered on flight line 11, 1980.

## 7. SLUTSATSER

De svenska försöken med flygburen gammastrålningsmätning i Kultsjöns avrinningsområde avslutades våren 1984 efter 5 års mätningar. Under det nordiska expertmötet om gammametoden som hölls i Rovaniemi 9-10 oktober 1984 diskuterades resultaten och de slutsatser som man kan dra av försöksverksamheten. Slutsatserna som i första hand grundar sig på mätningarna i Kultsjöns område men med stöd från norska, finska och danska erfarenheter kan sammanfattas i följande punkter:

1. Gammametoden kan inte användas för snötaxering i liten skala, dvs för enstaka mätlinjer som är kortare än ca 2 km.
2. Gammametoden kan användas för snötaxering inom ett område som är större än ca 100 km<sup>2</sup>.
3. Verifieringen av metoden är svår. Den underlättas om mätverksamheten kompletteras med en hydrologisk modell.
4. Gammametodens resultat är speciellt känsliga för variationer i bakgrundsstrålningen.
5. Reperterbarheten vid upprepad mätning är god. Detta gäller såväl snömätning som barmarksmätning.
6. Även om vi har ett så tätt nät av flyglinjer som i Kultsjön-området (124 km på 1 100 km<sup>2</sup>) så måste gammamätningen korrigeras empiriskt för att ge ett riktigt värde på områdets snömagasin. Detta innebär vidare att ett antal väl valda linjer kan ge ett lika gott resultat som ett tätare nät av linjer.
7. Försöken i Kultsjön visade att gammametoden ger ett bättre arealvärde på snöackumulationen än de metoder som baserar sig på nederbörds-mätning. Detta innebär att en förbättring av prognoserna kan förväntas efter vintrar med en snöfördelning som inte registreras av det ordinarie nederbördsstationsnätet.

Mötet i Rovaniemi betonade att förutsättningarna för att utnyttja gammametoden skiljer sig högst avsevärt mellan de nordiska länderna. I Norge är metoden attraktiv eftersom man saknar

möjlighet att mäta nederbörd i stora områden, men där är samtidigt snöns mäktighet ett stort problem. I Finland används metoden i områden med betydligt mindre snö än i Sverige och Norge varför den övre gränsen är ett mindre problem. På Grönland är man tvingad att söka sig till någon form av flygburen metod beroende på den otillgängliga naturen. I Sverige finns en tradition av att utnyttja nederbördsstationsnätet för vårflödesprognoser. Detta sker till en relativt blygsam kostnad vilket gör att gammametoden måste ge klart förbättrade prognoser för att bli kostnadseffektiv.

REFERENSER

Bergström, S., 1976: Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Report no RHO 7, SMHI, Norrköping.

Bergström, S. och Jönsson, S., 1976: Tillämpning av HBV-2 modellen på regleringsmagasin i Ångermanälven. SMHI, HB rapport nr 18, Norrköping.

Bergström, S. and Brandt, M., 1983: Snow mapping and hydrological forecasting by airborne  $\gamma$ -ray spectrometry in northern Sweden. IAHS Publ. no 145, Hamburg.

Brandt, M., 1983: Snöackumulationsmätningar med flygburen gamma-spektrometer i Kultsjöns avrinningsområde. SMHI, FoU-notis no 20, Norrköping.

Hägström, M., 1982: The areal precipitation index method - a simple method to forecast the spring flood volume. HB Rapport nr 52, SMHI, Norrköping.

Kuusisto, E., 1984: Snow accumulation and snowmelt in Finland. Publications of the Water Research Institute, Helsinki, no 55.

Nikiforov, M V., 1980: Areal gamma survey of the snow cover in mountains. Meteorologia in Gidrologiya, No 1, pp 77-83.

Nilsson, J., Landström, O., Linden, A. och Melander, H., 1980: Mätningar med flygburen gammastråleutrustning för avrinningsprognosverksamhet. Contribution to Nordic Hydrologic Conference 1980.

Tveit, J., 1980: Representativitet av snömålesystem ut frå topografiske og morfometriske parametrar. Institutt for vassbygging. Norges tekniske høgskole - Universitet i Trondheim.

Ulriksen, C P., 1982: Application of impulse radar to civil engineering. Department of engineering geology. Lund. University of Geology.

WMO, 1979: Workshop on Remote Sensing of Snow and Soil Moisture by Nuclear Techniques. Technical papers presented at the workshop convened by WMO and organized in cooperation with IAHS and Norwegian National Committee for Hydrology, Voss, Norway.

Zachrisson, K., 1980: Vårflödesprognoser med utgångspunkt från snötaxeringar i Malmagenområdet. STOU-NG 40, Stockholm.

Nr	Titel	Nr	Titel
1	Hydrologiska undersökningar i Kassjöans representativa område Meddelande nr III: Vattenomsättningen i Lilla Tiv-sjöns område 1966/67 - 1972/73 av A Waldenström Stockholm 1974	24	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav Meddelande nr 4: Mätningar 1975-76, vatten-, värme- och materialtransportberäkningar av U Ehlin och C Ambjörn Norrköping 1977
2	Hydrologiska undersökningar i Lapträskets representativa område Meddelande nr IV: Nederbörd och vattenomsättning av M Persson Stockholm 1974	25	Ström- och vattentransportstudier i norra Öresund, sydöstra Kattegatt och i Skälderviken av M Brandt Norrköping 1977
3	Oceanografiska observationer i Östersjön 1973 med kustbevakningens båtar samt från isbrytare av U Ehlin och B Juhlin Stockholm 1974	26	Strömmätningar i Himmerfjärden 1976 av E Bergstrand Norrköping 1977
4	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav Meddelande nr 1: Mätningar juni - september 1973 av U Ehlin och C Ambjörn Stockholm 1974	27	Oceanografiska observationer i Östersjön 1977 med kustbevakningens båtar av U Ehlin och B Juhlin Norrköping 1978
5	SMHI-rapport Verification of heated water jet numerical model by James G Weil Stockholm 1974	28	Slutrapport över hydrologiska undersökningar i Velens representativa område av A Waldenström Norrköping 1977
6	Hydrologiska undersökningar i Lapträskets representativa område Meddelande nr V: Markvattenstudier av T Milanov Stockholm 1975	29	Slutrapport över hydrologiska undersökningar i Kassjöans representativa område av A Waldenström Norrköping 1977
7	Hydrologiska undersökningar i Lapträskets representativa område Meddelande nr VI: Vattenomsättningen 1968-73 med feluppskattning av M Persson Stockholm 1975	30	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav Meddelande nr 5: Mätresultat 1977, vatten- och materialtransportberäkningar ur 1974 och 1975 års mätningar av C Ambjörn Norrköping 1978
8	Hydrologiska undersökningar i Kassjöans representativa område Meddelande nr IV: Snötaxering 1974 och vattenomsättning 1969-73 av A Waldenström Stockholm 1975	31	Basnät för vattentemperatur Stationsförteckning 1978-01-01 av O Cabelis och A Moberg Norrköping 1978
9	Snösmältningen i en punkt som funktion av meteorologiska data av S Jönsson Stockholm 1975	32	Operational Hydrological Forecasting by Conceptual Models av S Bergström, M Persson och B Sundqvist Norrköping 1978
10	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav Meddelande nr 2: Mätningar okt-dec 1973 och juli-sept 1974 av U Ehlin och C Ambjörn Stockholm 1975	33	Slutrapport över hydrologiska undersökningar i Lapträskets representativa område av M Persson Norrköping 1978
11	Oceanografiska observationer i Östersjön 1974 med kustbevakningens båtar samt från isbrytare av U Ehlin och B Juhlin Stockholm 1975	34	Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens båtar av U Ehlin och B Juhlin Norrköping 1979
12	Vattenomsättning och flöde i Stormyraområdet av L Liljequist och L Sterner Stockholm 1975	35	Utvärdering av 1979 års vårflödesprognoser av S Bergström och S Jönsson Norrköping 1979
13	Hydrologiska undersökningar i Lapträskets representativa område Meddelande nr VII: Avrinningen och dess variationer inom området av M Persson Norrköping 1976	36	Oceanografiska observationer i Östersjön 1979 med kustbevakningens båtar av U Ehlin och B Juhlin Norrköping 1980
14	Vattenomsättningsstudier m m i Velens och Kassjöans representativa områden av A Waldenström Norrköping 1976	37	Vårflödesvolymprognoser baserade på analys av nederbördskartor av S Jönsson Norrköping 1980
15	Strömmätningar i sundet mellan Värmlandsjön och Dalbosjön, Väner Vänerundersökningen. Meddelande nr 1 av B Carlsson och M Brandt Norrköping 1976	38	Resultat och erfarenheter av försöksverksamhet med utökad vattenprovtagning från kustbevakningens båtar av B Juhlin och B Carlsson Norrköping 1980
16	Oceanografiska observationer i Östersjön 1975 med kustbevakningens båtar samt från isbrytare av U Ehlin och B Juhlin Norrköping 1976	39	Sedimenttransport i svenska vattendrag 1979 av M Brandt Norrköping 1980
17	Oceanografiska undersökningar i Ålands hav 1975 Meddelande nr 3: Mätningar 1974-75. Vattentransporter av U Ehlin och C Ambjörn Norrköping 1976	40	Sluttransport till Miljödatanämnden över projekt MI - 01:2. Systemutredning rörande samordnade uttag av information ur MI och SMHI:s maskinella register av T Milanov och B Sundqvist Norrköping 1980
18	Tillämpning av HBV-2 modeller på regleringsmagasin i Ångermanälven av S Bergström och S Jönsson Norrköping 1976	41	Användning av vädersatellitdata för att studera ytvattentemperatur av G Wennerberg Norrköping 1980
19	Grundvattenståndsmätningar i Ångermanälvens övre tillrinningsområde av T Milanov Norrköping 1976	42	Nordisk hydrologi i utveckling. Tillägnad Ragnar Melin av A Forsman, J Otnes, M Falkenmark, E Kuusisto, R Lemmela och J Lundager-Jensen Norrköping 1980
20	Beräkning av frekvenser av torrår av L Gottschalk Norrköping 1976	43	Beräkning av en föroreningstransport och blandning i en grund istäckt sjö av U Ehlin, I Bork och J Svensson Norrköping 1980
21	Hydrografi och sandsugning av M Brandt Norrköping 1976	44	Utvärdering av 1980 års vårflödesprognoser av S Bergström, M Haggström och M Persson Norrköping 1980
22	Hydrologiska undersökningar i Lapträskets representativa område Meddelande nr VIII: Vattenomsättning och avdunstning under perioden 1968-76 av M Persson Norrköping 1976	45	Mätningar av sjötemperatur vid SMHI av A Moberg Norrköping 1981
23	Oceanografiska observationer i Östersjön 1976 med kustbevakningens båtar av U Ehlin och B Juhlin Norrköping 1977	46	Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens båtar 1980 av B Juhlin Norrköping 1981
		47	Temperaturmätningar vid Visby av B Broman samt Spridning av utsläppt vatten av B Vasseur Norrköping 1981
		48	Användning av satellitdata från Landsat för studium av vattengrumlingar av G Wennerberg Norrköping 1981

49	Utvärdering av 1981 års vårflödesprognoser av S Bergström, M Haggström och M Persson Norrköping 1981	23	Kartläggning av ytvattentemperaturen med satellitdata av Thomas Thompson Norrköping 1985
50	Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens båtar 1981 av B Juhlin Norrköping 1982	24	Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens fartyg av Bo Juhlin Norrköping 1985
51	Sedimenttransport i svenska vattendrag 1980 av M Brandt Norrköping 1982	25	Vindförfluster vid mätning av snönederbörd med SMHI-nederbördsmatören av Bengt Carlsson Norrköping 1985
52	The areal precipitation index method - A simple method to forecast the spring flood volume by M Haggström Norrköping 1982	26	Svenskt Vattendragsregister av Torbjörn Lindkvist Norrköping 1985
53	Vågdata från svenska kustvatten 1981 av J Svensson Norrköping 1982	27	Svenskt Sjöregister av Kurt Ehler (projektledare) Norrköping 1983

HO-RAPPORTER

1	Metod för homogenitetskontroll av meteorologiska och hydrologiska observationsserier av Sven-Erik Westman Norrköping 1982
2	Utvärdering och modellsimulering av grundvattenmätningarna i Ångermanälvens övre tillrinningsområde av G Sandberg Norrköping 1982
3	Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens båtar 1982 av B Juhlin Norrköping 1983
4	Utvärdering av 1982 års vårflödesprognoser av M Haggström och M Persson Norrköping 1983
5	Vågdata från svenska kustvatten 1982 av Jonny Svensson Norrköping 1983
6	The new harbour in Landskrona - oceanographic investigations by Jonny Svensson Norrköping 1983
7	Operational hydrological forecasting in Sweden by Magnus Persson Norrköping 1983
8	Vattenutbyte mellan Bottniska Viken och Östersjön av Cecilia Ambjörn Norrköping 1983
9	Vår vintern 1982/83 extrem? En jämförande studie av vattentemperatur i några mellansvenska sjöar av Gun Zachrisson Norrköping 1983
10	Sedimenttransport i svenska vattendrag 1981. Resultat från sedimenttransportnätet av Maja Brandt Norrköping 1983
11	Försök med automatisk vattenprovtagning i Marviken av Bo Juhlin Norrköping 1983
12	Värmeuttag ur Helgasjön - Möjligheter och konsekvenser av Gun Zachrisson och Barry Broman Norrköping 1984
13	Oceanografiska observationer runt svenska kusten med kustbevakningens fartyg 1983 av Bo Juhlin Norrköping 1984
14	Åtgärder mot försurning i Velen. Erfarenheter från utförd behandling med kalk och soda samt förslag till fortsatta åtgärder. En utredning för Toreboda kommun av Ingemar Holmström Norrköping 1984
15	Vågdata från svenska kustvatten 1983 av Jonny Svensson Norrköping 1984
16	Beräkning av daglig vattenföring vid Ulva kvarn i Fyrisån 1951-82 av Magnus Persson och Sven-Erik Westman Norrköping 1984
17	Utvärdering av 1983 års vårflödesprognoser av Martin Haggström och Magnus Persson Norrköping 1984
18	Vattenståndsprediktioner för Hammarsjön - Helge Å. En utredning för Kristianstad län av Barbro Johansson
19	Utvärdering av 1984 års vårflödesprognoser av Martin Haggström Norrköping 1984
20	Svenskt Sjöregister - Uppdatering av Torbjörn Lindkvist och Christina Thoms-Hjärpe Norrköping 1984
21	Snösmältning med flygburen gammaspektrometer i Kultsjöns avrinningsområde 1980 - 1984 av Sten Bergström och Maja Brandt
22	PROBE - An Instruction Manual by Urban Svensson Norrköping 1984





ISSN 0282-2601

**SMHI**

SVERIGES METEOROLOGISKA OCH HYDROLOGISKA INSTITUT  
601 76 Norrköping. Tel 011-158000. Telex 64400 smhi s.