



SVERIGES  
LANTBRUKSUNIVERSITET  
UPPSALA

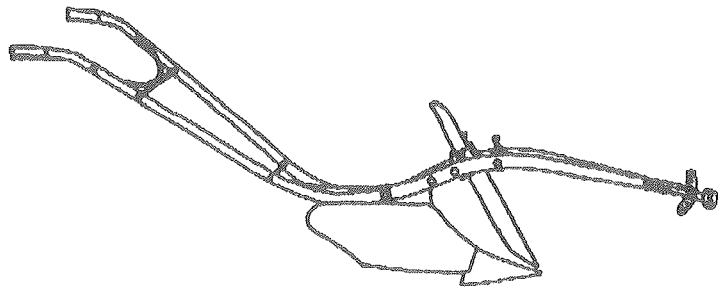
INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP

# MEDDELANDEN FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Swedish University of Agricultural Sciences,  
S-750 07 Uppsala

Department of Soil Sciences

Bulletins from the Division of Soil Management



Nr 11

1994

Jennie Andersson

**VATTENHALTSMÄTNINGAR MED TDR OCH  
NEUTRONSOND I FÖRSÖK MED TIDIG  
SÄDD AV KORN**

*Soil moisture measurements with  
TDR (time domain reflectometry)  
and neutron probe in a field  
experiment with early sowing of  
barley*

ISSN 0348-0976

ISRN SLU-JB-M--11--SE

Sveriges lantbruksuniversitet  
Institutionen för markvetenskap  
Avdelningen för jordbearbetning

Meddelanden från jordbearbetningsavdelningen. Nr 11, 1994  
ISSN 0348-0976  
ISRN SLU-JB-M--11--SE

Jennie Andersson

**Vattenhaltsmätningar med TDR (time domain reflectometry) och neutronsond i försök med tidig sådd av korn.**

*Soil moisture measurements with TDR (time domain reflectometry) and neutron probe in a field experiment with early sowing of barley.*

Examensarbete i jordbearbetning

Handledare: Johan Arvidsson

## FÖRORD

Denna rapport redovisar resultaten från ett examensarbete utfört vid Avdelningen för jordbearbetning, Inst f markvetenskap, SLU. Syftet med examenarbetet var att mer ingående studera vattenhaltsförändringar i mark under gröda med tidigarelagd såtidpunkt jämfört med normal såtidpunkt. Vid vattenhaltsmätningarna användes tre olika mätinstrument, dels två typer av s k "time domain reflectometry" (TDR) och dels en neutronsond. Samtliga mätningar gjordes i ett försök med tidig sådd utanför Uppsala under växtsäsongen 1993. Försöket ingår i en försöksserie med tidig sådd, som välvilligt finansieras av Stiftelsen Lantbruksforskning.

Jag skulle vilja tacka alla er vid avd f jordbearbetning som hjälpt mig och svarat på frågor under arbetets gång. Även tack till Hydro-försök som bl a lånade ut sin TDR-utrustning och emellanåt även fungerande dator, samt Hydro-forskning som lånade ut sin neutronsond. Ett särskilt stort tack till min handledare, Johan Arvidsson för tålmod, uppmuntran och kritisk granskning av detta arbete.

Ultuna 20/5 1993

Jennie Andersson



INLEDNING .....	2
BAKGRUND .....	2
Time Domain Reflectometry för vattenhaltsmätningar i jord .....	2
Olika typer av TDR-prober och -kopplingar .....	8
Mätområde runt TDR-prober .....	9
Neutronsond .....	9
MATERIAL OCH METODER .....	11
Beskrivning av försöksplats och utförda mätningar .....	11
Tektronix: utrustning och installering .....	12
Trase: utrustning och installering .....	12
Installation av neutronsondsrör .....	12
Gravimetriska vattenhalter .....	13
Beskrivning av försöksplatsen Kasby 552/93 .....	13
Väderlek .....	15
Mätningar i växande gröda .....	15
Beräkningar .....	15
Allmänt .....	15
Skattning av vattenbalans .....	16
RESULTAT .....	16
Kalibrering och jämförelse av mätinstrument .....	16
Kalibrering av Tektronix .....	16
Kontroll av Trase kalibrering .....	18
Kalibrering av neutronsond .....	20
Jämförelse mellan olika mätutrustningar .....	21
Utveckling och vattenupptagning för gröda med tidig respektive normal såtidpunkt .....	22
Skillnader i vattenupptagning, rotutveckling, beståndsutveckling och skörd .....	22
Resultat av vattenbalansberäkning .....	25
DISKUSSION .....	27
Kalibrering och jämförelse av mätutrustning .....	27
Grödans utveckling och vattenupptagning .....	29
SAMMANFATTNING .....	30
SUMMARY .....	31
REFERENSER .....	33
APPENDIX I: Försöksplan över försök nr 552/93 på Kasby	
APPENDIX II: Skiss över prober och kopplingar till TDR/Tektronix	

## INLEDNING

Sedan 1988 har man på avdelningen för jordbearbetning, SLU haft en försöksserie med tidigarelagd sådd på våren utan föregående vårharvning. Försöken med tidigarelagd sådd syftar till att undersöka och utveckla ett odlingssystem som innebär avsevärda minskningar i arbets- och maskinkostnader samtidigt som skördenivån bibehålls jämfört med konventionell vårsådd (Rydberg, 1991). Genom att så tidigare förlängs växtsäsongen och eventuellt ökar vatten- och växtnäringsupptag så att systemet med tidigarelagd sådd också får positiva effekter på markstruktur och växtnäringsläckage (Arvidsson, 1992). Det är därför en angelägen uppgift att i dessa försök studera om grödans vattenupptagning påverkas av den tidiga såtidpunkten.

Det finns en rad olika sätt att mäta markens vatteninnehåll på. Vanligtvis sker det genom provtagning av jord för gravimetrisk vattenhaltsbestämning. De metoder som idag verkar mest praktiska för kontinuerliga icke-destruktiva mätningar av markens vattenhalt i fält är genom s k "time-domain reflectometry" (TDR), eller med hjälp av neutronsondsmetoden. TDR-teknik bygger på att en elektromagnetisk vågs utbredningshastighet i en elektrisk ledare är beroende av omgivande mediums elektriska och magnetiska egenskaper. Då en elektromagnetisk vågs utbredningshastighet i ledaren är lägre om den är omgiven av vatten än om den är omgiven av jord eller luft kan man genom att mäta vågens utbredningshastighet uppskatta den omgivande jordens vattenhalt. Vid neutronsondsmätningar sänder en radioaktiv källa ut neutroner med hög energinivå, som kolliderar med väte i vattenmolekyler i marken. Vid kollisionen reduceras energinivån för neutronerna, varefter man registrerar lågenergineutroner. Antalet lågenergineutroner korreleras sedan till jordens vattenhalt.

Syftet med detta examensarbete var dels att undersöka olika mättekniker för vattenhaltsbestämning i mark, och dels att undersöka om och eventuellt hur olika såtidpunkter påverkar grödans vattenupptagning. För att närmare studera grödans påverkan på upptorkningsförloppet i marken under växtsäsongen gjordes en undersökning av jordens vattenhaltsförändring med olika tekniker för vattenhaltsmätning under säsongen 1993. Samtliga mätningar gjordes i ett försök med tidigarelagd såtidpunkt (nr 552/93; försöksserie R2-4031), utanför Uppsala. I studien användes tre olika mätutrustningar, två varianter av "time-domain reflectometry", och en neutronsond. Mätutrustningarna var stationära, d v s de var nergrävda i försöket under hela växtsäsongen. Mätvärdena från de olika mätutrustningarna jämfördes med gravimetriska vattenhaltsprover och sinsemellan. Grödans vattenupptagning under växtsäsongen studerades under gröda med naturlig nederbörd och avdunstning, och under gröda med artificiell torra (skärmtak) vid två olika såtidpunkter.

## BAKGRUND

### **Time Domain Reflectometry för vattenhaltsmätningar i jord**

Ursprungligen användes TDR-systemet för att testa kabelbrott på kablar nedgrävda i marken. Principen bygger på att man skickar väl definierade elektromagnetiska signaler i form av

pulser och mäter spänningsförändringar som sker vid reflektion då utskickade signaler stöter på eventuella diskontinuiteter i kabeln. Det har senare visat sig att samma princip kan användas för att mäta jordens/markens volymetriska vattenhalt. I början av 80-talet presenterades det första empiriska sambandet mellan TDR-pulsers reflektion och markens vattenhalt (Topp et al, 1980). Förutom att mäta jordens/markens vattenhalt kan man också mäta jordens elektriska konduktivitet med ett TDR-system.

Namnet "time domain reflectometry" (TDR) kommer av att man mäter en storhet som är tidsrelaterad - mätningar sker i "time domain". I TDR-system mäter man en förändring av spänning över tiden.

En elektromagnetisk våg kan beskrivas som elektriska (E-vektor) och magnetiska (B-vektor) fält vilka varierar i tid och rum. De elektriska och magnetiska fälten är vinkelräta mot varandra, och båda fälten är vinkelräta mot vågens utbredningsriktning. En elektromagnetisk våg transporterar energi. För att vågen ska kunna fortsätta att breda ut sig behöver den ständig tillförsel av energi från någon typ av våggenerator. Vågens frekvens bestäms av generatoren, men dess utbredningshastighet bestäms av omgivande medias elektriska och magnetiska egenskaper. Inom ellära skiljer man på material som är ledare av en ström av elektroner, från material som isolerar elektroner, så kallade isolatorer eller dielektrika (se t ex University Physics (1987); Elektricitetslära (1983)). Utbredningshastighet  $v$  för en elektromagnetisk våg i ett dielektrikum är

$$v = 1/\sqrt{\epsilon\mu} \quad (1)$$

där

$v$  = elektromagnetisk vågs utbredningshastighet (m/s)  
 $\epsilon$  = omgivande medias (relativa) permittivitetskonstant  
 $\mu$  = omgivande medias magnetiska (relativa) permeabilitet

Då de magnetiska egenskaperna hos ett dielektrikum normalt inte påverkar vågens utbredningshastighet så kan man approximera  $\mu$  till  $\mu=1$ , och ekv (1) blir

$$v \approx (1/\sqrt{K_r})(1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}) = (1/\sqrt{K_r})c \quad (2)$$

där

$v$  = elektromagnetisk vågs utbredningshastighet (m/s)  
 $K_r$  = omgivande materials relativa dielektricitetskonstant  
 $\epsilon_0$  = permittivitetskonstant =  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$   
 $\mu_0$  = magnetisk permeabilitetskonstant =  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T A}^{-1} \text{ m}$   
 $c$  = ljushastighet i vacuum (m/s)

När en elektromagnetisk våg stöter på ett nytt medium med andra elektriska och magnetiska egenskaper sker dels en reflektion t ex tillbaka till ursprungskällan, och dels en refraction. Varje dielektriskt medium (vars magnetiska påverkan på vågen kan approximeras enligt ovan) har en refractionkonstant  $n$  relaterad till vågens utbredningshastighet i vacuum enligt

$$n = c/v \approx \sqrt{K_r} \quad (3)$$

Refraktionskonstanten är ett mått på hur mycket av vågen som fortsätter att fortplanta sig vid övergång från vacuum till ett dielektrikum. Vid övergången ändras vågens våglängd och hastighet men dess frekvens är konstant. Om den elektromagnetiska vågen stöter på en ideal ledare så måste E-vektor vara noll i hela ledaren (per definition för en ideal ledare). Därför kommer vågen att bli totalt reflekterad. I verkligheten finns det inga ideala ledare så det sker en partiell reflektion på liknande sätt som vid övergång från ett dielektrikum till ett annat.

I TDR-utrustningen mäts en spänningsförändring över tiden. Den impedansförändring, som mäts som en spänningsförändring som sker då utsänd puls reflekteras kan beskrivas som (se t ex Malmstadt et al (1981); Tektronix (1990))

$$n_r = v_r / v_a = (Z_p - Z_c) / (Z_p + Z_c) \quad (4)$$

där  $n_r$  = reflektionskoefficient

$v_r$  = amplitud hos reflekterad puls (V)

$v_a$  = amplitud hos ursprungspuls (V)

$Z_p$  = "främmande medias"/probers impedans ( $\Omega$ )

$Z_c$  = ledningskabel/coaxkabels impedans ( $\Omega$ )

Den relativa dielektricitetskonstanten för ett dielektrikum är frekvensberoende. Om man utsätter ett dielektrikum för ett allt snabbare växlande elektriskt fält, dvs allt högre frekvens, så visar det sig att den relativa dielektricitetskonstanten är frekvensberoende. Vid högre frekvenser blir dielektricitetskonstanten också mer beroende av riktningar på både det elektriska och det magnetiska fältet. När man inte längre kan bortse från frekvensens inverkan så beskrivs dielektricitetskonstanten som den komplexa dielektricitetskonstanten ( $K_x$ ) enligt

$$K_x = K' - j(K'' + \sigma / (\epsilon_0 \omega)) \quad (\text{se Ledieu, 1986; Topp et al, 1980}) \quad (5)$$

där  $K_x$  = komplex dielektricitetskonstant

$K'$  = realdel av dielektricitetskonstanten

$K''$  = imaginärdel; motsvarar dielektrisk förlust

$\sigma$  = konduktivitet vid nollfrekvens (S/m)

$\epsilon_0$  = permittivitetskonstant =  $8,85 \cdot 10^{-12}$  (F/m)

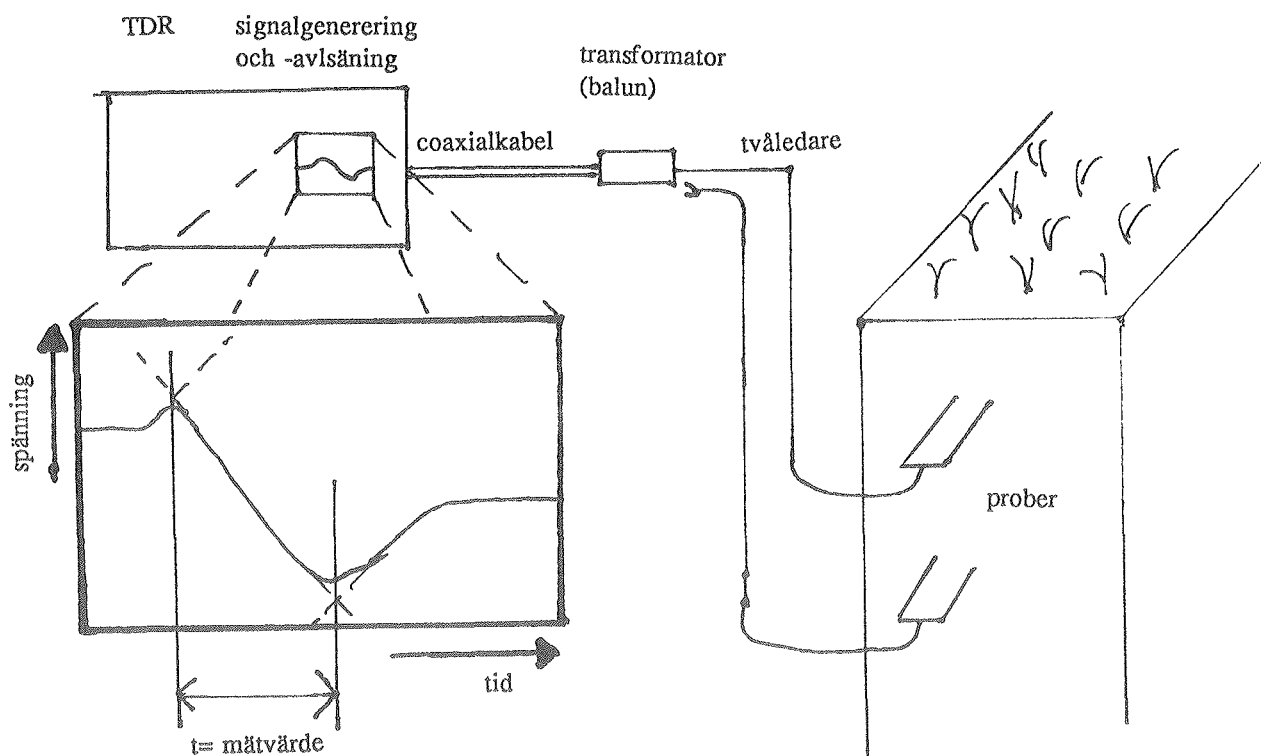
$\omega$  = vinkelfrekvens (rad/s)

För ett typiskt dielektrikum så sjunker värdet på den relativa dielektricitetskonstanten med högre frekvens. Inom frekvensintervallet 1 MHz till 1 GHz är dock de komplexa dielektricitetskonstanterna för jord, luft och vatten oberoende av frekvens så att man kan approximera de komplexa dielektricitetskonstanterna ( $K_x$ ) till de relativa dielektricitetskonstanterna ( $K_r$ ). Eftersom vatten har  $K_r = 80,3$ , luft  $K_r = 1$  och torr jord ett något varierande  $K_r$  mellan 3 och 7, så blir det en relativt stor förändring på  $K_{r-total}$  för en liten vattenhaltsförändring i en given jordvolym. I litteratur om TDR för vattenhaltsmätningar i jord approximeras den komplexa dielektricitetskonstanten till en sk "apparent dielectric constant" ( $K_a$ ), som i sin tur jämförs med de relativa dielektricitetskonstanterna för statiska och/eller lågfrekventa E-fält för jord, luft och vatten.

För att mäta  $K_r$  genereras, som tidigare sagts, en elektromagnetisk våg i form av väl definierade pulser. Dessa pulser sänds via en coaxialkabel, transformator (balun), tvåledare



och vidare till ett par prober nedgrävda i marken (figur 1). När pulsen når probänden sker en reflektion av pulsen. Pulsreflektionen mäts som en spänningsförändring över tiden. Men proberna är ledare, d v s man kan approximera impedansen i ledarna till noll, och därför blir spänningsförändringen ett mått på pulsernas reflektion mot det medium som omger proberna. Vid övergången från tvåledare till prober så sker en spänningsminskning (motsvarar "short circuit", "capacitive fault"): impedansen är lägre i proberna än i tvåledaren. När pulsen reflekterats och återigen når probänden så sker en spänningsökning då impedansen för tvåledaren är högre än för proberna (motsvarar "open circuit", återsignal via jord, "inductive fault").



Figur 1: Schematisk bild av TDR-utrustning och mätsignal.

Den väldefinierade pulsens utbredningshastighet kan beskrivas enligt ekvation (3). Men vågens hastighet kan också beskrivas som

$$v = s/t = 2l/t \quad (6)$$

där  $v$  = vågens utbredningshastighet (m/s)  
 $s$  = sträcka (m)  
 $t$  = tid (s)  
 $l$  = problängd (m); motsvarar pulsens färdsträcka

Om man kombinerar ekvation (3) och (6) så kan man lösa ut den relativa dielektricitetskonstanten (Topp et al, 1980)

$$\epsilon \approx K_a \approx [ct/2l]^2 \quad (7)$$

Topp et al (1980) visade på ett empiriskt samband mellan volymetrisk vattenhalt ( $\Theta$ ) och så kallad  $K_a$  för fyra jordar med olika textur och vattenhalter

$$\Theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} K_a - 5,5 \cdot 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} K_a^3 \quad (8)$$

I ekvation(8) mäter man inte en real eller komplex dielektricitetskonstant för ett dielektrika, utan ett sammansatt värde på en given jordvolym dielektricitetskonstant vid en viss vattenhalt. Denna dielektricitetskonstant kallas därför den "synbara" dielektricitetskonstanten (eng "apparent dielectric constant"),  $K_a$ . Ekvation (8) togs fram genom multipel regression för uppmätta  $K_a$ -värden relaterade till gravimetriska prover. Vattenhalterna varierade mellan knappt 5 vol-% och knappt 50 vol-%. Flera andra ekvationer för det empiriska sambandet mellan volymetrisk vattenhalt och dielektricitetskonstanten har föreslagits. De flesta har formen av ett tredjegradspolynom liknande Topps ekvation (se ref nedan) men det finns också förslag på en kalibreringsekvation i formen av en rät linje, (Ledieu et al, 1986; Herkelrath et al, 1991, Heimovaara, 1993). De flesta kalibreringar som gjorts är för vattenhalter under 40 vol-%. Den TDR-utrustning som produceras av Soilmoisture Equipment Inc (1990) är utrustad med en inbyggd kalibrering som är utprovad för sand, lättlera och lera vid vattenhalter 0-90 vol-%. Schjning et al (1993) kalibrerade för jordar vars textur varierade mellan ren sand och lättlera, och vattenhalter mellan 0 och 40 vol-%. Dessutom inkluderade man termer för jordens skrymdensitet, organiska halt och andel ler, silt och sand i kalibreringsekvationen. Inkludering av dessa parametrar förbättrade inte nämnvärt korrelationen med uppmätta vattenhaltsvärden för de testade jordarna. Roth et al (1992) kalibrerade sin TDR-utrustning dels för mineraljordar, dels för organiska jordar. Vidare undersökte man om dielektricitetskonstanten påverkades i jordar med högt Fe-innehåll. Slutsatsen var att Fe-innehållet inte påverkade mätningar av dielektricitetskonstanten (Roth et al, 1992). I en studie om inverkan av hårt bundet vatten och fritt vatten på  $K_a$ -värdet konstaterade Dirksen et al (1993) att lerfraktionens sammansättning har betydelse för  $K_a$ -värdet. Ju lägre skrymdensitet och ju finare textur, desto större skillnad från Topps ekvation (ekv(8)). Dock var det oklart om avvikelserna från Topps ekvation berodde på den minskade skrymdensiteten eller om det berodde på ingående partiklars förmåga till att binda hårt bundet vatten (d v s storlek på specifik yta för lerfraktionen).

Man har också föreslagit ett annat sätt att beräkna vattenhalten  $\Theta$ , utifrån uppmätta  $K_a$ -värden, den s k sammansatta dielektricitetskonstanten  $K_c$  (eng "composite dielectric constant") för fuktig jord (Alharti et al, 1987; Roth et al, 1990; Dirksen et al, 1992). Den sammansatta dielektricitetskonstanten beskriver inverkan av luft, vatten och torr jord beroende på hur stor andel av den totala volymen. För ett tre-komponentssystem (här: torr jord, luft och vatten i en jord) blir  $K_c$

$$K_c = (\Theta K_{\text{vatten}}^\alpha + (1-\Theta) K_{\text{torr}}^\alpha + (\Theta - \eta) K_{\text{luft}}^\alpha)^{1/\alpha} \quad (9)$$

där  $K_c$  = sammansatt dielektricitetskonstant

$K_{\text{vatten}}$ ;  $K_{\text{torr}}$ ;  $K_{\text{luft}}$  = dielektricitetskonstant för vatten, torr jord och luft i

marken

$\eta$  = porositet

$\alpha$  = empirisk koefficient;  $-1 < \alpha < 1$

Termen  $\alpha$  bestäms av hur det (sammantagna) elektriska fältet för de ingående komponenterna är orienterat. I jord är vanligtvis värdet på  $\alpha$  omkring 0,5 (Ansoult et al, 1985; Alharthi et al, 1987).

Ekvation(9) kan också utökas för att t ex skilja på hårt bundet vatten respektive fritt vatten i marken. Alharthi et al (1987) mätte dielektricitetskonstanten för torr jord,  $K_D$ , och satte in värden för  $K_{\text{luft}}$  och  $K_{\text{vatten}}$  i ekvation (9), vilket resulterade i

$$\Theta = ((K_c)^{1/2} - (K_D)^{1/2})/7,83 \quad (10)$$

där  $\Theta$  = volymetrisk vattenhalt

$K_c$  = sammansatt dielektricitetskonstant enl ekv(7)

$K_D$  = dielektricitetskonstant för torr jord

Ekvation(10) beskriver matematiskt sambandet mellan vattenhalt och dielektricitetskonstanten till skillnad från Topps ekvation (ekv(8)) som är ett rent empiriskt samband. Men för att använda ekvation(10) behöver man känna till  $K_D$ .  $K_D$  kan man bestämma genom att göra mätningar på torkad jord i laboratoriet. Troligen får man inte exaktare värden på vattenhalt genom att använda ekvation(9) och ekvation(10) eftersom värdena på porositet, temperatur och dielektricitetsvärden måste vara kända. Dessa är ofta svåra att bestämma exakt. Roth et al (1990) anser att ett empiriskt samband mellan vattenhalt och dielektricitetskonstant mätt med TDR oftast ger tillräckligt god noggrannhet för absolutvärden på vattenhalt.

Försök till linjära samband mellan dielektricitetskonstant och volymetrisk vattenhalt utgår från ekvation(10). Herkelrath et al (1991) antog att utbredningshastigheten  $v$  för en elektromagnetisk våg i en ledare omgiven av jord (ekv(1) och ekv(6)) är

$$v = L/(t_{\text{fast}} + t_{\text{vatten}} + t_{\text{luft}}) \quad (11)$$

där  $v$  = elektromagnetisk vågs utbredningshastighet (m/s)

$L$  = problemlängd (m)

$t_{\text{fast}}$ ;  $t_{\text{vatten}}$ ;  $t_{\text{luft}}$  = tid för utbredning i fast jordmaterial, vatten och luft (s)

Ekvation(11) kombineras med ekvation (3) (jmf ekv(7))

$$t_i = L_i (\sqrt{\epsilon'_i}/c) \quad (12)$$

där  $t_i$  = enl ovan för  $i$ =jord; vatten; luft (s)

$L_i$  = enl ovan för  $i$ = jord; vatten; luft (m)

$\epsilon'_i$  = relativ permittivitet för  $i$ = jord; vatten; luft

$c$  = ljushastighet i vacuum (m/s)

Herkelrath et al (1991) kombinerade ekvation(10), (11) och (12) till

$$\Theta = 38,2/v - 0,051$$

(13)

där  $\Theta$  = volymetrisk vattenhalt (vol-%)

$v$  = elektromagnetisk vågs utbredningshastighet i prob (m/s)

På liknande sätt kalibrerade Ledieu et al (1986) sin TDR-utrustning. Istället för att använda sig av hastigheten  $v$ , använde man sig av tiden  $t$ , d  $v$  s den tid som det tar för mätsignalen att förflytta sig sträckan  $\Delta s = 2 \cdot \text{problängden}$ . Både kalibreringen enligt Ledieu et al (1986) och ekvation(13) ger ett linjärt samband mellan pulsens tid respektive utbredningshastighet och volymetrisk vattenhalt. Eftersom den mätta storheten i TDR-utrustningen ofta är tid eller sträcka (och inte någon variant av dielektricitetskonstanten), kan man enkelt räkna ut utbredningshastigheten enligt ekvation(6). Det linjära sambandet är matematiskt något enklare att kalibrera mot än den multipla regression som Topps ekvation (ekv(8)) innebär. Herkelrath et al (1991) hade ett fel på  $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  för kalibreringsekvationens skattade vattenhalt, vilket är i samma storleksordning som Topp et al (1980) anger för ekvation(8).

Ovan nämnda författare har använt olika typer av TDR-system för sina respektive kalibreringar. Dessutom är en del gjorda i fält och en del på laboratorium vilket gör att det är svårt att veta vilken kalibreringsekvation som bör användas när.

#### *Olika typer av TDR-prober och -kopplingar*

I olika TDR-system har det visat sig att ju längre ledningar och ju kortare prober som använts, desto sämre reflektion av mätsignalen (Herkeleath et al, 1991; Hook et al, 1992; Heimovaara, 1993). Detta beror på att längre ledningar försvagar mätsignalen och ger upphov till störningar (eng "noise") vid reflektion. Detta kan göra avläsningar mindre exakta, särskilt i torr jord (=låg dielektricitetskonstant,  $K_r$ ), särskilt om man använder sig av automatisk avläsning av mätsignalens spänningsförändring över tiden.

Det finns ingen generell praxis för hur proberna ska vara utformade. Genom att använda två prober, d  $v$  s ett probpar, behöver man göra en transformering av mätsignalen. I detta fallet kallas systemet balanserat (eng "balanced"). Man använder en omkopplare/ transformator mellan coaxialkabel från mätinstrumentet till en tvåledare för att mätsignalen inte ska störas av de olika ledningarnas skillnader i impedans. I ett s k obalanserat system används vanligtvis tre prober (eng "triple-wired"), där två prober är kopplade till yttre ledning, och den mittersta proben kopplas till inre ledning i coaxialkabeln. I försök att göra avläsningen av mätsignal lättare har t ex Ledieu et al (1986) monterat en diod vid probernas koppling till tvåledaren. Detta gav en tydligare "puckel" på mätsignalen, vilket gjorde avläsningen exaktare. Enligt Heimovaara (1993) kan en sådan diod påverka mätsignalen så att det sker flera reflektioner då mätsignalen går in i proberna.

Hook et al (1992) konstruerade egna kretsar med dioder, signalförstärkning och signalfilter (s k "remotely switched shorting diodes") kopplade till prober i ett obalanserat system. Dessa dioder ökade möjligheten till automatisk avläsning av mätsignalens reflektion. Man kunde använda upp till 100 m långa sladdar i ett försök med hjälp av den förstärkta signalen. Även Heimovaara (1993) testade olika kabellängder. I försöket kombinerades olika kabellängder (2-24 m) med olika problängder (0,05-0,5 m). Systemet var obalanserat, och proberna s k "triple-

wired". Prober längre än 0,2 m kunde användas till de 24 m-ledningar, och prober <0,10 m till ledningar kortare än 15 m. Heimovaara påpekar att under torra förhållanden, dvs låga markvattenhalter, bör man ha kortare ledningar och/eller längre prober för att få lika exakta mätresultat.

### *Mätområde runt TDR-prober*

Den jordvolym som påverkar uppmätta  $K_s$ -värden är begränsad till en relativt liten volym runt själva proben. Baker et al (1989) undersökte probernas mätvolym och hur olika delar av denna mätvolym påverkas för ett probpar av stål anslutna till en TDR-utrustning. Proberna var 300 mm långa och hade en ytterdiameter på 3,175 mm och var placerade med 50 mm mellanrum. Enligt Baker et al (1989) så sker den "effektiva" mätningen av vattenhalt inom en rektangel med area 1000 mm<sup>2</sup> i planet vinkelrät mot probleängden under antagande att markvatten är det kontinuerliga mediumet i marken. Vid rektangelns kant är den relativa mät känsligheten ca 40% av maximal mät känslighet som finns vid ledaren av mätsignalen. Den totala volym som mätningen sker i är betydligt större; vid denna försöksupställning blev motsvarande rektangel för relativ mät känslighet 3600 mm<sup>2</sup>. Man undersökte också hur känsligheten varierade inom mätområdet. I dessa försök varierade känsligheten exponentiellt avtagande med avståndet från proberna (Baker et al, 1989). Enligt Ledieu et al (1986) är 94% utsänd energi (i elektromagnetisk puls) koncentrerad inom en cylinder, med diameter  $d_c$ , runt mätproberna. Diametern  $d_c$  motsvarar 2 ggr avståndet mellan proberna, vilket skulle resultera i en större mätvolym jämfört med vad som anges av Baker et al (1989). Varken Ledieu et al (1986) eller Baker et al (1989) diskuterar om probernas radie eventuellt kan påverka mätvolymen.

Knight (1992) räknade ut probernas mätvolym genom integrering av en elektromagnetisk vågs E-fält runt en prob under antagande att omgivande vattenhalt inte är helt homogent i mätvolymen. För en prob med radie  $r_p=3$  mm placerad på avstånd  $a=50$  mm från den andra proben är 90% av den kumulativa energin inom en radie  $r_s=45$  mm från proben. Om probens radie är liten i förhållande till avståndet mellan proberna så koncentreras E-fältet runt respektive prob, s k "skin effect". Därför rekommenderas att kvoten mellan probradie och prob-avstånd ( $r_p/a$ ) ej understiger 0,1 för att undvika att diskontinuiteter mellan prob och omgivande jord får alltför stor inverkan på mätresultatet (Knight, 1992).

Sammanfattningsvis verkar ovanstående författare vara överens om att mätytan (i ett plan vinkelrät mot proben) för en prob med t ex radie  $r_p=3$  mm på avstånd  $a=50$  mm ifrån varandra inte påverkas nämnvärt av markens vattenhalt utanför en sfär med radie  $r_s=50$  mm från respektive prob. Eventuella diskontinuiteter i anslutningen mellan prob och omgivande material, t ex sprickbildning längs prober, kan få en stor inverkan på mätresultatet. Dock beskriver ingen av dem om radien på mätområde ändras med hög-låg vattenhalt i marken.

### **Neutronsond**

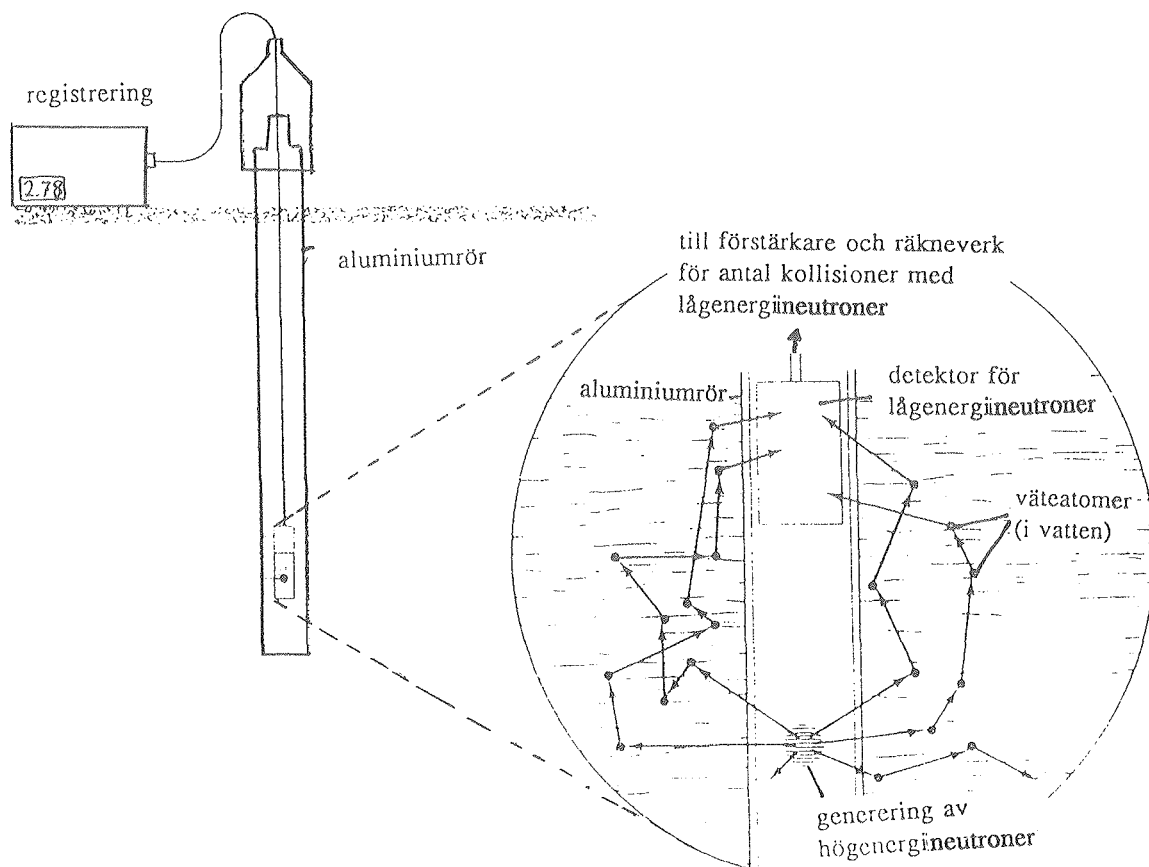
En stor del av följande principresonemang kring neutronsonden är hämtad från Gardner, 1965.

Väte har en förmåga att reducera neutroners energi, vilket man utnyttjar vid neutronsondsmätningar. Högenergineutroner (0,1-10 Mev) sänds ut från en radioaktiv källa.

Dessa neutroner kolliderar med omgivande material varvid de förlorar kinetisk energi. Neutronerna får då termisk energinivå (eng "thermalization"), d v s samma energinivå som vanliga molekyler/atomer har i rumstemperatur. Vid kollisionen sker en energiomvandling (inelastiska kollisioner ger värmeenergi). Två faktorer påverkar utsända neutroners hastighet:

- a) energiöverföring vid kollision - mängden överförd energi beror på hur stor massa/atomnummer kolliderande molekyl/atom har.
- b) statistisk sannolikhet för att kollision ska inträffa

När de usända högenergineutronerna kolliderar med väte så bildas ett moln av lågenergi/termiska neutroner. Densiteten hos detta neutronmoln är proportionellt mot jordens vattenhalt. Principen för att beräkna denna densitet liknar funktionen hos en s k Geiger-räknare. Man låter ett ämne, vanligtvis  $\text{BF}_3$ -gas reagera med de termiska neutronerna, så att detta ämne joniseras. Vid jonisering avges alfapartiklar (d v s heliumatomer) som kan registreras som elektriska stötar. Det är antalet sådana elektriska stötar som räknas i neutronsonden. För mätningar av vattenhalt i mark anges ofta den sk "count rate" för en viss mätning. Vanligtvis innebär detta att man relaterat uppmätt antal räkningar till uppmätt antal räkningar för apparaten i rent vatten.



Figur 2: Schematisk bild över hur en neutronsond fungerar. (Efter Brady, 1990)

Väte bundet i markvattnet är det vanligaste förekommande ämne som reducerar högenergineutroner i de flesta jordar. Det finns flera andra ämnen som kan påverka densiteten hos neutronmolnet t ex kol (C), järn (Fe), fosfor (P), kadmium (Cd), bor (B), litium (Li) och klor (Cl). Skälet är att dessa atomer/molekyler har en stor benägenhet att reagera med

termiska neutroner vilket kan ge en felaktig bild av neutronmolnets densitet i förhållande till markvattenhalt. I de flesta fall kan man bortse från dessa ämnens inverkan på mätresultaten då förekomsten av dem är relativt låg i marken (Hillel, 1982). Ett annat problem i samband med mätningar med neutronsond är att man troligtvis inte kan registrera hårt bundet vatten i marken, då utsända högenergineutroner inte kan kollidera med väte i hårt bundet vatten. Detta kan vara ett problem i jordar med högt lerinnehåll och/eller mycket organiskt material (Visvalingam et al, 1972).

Den jordvolym som neutronsonden mäter på är beroende av jordens innehåll av väte. Vid en låg vattenhalt (låg densitet av väte) behöver utsända högenergineutroner färdas en längre sträcka från källan för att kollidera så pass många gånger att de når det termiska energistadiet. Vid en hög vattenhalt blir mätradien mindre eftersom högenergineutronerna blir termiska inom ett mindre avstånd från källan. Det har också visat sig att mätradien är mer väldefinierad för högre vattenhalter. Enligt Haahr et al (1965) varierar radien  $r$  för en tänkt sfär där vattenhaltsmätning sker, från  $r > 50$  cm för 5 vol-% till  $r = 15-20$  cm för 30 vol-% vatten.

I slutet av 50-talet och under 60-talet då man började att använda neutronsondsmetoden för vattenhaltsmätningar, så föreslogs ett antal varianter på en universalkalibreringsekvation (Visvalingam, 1972). Idag gör man vanligtvis sin egen kalibrering i fält eller på laboratorie alternativt kontrollerar eventuell ekvation föreslagen av tillverkare.

## MATERIAL OCH METODER

### Beskrivning av försöksplats och utförda mätningar

Samtliga mätningar gjordes i försök nr 552/93 under säsongen 1993. Försöket ingår i en försöksserie (R2-4031) med tidig sådd, och genomfördes på Kasby gård ca 10 km SO om Uppsala. I försöket provades 3 olika kornsorter (Filippa, Golf och Lina) vid tre såtidpunkter (14/4, 23/4 och 3/5) i fyra block, d v s ett två-faktoriellt försök med fyra upprepningar (appendix I). Resultat från samtliga försök i denna försöksserie finns redovisade i Rapport från avdelningen för jordbearbetning nr 86 (Arvidsson, 1994).

De olika utrustningarna för vattenhaltsmätningar var monterade i två rutor med extra tidig sådd, och i två rutor med normal såtid. Alla rutorna var sådda med kornsorten Golf. I samtliga rutor gjordes mätningar dels under gröda med naturliga nederbördsförhållanden, och dels under gröda utsatt för artificiell torka; genom att montera tak över grödan tillfördes ingen nederbörd vid mätplatsen. Vattenhaltsmätningar med Tektronix (1502C Metallic Time Domain Reflectometer; Tektronix, Inc, Beaverton, OR) och Trase (Trase 6010XI, Soilmoisture Equipment Corp, Santa Barbara, CA) gjordes två till tre gånger per vecka, och mätningar med neutronsond (CPN 530 Hydroprobe, CPN Corp, Martinez, CA) en gång per vecka i början av säsongen och ungefär var fjortonde dag till och med den 11/8.

### *Tektronix: utrustning och installering*

Utrustningen som användes i försöket med Tektronix kabeltestare var tillverkad av A Thomsen, Institutionen för agrometeorologi, Foulum, Danmark. Sex parvisa 0,30 m långa prober i rostfritt stål med diameter  $\varnothing=0,006$  m placerade på avståndet 0,05 m ifrån varandra, var kopplade till en kopplingsplint med 4 m lång tvåledare (200 $\Omega$ , Belden typ 9851). Tvåledaren anslöts till proberna med stålpiggar. Stålpiggar och tvåledare var omgivna av plast för att hindras från påverkan av vatten. Stålpiggarna från tvåledaren anslöts till prob via ett hål i respektive probände, och hölls på plats med en skruv gängad från probänden. Anslutning i kopplingsplint av tvåledarens andra ände var också inplastade. Anslutningen var utformad som en böjd stålpigg för respektive ledare. Här anslöt man en krokodilklämman som utgjorde den ena änden av coaxialkabeln (50 $\Omega$ ) från kabeltestaren. En transformator (Anzac Division, USA, typ TP-103) var placerad mellan coaxialkabeln och krokodilklämman. Den andra änden av coaxialkabeln var ansluten till Tektronix kabeltestare. Avläsning skedde manuellt med Tektronix kabeltestare genom att flytta krokodilklämman till respektive anslutet probpar på kopplingsplinten (appendix II).

De parvisa mätproberna för TDR/Tektronix installerades horisontellt i två rutor med extratidig såtidpunkt (14/4) för Golf och två rutor med normal såtidpunkt (3/5) för Golf på 0,2, 0,4 och 0,8 m djup. I var och en av de fyra rutorna installerades mätproberna i två gropar som sedan fylldes igen, och den ena gropen täcktes med skärmtak (figur 3). Proberna grävdes ner den 29/4 i rutor med extra tidig sådd, och den 5/5 i rutor med normal såtidpunkt. Skärmtak monterades den 6/5.

### *Trase: utrustning och installering*

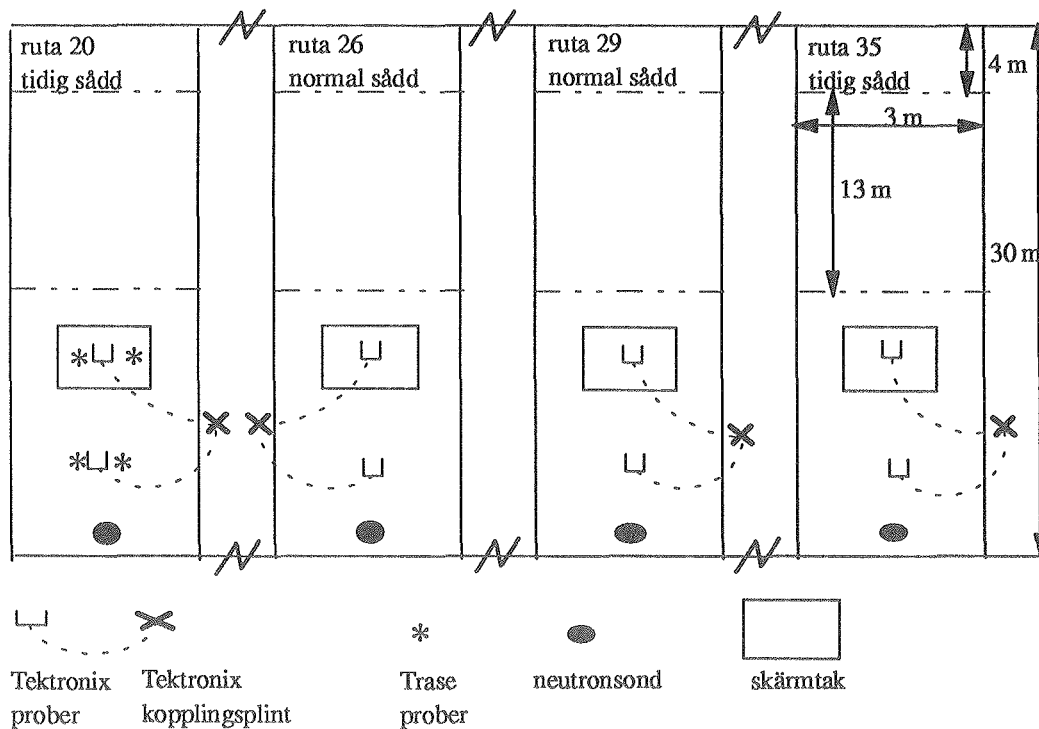
Trase är ett TDR-instrument speciellt anpassat för vatten- och salthaltsmätningar i jord. För försök 552/93 användes till Trase hörande prober och sladdar tillverkade av Soilmoisture Equipment Corp (1990). Systemet är så kallat obalanserat, d v s coaxialkabeln från signalgenererings- och mätenhet går hela vägen till tre-pinnarsproben (eng "triple-wired"). Proberna är gjorda av rostfritt stål, och avståndet mellan mittersta prob och yttre prob var 0,023 m. De var alla 0,20 m långa med diameter  $\varnothing=0,003$  m. Coaxialkablarnas längd var 2 m till 3 m.

I ett led med extratidig sådd installerades två stycken trepinnars mätprober för Trase horisontellt på 0,2, 0,4 och 0,8 m djup i samma gropar som mätproberna för Tektronix (figur 3). Installeringen av dessa prober skedde den 29/4. Den ena mätplatsen täcktes med skärmtak den 6/5.

### *Installation av neutronsondrör*

Neutronsondrör i aluminium (längd 2 m) installerades den 4/5 i samma försöksled som TDR-utrustningen (figur 3). För att få fler upprepningar för neutronsonden installerades mätrör även i rutor med extratidig och normal såtidpunkt för kornsort Golf i block I och II i samma försök. Inga neutronsondrör installerades under skärmtak. Mätningar i neutronsondrören skedde från 0,2 m till 1 m djup med 0,1 m intervall.





Figur 3: Schematisk bild över installerad mätutrustning i försök nr 552/93 på Kasby.

#### Gravimetriska vattenhalter

Gravimetriska vattenhaltsprover togs vid sådd, installering av mätutrustning, vid uttag av cylindrar, då mätutrustningen monterades ner strax innan skörd samt ytterligare två gånger under säsongen (25/5, 28/6). Dessa två gånger togs proverna med jordborr. Samtliga gravimetriska prover vägdes in, torkades i 48 h i 105 °C och vägdes igen efter torkning.

#### Beskrivning av försöksplatsen Kasby 552/93

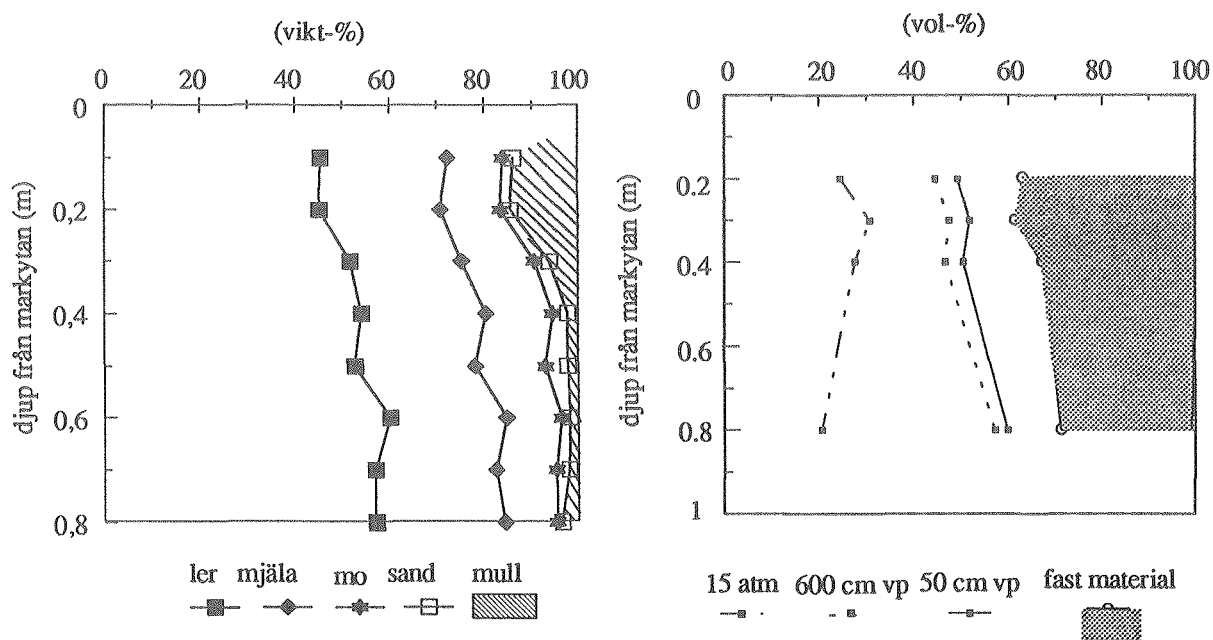
För att bestämma skrymdensitet och vissningsgräns togs cylindrar på djupen 0,15-0,25 m, 0,25-0,35 m, 0,35-0,45 m och 0,75-0,85 m i rutorna 22 och 31 den 14/5. I varje ruta togs 4 cylindrar på respektive djup. Prover för mekanisk analys, kompaktdensitet och pH-bestämning togs i rutorna 2 och 8 var 10:e cm ner till 0,9 m djup den 6/8.

Den mekaniska analysen gav genomgående höga lerhalter för hela profilen. På grund av hög halt av organiskt material i skiktet 0-0,3 m blev den mekaniska analysens felprocent >5%. Jorden på Kasby har en mycket hög porositet, vilket ger en låg skrymdensitet (tabell 1).

Tabell 1: Skrymdensitet, kompaktdensitet, porositet, vattenhalt vid 15 atm ( $w_{15}$ ) och pH för Kasby 552/93

Djup (m)	Skrym- densitet (g/cm <sup>3</sup> )	Kompakt- densitet (g/cm <sup>3</sup> )	Porositet	$w_{15}$ (vikt-%)	pH
0,1	-	2,34	-	28,4	5,8
0,2	0,87	2,33	63,4	28,4	5,7
0,3	0,95	2,52	61,8	32,4	4,9
0,4	0,84	2,59	67,4	33,1	4,4
0,5	-	2,60	-	32,1	4,2
0,6	-	2,56	-	28,9	4,1
0,7	-	2,57	-	28,9	4,0
0,8	0,73	2,55	71,4	28,5	3,9

Den vattenhållande förmågan är stor. Vid vissningsgränsen ( $w_{15}$ ) är vattenhalterna omkring 30 vikt-%. Resultaten från den mekaniska analysen och värdena på skrymdensitet visar att jorden på Kasby 552/93 troligen är en gyttjelera (figur 4).



Figur 4: Texturdiagram och tensionskurvor för försöket på Kasby.

## Väderlek

Potentiell avdunstning mättes kontinuerligt i försök nr 552/93 under säsongen med Anderssons evaporimeter (Andersson, 1969). Nederbörden i försöket mättes också men byttes ut mot nederbördsdata uppmätt ca 1 km NV om försöket på grund av bristfällig registrering av nederbörd hos den ursprungliga utrustningen. Nederbörden mättes med en s k 'tipping bucket' (ARG 100) med automatisk registrering.

## Mätningar i växande gröda

För att få en skattning på grödans rotutveckling mättes antalet rötter för normal såtidpunkt (ruta 2) och för tidig såtidpunkt (ruta 8). I respektive ruta grävdes gropar, och antalet rötter räknades för tre sårader (med tre upprepningar per grop) för varje 10 cm-intervall från markytan. Markväggen var täckt med svart plast mellan mättillfällena. Vid varje mätning grävdes 20-30 cm av gropens vägg bort för att få så opåverkade plantor som möjligt att mäta på. Antalet rötter per nivå är ett genomsnittsmått för tre sårader.

Plantetablering och bestockning bestämdes genom planträkning (tidig sådd 11/5, och normal sådd 18/5), skott per planta (17/6) samt ax per planta (27/7). Slutligen mättes också avkastningen (5/9).

## Beräkningar

### Allmänt

De gravimetriska vattenhaltsproverna multiplicerades med skrymdensiteter för motsvarande djup enligt

$$\theta = w \rho_s / \rho_w \quad (14)$$

där  $\theta$  = vattenhalt (vol-%)  
 $\rho_s$  = skrymdensitet ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $\rho_w$  = densitet för vatten ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $w$  = vattenhalt (vikt-%)

Därefter användes de volymetriska vattenhalterna till regressionsanalyser för att skatta de olika kalibreringsekvationerna för respektive mätinstrument. För linjära regressioner användes värden på gravimetriskt tagna prover som oberoende variabel (x), och uppmätt värde enligt mätinstrument som beroende variabel (y). Multipel regression användes endast vid skattning av kalibreringsekvation för Tektronix. I detta fallet var uppmätta värden enligt Tektronix oberoende, och de gravimetriska proverna var beroende variabel. De statistiska beräkningarna gjordes i Lotus 3.2 (Lotus Development Corp, Kista, 1990) och i SAS (SAS Institute Inc, Cary, NC (USA), 1985-87, ). Signifikansnivå anges med tecknet \*. För  $p < 0,05$  skrivs \*,  $p < 0,01$  \*\*, och  $p < 0,001$  \*\*\* i resultatredovisningen.

### Skattning av vattenbalans

Som ett mått på grödans vattenförbrukning jämfördes grödans aktuella evapotranspiration ( $ET_a$ ) med den potentiella evapotranspirationen ( $ET_p$ ) för de olika såtidpunkterna. Den aktuella evapotranspirationen skattades med hjälp av en formel för vattenbalans i mark enligt Hillel (1982)

$$\Delta S = (P + I + U) - (R + D + ET_a) \quad (15)$$

där  $\Delta S$  = vattenhaltsförändring i avgränsat markskikt

P = nederbörd

I = bevattning

U = kapillär upptransport av vatten

R = ytavrinning

D = snabbt vattenflöde från rotzonen

$ET_a$  = aktuell evapotranspiration

Formel (15) användes under antagande att

$$I = U = R = D = 0$$

d v s att endast nederbörd och evapotranspirationen påverkar vattenhaltsförändringen i rotzonen. För att beräkna vattenhaltsförändringen användes gravimetriska prover omräknade till volymetriska vattenhalter.

## RESULTAT

### Kalibrering och jämförelse av mätinstrument

#### *Kalibrering av Tektronix*

Då Topps ekvation (Topp et al, 1980), som normalt använts vid avdelningen för jordbearbetning för mätningar med Tektronix, inte är framtagen för vattenhalter över 50 vol-% så gjordes en ny kalibrering för jorden i försök 552/93 (figur 5a). I figur 5b jämförs denna ekvation med andra empiriskt framtagna ekvationer.

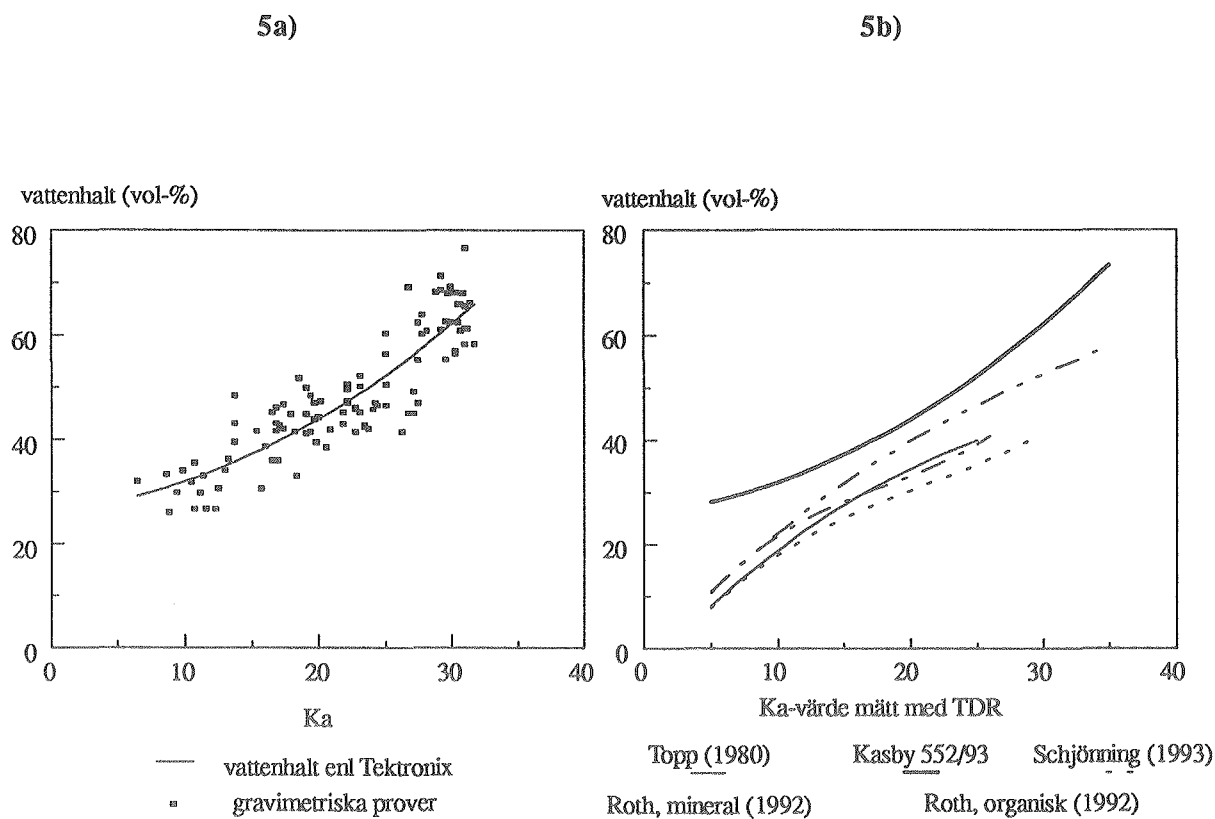
För mätningar på Kasby med ovan beskrivna TDR-utrustning erhöles följande ekvation:

$$\Theta = 26,03 + 0,2937K_a + 0,0303K_a^2 \quad (16)$$

där  $\Theta$  = volymetrisk vattenhalt (vol-%)

$K_a$  = dielektricitetskonstant enl ekv (6);  $5 < K_a < 34$

Med  $n=108$  observationer blev korrelationskoefficienten  $R^2=0,789$  (\*\*\*) och standardavvikelse för skattat y-värde,  $SE=5,0$  för ekvation(16).



Figur 5a: Vattenhalt (vol-%) som funktion av dielektricitetskonstant,  $K_a$ , mätt med Tektronix, samt kalibreringsekvation (ekv(16)) för Tektronix i försök nr 552/93.

Figur 5b: Olika kalibreringsfunktioner för TDR-mätningar av vattenhalt.

Kalibreringsekvationen för Kasby ger avsevärt högre vattenhalter för korresponderande  $K_a$ -värden, jämfört med andra kalibreringsekvationer. I litteratur har nya kalibreringsekvationer för mineraljordar ofta gett lägre vattenhalter än Topps ekvation (Topp et al, 1980) för ett givet  $K_a$ -värde. Den kalibreringsekvation som ligger närmast ekvationen för Kasby är framtagen i laboratorium för organiska jordar (Roth et al, 1992). De organiska jordarnas skrymdensitet varierade mellan 0,26 och 0,77  $g/cm^3$ , vilket kan jämföras med Kasby-jordens skrymdensiteter 0,77-0,95  $g/cm^3$ . För Kasby resulterade den multipla regressionen i ett andragradspolynom, och inte ett tredjegradspolynom, vilket ofta redovisas i litteraturen (Topp et al, 1980; Roth et al, 1992; Schjönning et al, 1993).

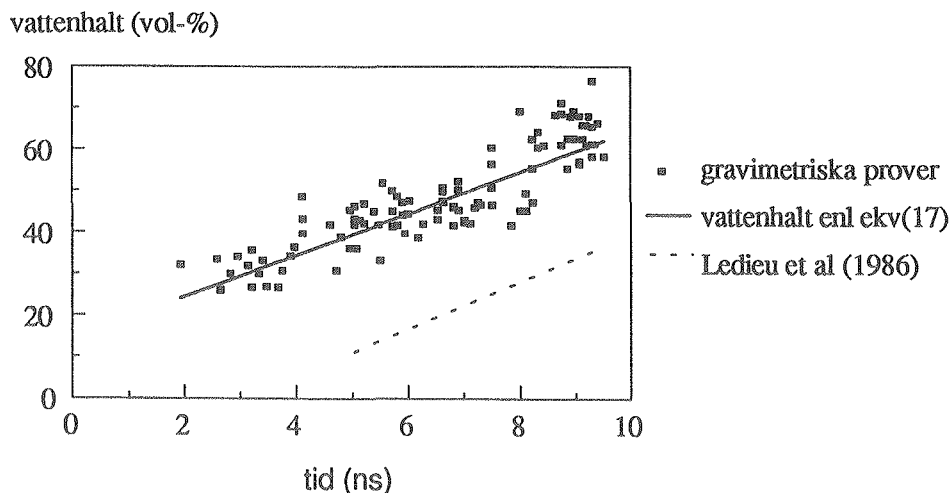
Det gjordes också ett försök att kalibrera den av Tektronix mätta tiden  $t$  för den elektromagnetiska pulsens utbredning i prover mot markens vattenhalt enligt Ledieu et al (1986). Den enkla linjära kalibreringsekvationen blev (fig 6)

$$\Theta = 14,290 + 5,201t \quad (17)$$

där  $\Theta$  = vattenhalt (vol-%)

$t$  = tid för mätsignal att färdas genom prover (ns);  $1,9 < t < 9,5$

För ekvation (17) med antal observationer  $n=108$  och korrelationskoefficient  $R^2=0,777$  (\*\*\*) , blev standardavvikelsen för skattat vattenhaltsvärde,  $SE=5,9$ . Figur 6 visar kalibreringsekvationen enligt ekvation(17) tillsammans med den kalibrering som Ledieu et al (1986) tog fram för lättlera/mellanlera med skrymdensitet  $\rho_s=1,34$  till  $1,78$  g/cm<sup>2</sup>.



Figur 6: Vattenhalt (vol-%) som funktion av elektromagnetisk vågs uppehållstid  $t$  (ns) mätt med Tektronix, samt kalibrering med enkel linjär regression (ekv(17)) i försök 552/93. Även kalibreringsekvation enligt Ledieu et al (1986) visas.

Gravimetriskt tagna vattenhaltsprover användes också vid ett försök att kalibrera Tektronix mot den elektriska pulsens uppehållstid  $t$  i prover med multipel regression. Kalibreringsekvationen blev då

$$\Theta = 26,02 + 0,981t + 0,337t^2 \quad (18)$$

där  $\Theta$  = vattenhalt (vol-%)

$t$  = tid för mätsignalens utbredning i prover (ns);  $1,9 < t < 9,5$

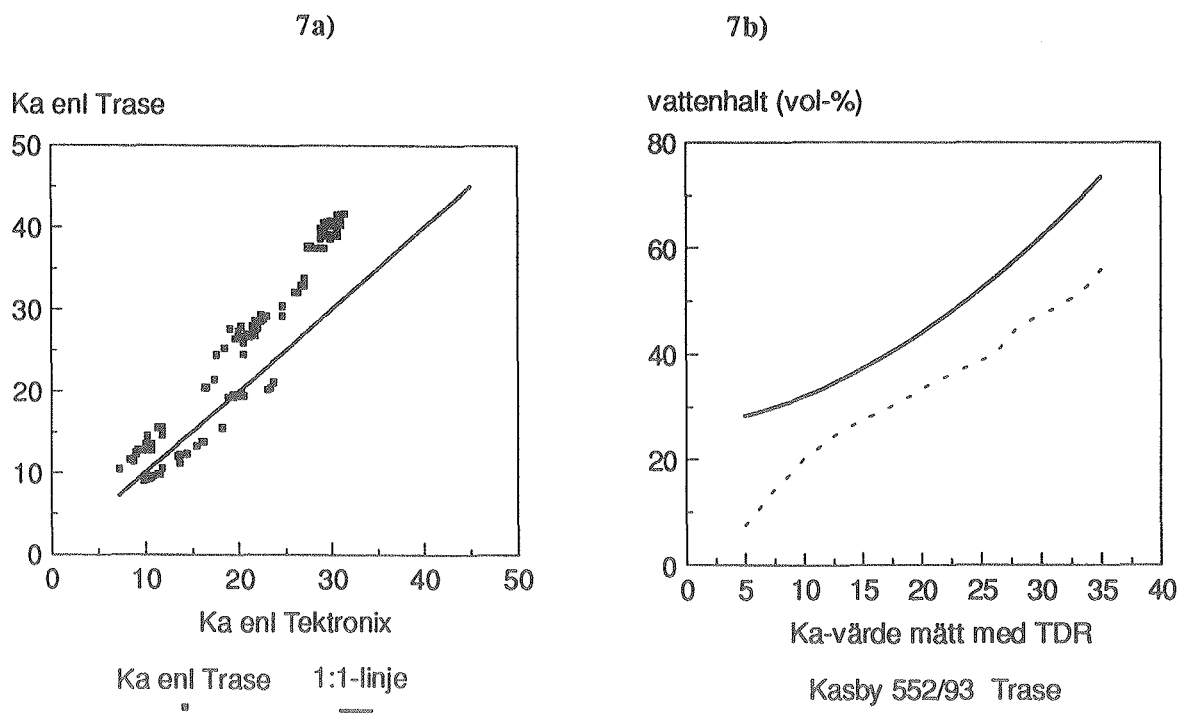
För ekvation(18) med  $n=108$  observationer blev korrelationskoefficienten  $R^2=0,789$ (\*\*\*) , och standardfelet för skattat vattenhaltsvärde,  $SE=5,7$ .

I följande beräkningar av vattenhalt mätt med Tektronix användes ekvation(16) då denna gav ett något bättre korrelationskoefficient samt lägre fel för skattad vattenhalt.

#### *Kontroll av Trase kalibrering*

Genom att jämföra vattenhaltsvärden avlästa från Trase med uträknade vattenhaltsvärden

enligt ekvation(16), kan man konstatera att Trase undervärderade markvattenhalter vid vattenhalter inom intervallet 30-50 vol-%, och gav ungefär samma värden vid vattenhalter >55 vol-%.  $K_a$ -värden för Trase jämfördes med erhållna  $K_a$ -värden mätt med Tektronix (figur 7a).



Figur 7a: Jämförelse mellan Tektronix och Trase avseende uppmätt relativ dielektricitetskonstant,  $K_a$ . Figur 7b: Kalibreringsekvation för Tektronix i försök 552/93 (ekv(16)), och förprogrammerad kalibreringskurva för Trase.

De olika utrustningarna ger skilda värden för relativa dielektricitetskonstanten  $K_a$  vid mätning vid samma tidpunkt och djup. För  $K_a > 20$  mäter Trase ett högre  $K_a$ -värde än Tektronix. Den förprogrammerade standardeviationen för vattenhalter som funktion av  $K_a$  visas i figur 7b. Denna kalibreringsekvation ger betydligt lägre vattenhalt än Tektronix kalibreringsekvation (ekv(16)) för givet  $K_a$ -värde i Kasby 552/93. Vid höga vattenhalter kompenseras detta genom att Trase gav ett högre värde för  $K_a$  än Tektronix vid samma vattenhalt, framförallt då gravimetriska vattenhalter var <55 vol-%.

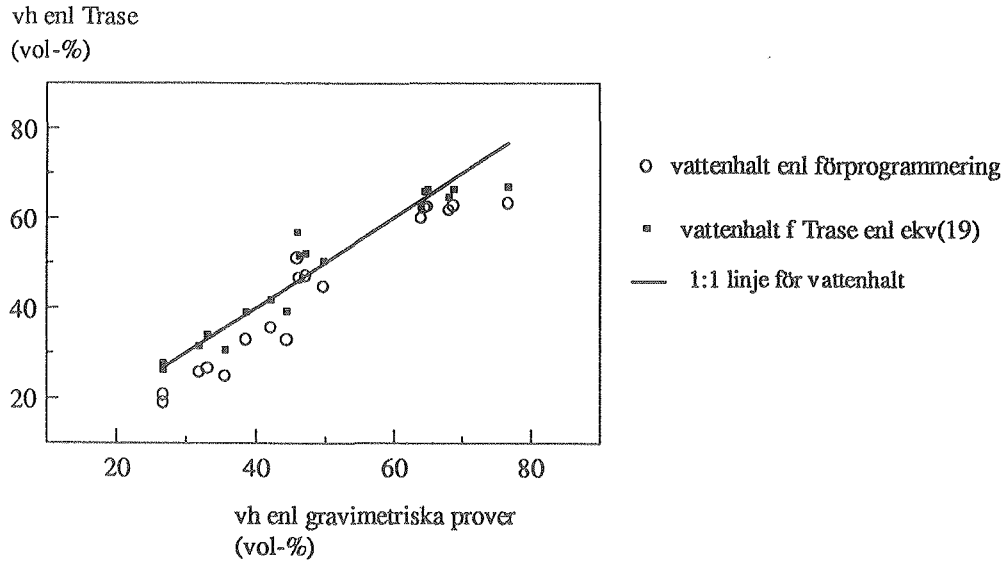
Också för Trase kalibrerades avlästa vattenhalters  $K_a$ -värden mot gravimetriskt tagna prover. Den linjära regressionen blev

$$\Theta = 14,01 + 1,30K_a$$

där  $\Theta$  = volymetrisk vattenhalt (vol-%)

$K_a$  = dielektricitetskonstant enligt Trase;  $9 < K_a < 41$

För ekvation(19) med  $n=18$  observationer blev korrelationskoefficienten  $R^2=0,917$ , och standardavvikelsen för skattat vattenhaltsvärde,  $SE=4,6$ . Trase kalibrering mot gravimetriska prover enligt ekvation(19) visas i figur 8.



Figur 8: Vattenhaltsvärden för Trase på Kasby enligt kalibrering (ekv (19)) och enligt förprogrammerad ekvation i Trase.

#### Kalibrering av neutronsond

För neutronsonden erhöles för matjorden (0-40 cm) följande kalibreringsekvation

$$\theta_m = -31,74 + 0,00406x_m \quad (20)$$

där  $\theta_m$  = volymetrisk vattenhalt (vol-%)

$x_m$  = mätutslag enl neutronsond/ s k "count rate";  $14\ 500 < x_m < 20\ 000$

Med  $n=33$  observationer blev korrelationskoefficienten  $R^2=0,61$  och standardavvikelse för skattat y-värde,  $SE=3,7$ .

För alven (80 cm) blev motsvarande ekvation

$$\theta_a = -37,80 + 0,0044x_a \quad (21)$$

där  $\theta_a$  = volymetrisk vattenhalt (vol-%)

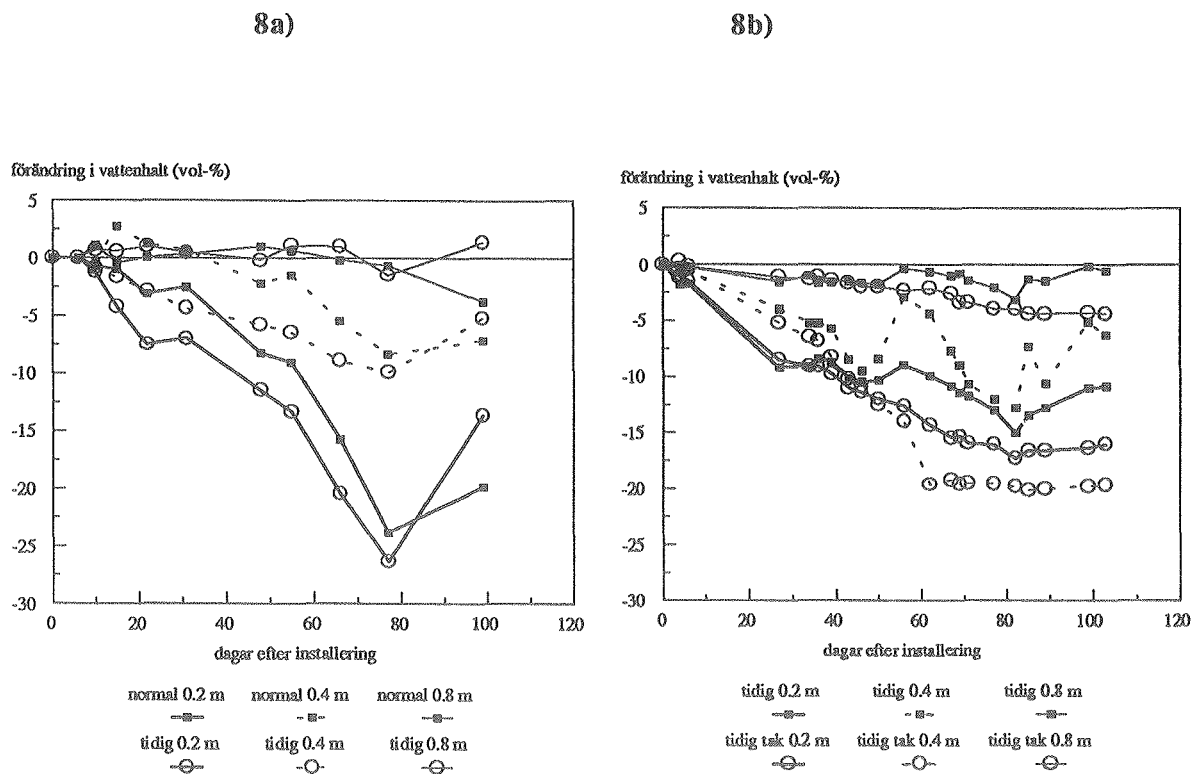
$x_a$  = mätutslag enl neutronsond/ s k "count rate";  $19\ 300 < x_a < 23\ 700$

Trots att korrelationskoefficienten ( $R^2=0,398$ ) för ekvation(21) var låg, användes separata kalibreringsekvationer för matjord respektive alv vid beräkningar av vattenhaltsvärden, eftersom skrymdensiteterna för respektive skikt är olika. För  $n=38$  observationer blev standardavvikelsen för skattat y-värde i ekvation(21),  $SE=6,1$ .



## Jämförelse mellan olika mätutrustningar

De olika mätutrustningarna gav varierande värden på volymetriska vattenhalter. Som jämförelse visas här de genomsnittliga vattenhaltsförändringarna under odlingsperioden för neutronsondsmätningar och Trase (figur 8). Observera att mätningarna för Trase är gjorda i försök med tidig sådd (med och utan skärmtak), och mätningar med neutronsond är gjorda i gröda med tidig och normal såtidpunkt.



Figur 8: Jämförelse av förändring av vattenhalt mätt med neutronsond (a) och Trase (b) (direkt avlästa vattenhaltsvärden) under vegetationsperioden.

De absoluta vattenhaltsvärdena för Tektronix och neutronsonden skiljer sig inte mycket ifrån varandra, eftersom de är kalibrerade efter samma gravimetriska prover. Vattenhalter uppmätta med Trase är inte justerade med avseende på gravimetriska prover. Därför visar mätningar från Trase genomgående lägre vattenhalter då markens vattenhalt (enligt gravimetriska prover) varit under 50 vol-%. För värden över 55 vol-% stämmer Trase-värden bra överens med gravimetriska prover (jmf Kontroll av kalibrering av Trase). Absoluta värden på vattenhalter vid installering och vid nedmontering av de olika mätutrustningarna redovisas i tabell 2 för gröda med tidig såtidpunkt, och i tabell 3 för gröda med normal såtidpunkt. Värdena för Trase är inte justerade.

Även om absolutvärden av vattenhalter skiljer sig åt, så stämmer förändringen av vattenhalt över en tidsperiod relativt väl överens mellan de olika mätinstrumenten. Bäst är överensstämmelsen mellan Tektronix och neutronsonden i den tidiga sådden, men överensstämmelsen med Trase vattenhaltsförändring är också bra för 0,2 m djup. Störst

skillnad mellan olika instruments uppmätta vattenhaltsförändring är på 0,4 m djup. Även på 0,8 m djup är variationen stor, men skillnader i vattenhalt för ett mätinstrument ligger ofta inom gränsen för respektive instruments skattningsfel i kalibreringsekvationen. Det mest avvikande värdet är Trase värde på 0,4 m djup i tidig sådd med tak, och neutronsondsvärdet i normal sådd på 0,2 m djup.

Tabell 2: Tidig sådd (14/4) med och utan tak: absolutvärden (vol-%) och förändring (vol-%) i vattenhalt under säsong för Tektronix, Trase, neutronsond och gravimetriska prover

Djup	Tektronix			Trase			neutronsond			gravimetriskt		
	29/4	11/8	Δvh	29/4	11/8	Δvh	4/5	11/8	Δvh	29/4	11/8	Δvh
0,2 m	44,3	33,3	-11	34,9	24,8	-10	42,2	30,5	-12	44,0	35,9	-8
0,2 m (tak)	50,2	31,3	-19	35,6	18,9	-17	-	-	-	44,0	26,6	-17
0,4 m	53,8	43,5	-10	51,0	44,7	-6	48,1	46,2	-2	48,0	49,1	1
0,4 m (tak)	51,7	39,2	-13	52,5	32,3	-20?	-	-	-	48,0	43,8	-4
0,8 m	61,2	56,3	-5	63,2	60,0	-3	63,6	64,0	0	68,8	62,3	-7
0,8 m (tak)	63,8	54,9	-9	64,2	64,2	-2	-	-	-	68,8	62,1	-7

Tabell 3: Normal såtidpunkt (3/5): absolutvärden (vol-%) och förändring (vol-%) i vattenhalt under säsong för Tektronix, neutronsond och gravimetriska prover

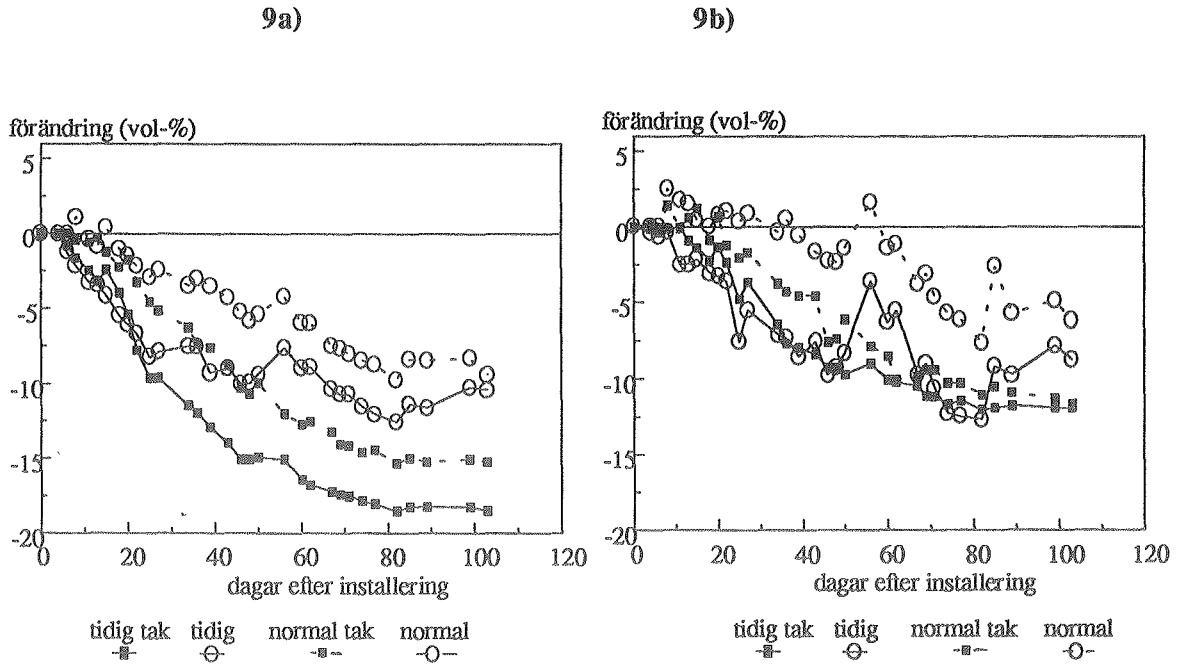
Djup	Tektronix			neutronsond			gravimetriskt		
	5/5	11/8	Δvh	4/5	11/8	Δvh	5/5	11/8	Δvh
0,2 m	39,4	29,5	-10	41,0	23,8	-17?	43,7	32,7	-11
0,2 m (tak)	46,5	30,6	-16	-	-	-	43,7	27,9	-16
0,4 m	45,4	38,6	-7	37,2	43,5	-6	50,9	49,2	-2
0,4 m (tak)	52,5	39,2	-13	-	-	-	50,9	44,3	-7
0,8 m	63,8	57,8	-6	63,8	63,8	0	68,0	70,2	2
0,8 m (tak)	61,1	53,9	-7	-	-	-	68,0	66,1	-2

#### Utveckling och vattenupptagning för gröda med tidig respektive normal såtidpunkt

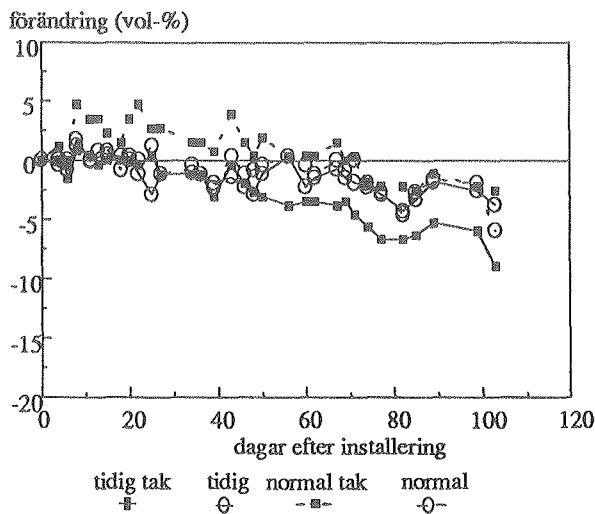
##### *Skillnader i vattenupptagning, rotutveckling, beståndsutveckling och skörd*

I försök 552/93 var skillnaderna i vattenupptagning under säsongen för tidig och normal såtidpunkt störst på 0,2 m djup. På 0,4 m djup var skillnaderna betydligt mindre, och det var

nästan ingen skillnad i vattenupptagning för de olika såtiderna på 0,8 m djup (figur 9). Den tidiga sådden hade genomgående en större förändring av vattenhalten än gröda med normal såtidpunkt. Störst vattenhaltsförändring var det för gröda med tidig sådd och skärmtak, och därefter följer den normala sådden under skärmtak (se även tabell 2 och 3). Gröda med tidigarelagd sådd började sin vattenupptagning 5-7 dagar tidigare än gröda med normal såtidpunkt på 0,2 m djup. På större djup kan man inte se några tydliga försprång i vattenupptagning för tidigarelagd sådd framför normalsådd i försök 552/93 på Kasby.



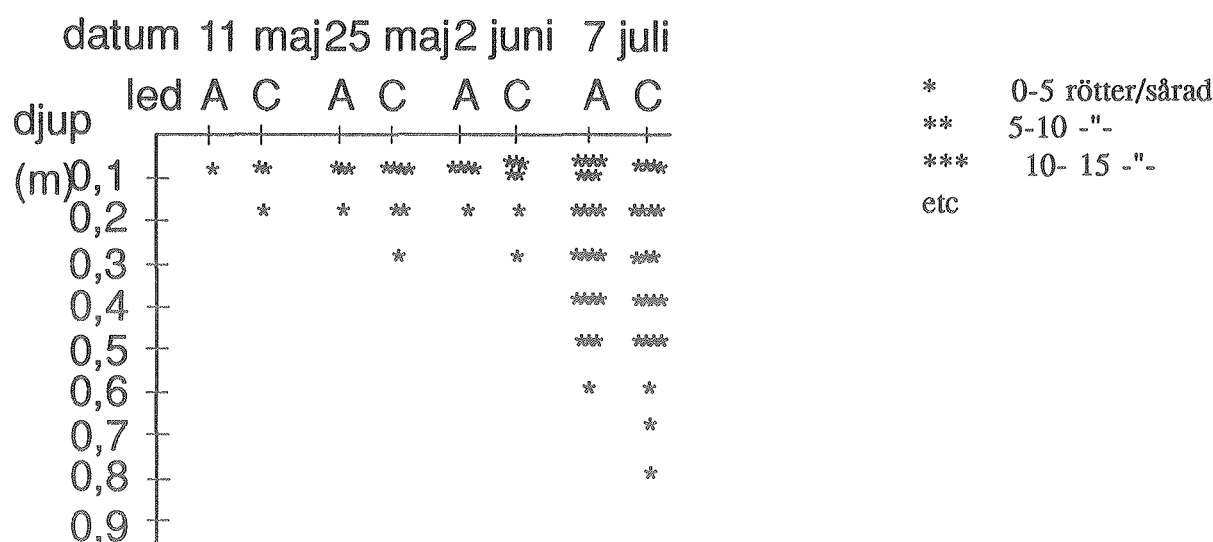
Figur 9a,b: Vattenhaltsförändringar i marken fram till skörd (mätt med Tektronix) för tidig och normal såtidpunkt, med och utan skärmtak för 0,2 (9a) och 0,4 (9b) m djup. Dag 0=29/4.



Figur 9c: Vattenhaltsförändringar i marken fram till skörd (mätt med Tektronix) för tidig och normal såtidpunkt, med och utan skärmtak för 0,8 m djup. Dag 0=29/4.

Det torra vädret i början av säsongen ger tydligt utslag både på 0,2 och 0,4 m djup. Första regnet efter sådd föll den 23/5. Vid jämförelse av gröda med och utan skärmtak oberoende av såtidpunkt, skiljer sig inte gröda under skärmtak från sådd med normal nederbörd med avseende på vattenhaltsförändring förrän omkring 25 dagar efter första mätdagen på 0,2 m djup. Drygt 40 dagar efter första mätdagen sker det en ökning av vattenhalten på 0,4 m djup för gröda utan skärmtak.

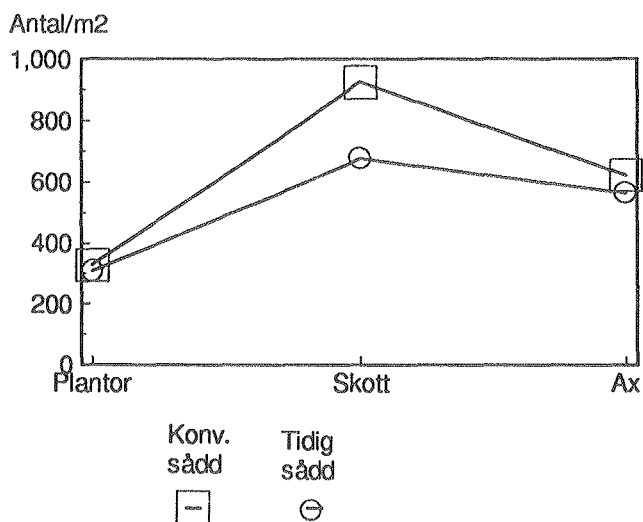
Vid en jämförelse av rotutvecklingen för gröda med normal och tidig sådd var tendensen att rotutvecklingen för tidig sådd var något bättre än för normal sådd. I den tidiga sådden blev rotdjupet större, och mängden rötter på givet djup var också större jämfört med normal såtidpunkt (figur 10). Rötterna nådde inte djupare än 0,4 m förrän efter mitten av juni, trots att det skedde en minskning av vattenhalt på 0,4 m djup i den tidiga sådden redan omkring den 15/5 (ca 15 dagar efter installering av mätutrustning).



Figur 10: Rotdjup och rottäthet på olika djup i gröda med normal (A-led) och tidig sådd (C-led) i försök Kasby 552/93. Samtliga led utan skärmtak.

Grödan studerades också genom planräkning, skott- och axräkning (figur 11). Vid planräkning efter uppkomst var det inga signifikanta skillnader mellan såtider. I gröda med normal sådd var det 324 plantor/m<sup>2</sup>, jämfört med 340 plantor/m<sup>2</sup> i gröda med tidig sådd. Vid skotträkning var det signifikant lägre antal skott per m<sup>2</sup> i gröda med tidig sådd jämfört med gröda med normal såtidpunkt (p<0,001). Antalet skott per m<sup>2</sup> i den tidiga sådden var 748, och i den normala sådden 914 skott/m<sup>2</sup>. Vid axräkning (antal ax/m<sup>2</sup>) i slutet av juli var det inga signifikanta skillnader mellan såtiderna. Gröda med tidig såtidpunkt hade i genomsnitt 622 ax/m<sup>2</sup>, och motsvarande siffra för gröda med normal såtidpunkt var 617 ax/m<sup>2</sup>.

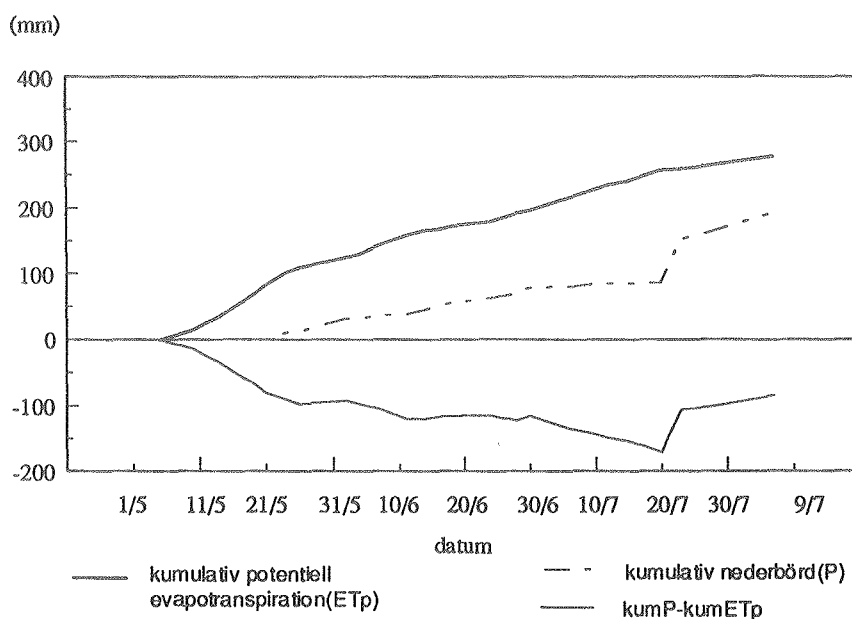
Trots att antalet ax/m<sup>2</sup> var densamma för både tidig och normal såtidpunkt i försök 552/93 på Kasby, så blev skörderesultatet från de olika såtidpunkterna signifikant olika (p<0,001). Den normala sådden gav 5 920 kg /ha, och den tidigt sådda grödan 4 200 kg/ha.



Figur 11: Antal plantor per m<sup>2</sup> vid uppkomst (11/5 resp 18/5), skott/m<sup>2</sup> (17/6) och ax/m<sup>2</sup> (21/7) för tidig och normal såtidpunkt i försök Kasby 552/93.

#### Resultat av vattenbalansberäkning

Som redan konstaterats var vädret de första 4-5 veckorna efter sådden väldigt torrt. Den första nederbörden efter sådd föll inte förrän den 23/5. Förutom att det inte kom någon nederbörd så var det relativt varmt och blåsigt vilket resulterade i en hög avdunstning (figur 12). Totalt under tiden från sådd till skörd var den potentiella avdunstningen enligt Anderssons evaporimeter,  $ET_p=294$  mm.



Figur 12: Kumulativ nederbörd och kumulativ evapotranspiration vid försök Kasby 552/93 under 1993 års växtsäsong. Första mätdag den 5/5, och sista mätdag den 6/8.

Den största potentiella avdunstningen, vilket illustreras som en kraftigare lutning på kurvan kumulativ evapotranspiration i figur 12, inträffade i mitten av maj. Högsta värdet för  $ET_p$  var  $ET_{pmax} = 7,7$  mm/dygn (19-21 maj). Det lägsta värdet var  $ET_{pmin} = 0,7$  mm/dygn (20-23 juli). I genomsnitt var den potentiella avdunstningen  $ET_{pmedel} = 2,83$  mm/dygn enligt Anderssons evaporimeter.

Förändring av markvattenhalten ( $\Delta S$ ) enligt gravimetriska prover visade att den tidigt sådda grödan hade en större förändring av  $\Delta S$  än normal sådd, från sådd (14/4) till slutet av juni (tabell 4). Absolutvärden på beräknad aktuell evapotranspiration ( $ET_a$ ) för de olika såtiderna skiljer sig något. Totalt för perioden från sådd till 28/6 så är  $ET_a$  för den tidigt sådda grödan 110 mm, och för normal såtidpunkt 95 mm. Trots skillnader i aktuell evapotranspiration (enligt absolutvärden) så har gröda med normal såtidpunkt en lika stor kvot  $ET_a/ET_p \approx 0,5$  som den tidigt sådda grödan under samma period i försöket på Kasby. Observera att resultaten i tabell 4 för den första delperioden inte är lika lång för gröda med normal såtidpunkt som för gröda med tidig såtidpunkt.

Om tidsperioden delas i en torrare del (från sådd tom 25/5) och en fuktigare (25/5-28/6) så blir kvoten  $ET_a/ET_p$  under den senare perioden något större för den tidigt sådda grödan jämfört med normal sådd. Detta beror troligen på att den tidigt sådda grödan har större bladyta, vilket ökar grödans förmåga att transpirera. För den torrare perioden är kvoten  $ET_a/ET_p \approx 0,3$  för både tidig och normal såtidpunkt.

Tabell 4: Beräkning av  $ET_a/ET_p$  från sådd till 28/6 för gröda med tidig och normal såtidpunkt i försök 552/93 på Kasby

	P (mm)	$ET_p$ (mm)	$\Delta S$ (mm)	$ET_a$ (mm)	$ET_a/ET_p$
<u>tidig sådd</u>					
29/4-25/5	13,6	121,4	-21,4	35,0	0,29
25/5-28/6	58,1	86,9	-17,1	75,2	0,87
hela perioden	71,7	208,2	-38,5	110,2	0,53
<u>normal sådd</u>					
5/5-25/5	11,4	105,0	-15,4	26,8	0,26
25/5-28/6	58,1	86,9	-10,5	68,5	0,79
hela perioden	69,5	191,8	-25,9	95,4	0,50

## DISKUSSION

### Kalibrering och jämförelse av mätutrustning

Resultaten av vattenhaltsmätningarna i försök nr 552/93 med Tektronix visade att det är nödvändigt att göra noggranna kalibreringar för en viss jord. Vattenhalter uträknade med Topps ekvation gav helt felaktiga värden. Skillnaden mellan kalibreringsekvationen för jorden på Kasby och andra kalibreringsekvationer är stor. Ekvation(16) ger betydligt högre värde på vattenhalt för korresponderande  $K_a$ -värde än andra ekvationer. Även den linjära ekvationen, ekvation(17), ger betydligt högre värden för vattenhalt än Ledieu et al (1986) vid uppmätt värde för mätsignalens uppehållstid i prober. I litteraturen redovisas också högre vattenhaltsvärden för korresponderande  $K_a$ -värde för jordar med låg skrymdensitet och/eller hög vattenhållande förmåga jämfört med den kalibrering av TDR som presenterades av Topp et al (1980) (Roth et al, 1992; Schönning et al, 1993; Dirksen et al, 1993; m fl). Men detta kan inte förklara varför kalibreringen av Tektronix ger avsevärt högre värde för vattenhalt vid ett visst  $K_a$ -värde än t ex en motsvarande kalibrering för organiska jordar enligt Roth et al (1992). Dessa jordar har både lägre skrymdensitet och högre vattenhållande förmåga än Kasby 552/93.

Ett stort problem med kalibreringen av de olika mätinstrumenten var svårigheten att kunna ta ut representativa gravimetriska vattenhaltsprover. Detta syns tydligt i spridningen av mätvärden använda till beräkning av kalibreringsekvationer (t ex figur 5a, fig 6), och speglas i kalibreringsekvationernas standardavvikelse för skattat y-värde. I ekvation(16) är  $SE=5,0$  vol-% för beräknad vattenhalt. Den lägsta standardavvikelsen för samtliga kalibreringar är för neutronsond matjord (ekv(17))  $SE\approx 4$  vol-%, och den högsta är för neutronsond alv (ekv(18))  $SE\approx 6$  vol-%.

Det finns ingen given förklaring till att Tektronix kalibreringsekvation (ekv(16)) är ett andragradspolynom istället för ett tredjegrads-polynom (Topp et al, 1980; m fl). Vid regression av  $K_a$ -värde mot gravimetriska vattenhalter, så är  $K_a$  uträknad med ett kvadratisk uttryck enligt ekvation(7), och vid regression av mätsignalens uppehållstid  $t$  i prober mot gravimetriska vattenhalter används ett enkelt linjärt samband enligt Ledieu et al (1986). En fördel med enkel linjär regression är att man kan använda de gravimetriskt tagna vattenhaltsproverna som oberoende variabel ( $x$ -variabel), och tiden  $t$  som beroende av vattenhalten ( $y$ ). Därefter kan man enkelt lösa ut vattenhalten, och kalibreringsekvationen kan användas direkt. Med multipel regression använder man vanligtvis vattenhalten som beroende variabel ( $y$ ) av t ex dielektricitetskonstanten ( $x$ ) eller, i fallet med neutronsond, termen "count-rate", som oberoende. Detta borde vara principiellt fel eftersom det faktiskt är vattenhalten som oberoende variabel, som styr mätinstrumentets utslag. Om man gör en multipel regression med vattenhalt som  $x$ -variabel och mätutslag som  $y$ -variabel, blir man tvungen att numeriskt lösa ut mätutslag för att få en kalibreringsfunktion som enkelt går att använda. Därför borde enkel linjär regression vara det bästa att använda till kalibrering av TDR.

Betydelsen av noggrann kalibrering visas också genom resultat från jämförelse av Tektronix och Trase mätvärden. De olika utrustningarna gav skilda värden på den approximerade

dielektricitetskonstanten, vilket kan bero på en rad olika saker. Eftersom variationen är ungefär densamma för alla samtidigt mätta värden beror det troligen på att Tektronix och Trase har olika typer av signal, signal-generering och tolkning av reflekterad signal. Även probernas utformning kan inverka (se t ex Ledieu et al, 1986; Heimovaara, 1993). I detta fallet mättes Tektronix genom parvisa prober och så kallad balanserad koppling, och Trase med "triple-wire" och obalanserad koppling. Montering av prober skiljde sig också åt. Proberna som användes till Tektronix trycktes in, medan Trase prober monterades i förborrade hål, detta kan möjligen gjort att anslutningen kring respektive typ av prob varit olika. En alternativ lika trolig förklaring kan vara att den ena mätutrustningens prober varit omgiven av mer luftfickor/sprickor än den andra. Fler sprickor runt specifika prober skulle också kunna förklara varför det finns tendenser till två olika serier av uppmätta  $K_a$ -värden i figur 7a. För att kunna mäta eventuella skillnader i uppmätta  $K_a$ -värden för respektive utrustning behöver man göra vattenhaltsmätningar under mer kontrollerade former, t ex med packade jordprover med bestämda vattenhalter i laboratorium, och/eller ha fler upprepningar per mätinstrument.

Ett stort problem vid vattenhaltsmätningarna med TDR i försök nr 552/93 var sprickbildning vid upptorkning på grund av den höga lerhalten och mängden organiskt material. Vid uttorkning av jorden blev sprickorna fler och större, vilket troligen påverkade samtliga nivåers mätta vattenhaltsvärden. Då mätområdet runt enskild TDR-prob är omkring 2,5 cm (se "Mätområde runt TDR-prober") får en spricka omkring proben, eller längsmed proben, mycket stort inflytande över mätt  $K_a$ -värde. Samtliga prober monterades horisontellt på respektive djup, så det fanns ingen möjlighet att kontrollera eventuella sprickbildningar. Sprickbildning längs prober kan kanske förklara varför Trase vattenhaltsvärde på 0,4 m med tak är så skilt från övriga mätinstrumentens 0,4 m-värden. Jordens tendenser till sprickbildning har troligen också påverkat neutronsondmätningarna. Oavsett mätteknik blir troligen vattenhalten för enskild mätning undervärderad då mätprob, alternativt mätrör, omges av mer luft. Det är svårt att undvika problemet med sprickbildning för TDR-tekniken om mätutrustningen är stationär under säsongen, särskilt för leriga jordar. För neutronsonden skulle man eventuellt kunna installera mätrören på nytt vid varje mättillfälle istället för att ha dem stationära.

Rent praktiskt fungerade TDR-systemet med Tektronix bättre än Trase i försök nr 552/93. Tekniken med Trase förprogrammerade ekvation, som i försöket inte alltid stämde överens med gravimetriska prover, gör det svårare att ändra uträkningsekvationen för volymetrisk vattenhalt. Tektronix var dessutom lättare att bära, och anslutningen av sladdar till proberna fungerade bättre. En fördel med Trase var att man sparade mätdata (dock ej korrelerande  $K_a$ -värde) i fält som senare loggades över till dator. Tektronix avlästes manuellt och man fick sedan mata in värden i dator för hand. Det finns dock möjligheter att koppla Tektronix till logger för automatisk registrering av mätsignal. De största problemen med ett sådant system är dels att kunna få en korrekt avläsning av mätsignalen, d v s en bra avläsningsalgoritm, och dels ett system som är väl skyddat från utomstående påverkan, t ex fukt och kyla. Med logger blir systemet dyrare, och kräver långa kablar vid användning i fältförsök, vilket kan innebära en felkälla vid mätningen. Neutronsonden var ännu otympligare i fält. Dessutom är metoden och instrumentet i sig inte särskilt bra att använda vid omfattande mätningar på grund av de radioaktiva ämnena i mätinstrumentet.



## Grödans utveckling och vattenupptagning

Resultat från samtliga försök med tidig sådd under säsongen 1993 från hela landet gav några procent lägre skörd för gröda med tidig sådd jämfört med normal såtidpunkt (Arvidsson, 1993). Just i försöket på Kasby var skillnaden extremt stor med en relativ skörd=100 för normal sådd och relativ skörd=79 för tidig sådd. Det är möjligt att 1993 års tidiga sådd i försök nr 552/93 missgynnades då vädret var ovanligt varmt under april och maj månad. Den tidiga sådden skulle ha haft "för bra" tillväxt/utveckling under april/maj, vilket skulle ha lett till försvagade plantor/dålig bestockning senare under säsongen på grund av för lite vatten i marken innan regnvatten hunnit fylla på markvattenförrådet efter torkan. Tydligt kunde inte den något bättre rotutvecklingen i gröda med tidig sådd jämfört med normal sådd gröda, kompensera för eventuell vattenbrist.

Den dåliga rotutvecklingen både för tidig och normal såtidpunkt beror troligen på Kasbyjordens låga pH-värden - redan på 0,4 m djup är  $\text{pH} < 4,5$ . Vid en jämförelse av rotdjup för tidig och normal såtidpunkt 1992, konstaterades att den tidiga sådden hade ett större rotdjup i 2 av de 7 ingående försöken, och att i övriga 5 försök var rotdjupen lika stora för de båda såtiderna (Arvidsson, 1992). Dessa rotstudier gjordes i början av juni, och i samtliga fall var rotdjupen större än vad som mättes på Kasby i slutet av juni. De rotstudier som gjordes på Kasby försvårades av att rötterna rostfärgades på grund av jordens oxidering av järn. Resultat från rotstudierna bör inte ses som några absolutvärden, utan mera som indikationer på hur utvecklingen av plantorna såg ut.

Trots att gröda med tidig sådd gav sämre skörd än gröda med normal sådd i försök nr 552/93, så var vattenhaltsförändringen under gröda med tidig såtidpunkt större än för den normalt sådda grödan (se tabell 2 och 3; figur 9), framförallt på 0,2 och 0,4 m djup. På 0,8 m djup är det svårt att utläsa några tydliga tendenser mellan de olika såtiderna, eftersom resultat över vattenhaltsförändring under säsongen oftast ligger inom felgränser för skattningen av vattenhalt. Det är också möjligt att det skedde ett flöde av grundvatten ner mot en å som ligger ca 75 m från försöksplatsen. Skillnaden i vattenupptag under säsongen skulle antagligen varit större i ett försök med tidig sådd där den tidiga sådden haft bättre tillväxtbetingelser under vår och försommar.

Den potentiella avdunstningen,  $ET_p = 2,8$  mm/dygn för perioden 5/5-6/8, som mättes med Anderssons evaporimeter, gav ett lägre värde för säsongen jämfört med Ultuna klimatstation värde,  $ET_p = 3,0$  mm/dygn. Ultunas evaporatranspiration är beräknat med Penmans formel som är baserad på uppmätta klimatdata. I en studie där man beräknade den aktuella evapotranspirationen,  $ET_s$ , för höstvetete, korn och vall/träda utifrån nederbördsdata och förändring i markvattenhalt (ekv (13)) under 1975 och 1976, var  $ET_s = 1,6$  mm/dygn respektive 2,0 mm/dygn för korn under tidsperioden 5/5-28/6 (Sandsborg et al, 1980). Motsvarande värden för grödan i försök nr 552/93 var  $ET_s = 1,8$  mm/dygn för tidig sådd, och  $ET_s = 1,7$  mm/dygn för normal sådd. Sandsborg et al (1980, 1983) beräknade också kvoten  $ET_s/ET_p$ . För korn under perioden 5/5-28/6 blev  $ET_s/ET_p \approx 0,4$  under 1975, och  $ET_s/ET_p \approx 0,6$  under 1976. Resultat från försöket på Kasby 1993 visar att både tidig och normal såtid hade kvoten  $ET_s/ET_p \approx 0,5$  för samma period.

Vid beräkning av vattenbalansen i försök nr 552/93 så är troligtvis de största felkällorna i samband med skattning av termen förändring i markvattenhalt,  $\Delta S$ , p g a problem vid uttag

av gravimetriska prover. Vid uttaget användes en jordborr. Eftersom man var tvungen att ta proverna etappvis pga att jorden var mycket hård i mitten av säsongen, är det troligt att vattenhalten relaterad till en viss nivå inte alltid är hämtad från just den nivån. Enligt Sandsborg et al (1980) var också deras största felkälla i samband med tagning av gravimetriska prover. De räknade med att 10 prov för given mätplats ger med 95% sannolikhet ett värde på vattenhalten  $\pm 10\%$  av absolutvärde på vattenhalt. I försöket togs mellan 2 och 4 prover för att ge ett medel på vattenhalten i en viss punkt.

Vattenbalansen (ekv(10)) beräknades under antagande att det inte fanns någon grundvattenströmning. Som tidigare sagts, är kanske detta inte ett rimligt antagande för försöksplatsen. Dels därför att vattenhalten på 0,8 m faktiskt varierade under säsongen enligt vattenhaltsmätningar, och dels därför att grundvattennivån redan vid sådd låg relativt grunt, på ca 0,9 m. I mitten av juli var grundvattnet på ca 1,1-1,2 m djup. Men med de mätvärden som fanns tillgängliga för beräkning av vattenbalansen var det inte möjligt att kunna skatta eventuella grundvattenförändringar. Det är också möjligt att termen D i ekvation(10), snabbt vattenflöde i rotzon, inte kan antas vara noll för försöksplatsen på grund av jordens spricksystem. Men eftersom uträknade värden på  $ET_a$  och kvoten  $ET_a/ET_p$  är relativt jämförbara med andra värden i litteratur så antas approximationerna i ekvation(10) vara rimliga i detta fallet.

## SAMMANFATTNING

Under senare år har intresset för tidigarelagd sådd på vissa typer av jordar ökat. Med tidigarelagd sådd har man kunnat bibehålla skördenivån samtidigt som man minskat arbets- och maskinkostnader jämfört med konventionell vårsådd i Sverige. På avd f jordbearbetning, Sveriges Lantbruksuniversitet, har man haft försökserier som på olika sätt undersökt denna typ av odlingssystem. I ett av 1993 års försök med tidig sådd vid Ultuna (försök nr 552/93), ingick att noggrannare mäta vattenhaltsförändringar i mark under gröda med tidigarelagd såtidpunkt, och gröda med normal såtidpunkt Syftet var dels att undersöka eventuella skillnader i vattenhalt för gröda med respektive såtidpunkt, och dels att testa olika metoder för mätning av vattenhalt i jord. I försöket användes två utrustningar av s k "time domain reflectometry" (TDR), och en neutronsond. Med TDR-utrustning mättes vattenhalten på 0,2, 0,4 och 0,8 m djup Mätutrustningarna var nergrävda i försöket under hela säsongen och avläsningar skedde manuellt. Samtliga mätvärden kalibrerades mot gravimetriskt tagna prover. I försöket skedde den tidiga sådden den 14/4 och den normala sådden den 3/5. Grödan var korn (Golf). Grödans utveckling registrerades parallellt med vattenhaltsmätningarna, dels genom rotstudier av gröda med tidig respektive normal såtidpunkt, och dels genom planträkning vid uppkomst, skott- och axräkning. Jorden i försöket var en gytjelera med skrymdensitet  $< 1 \text{ g/cm}^3$ , mycket makroporer och  $\text{pH} < 4,5$  i alven.

Multipel regression med mätvärden från TDR/Tektronix visavi gravimetriska prover gav endast marginellt bättre korrelationskoefficient respektive standardavvikelse för skattat y-värde, jämfört med linjär regression. Oavsett vilken typ av regression som användes så skiljde kalibreringsekvationen för TDR/Tektronix avsevärt från i litteratur föreslagna

kalibreringsekvationer. Den förprogrammerade kalibreringsekvationen i TDR/Trase stämde dåligt överens med gravimetriskt tagna vattenhaltsprover. Det fanns en tendens till skillnad i uppmätt värde på dielektricitetskonstant mellan de båda TDR-utrustningarna, men detta gick inte att säkert fastställa på grund av för få upprepningar.

Avlästa vattenhaltsvärden varierade stort i absoluttal, framförallt då vattenhalten var låg, men vid jämförelse av förändring av vattenhalt under vegetationsperioden var skillnaderna mindre mellan olika mätutrustningar. Det är mycket troligt att sprickor i profilen påverkat mätvärden från både TDR-prober och neutronsondrör, förmodligen så att uppmätta vattenhalter varit lägre än faktiska vattenhalter i jorden. En annan möjlig felkälla var de gravimetriska vattenhaltsprover som togs med sk jordborr, eftersom man inte säkert kunde hänvisa ett prov till rätt nivå i profilen.

Den tidigt sådda grödan gav större vattenhaltsförändringar i mark än den normala sådden, särskilt på 0,2 och 0,4 m djup, från respektive såtidpunkt till 11/8. Både gröda med tidig och normal såtidpunkt hade kvoten  $ET_s/ET_p = 0,5$  under perioden från respektive såtidpunkt fram till den 28/6 1993.

Det torra, varma vädret under april och maj månad 1993 missgynnade troligen den tidigt sådda grödan i försök 552/93. Gröda med tidig respektive normal såtidpunkt hade lika bra uppkomst, men den senare var signifikant bättre bestockad. Vid axräkning var det inga statistiska skillnader mellan grödor med olika såtidpunkt. Skörden från gröda med tidig sådd var 21% lägre jämfört med gröda med normal såtidpunkt ( $p < 0,001$ ). Rotutvecklingen var generellt dålig i försöket, vilket förmodligen berodde på lågt pH i jorden. Dock var rotutvecklingen något bättre för den tidigt sådda grödan jämfört med gröda med normal såtidpunkt.

## SUMMARY

During the last years there has been an increased interest for systems of early sowing of spring-sown crops on heavy clays and sandy soils in Sweden. These cropping systems have shown to decrease labour and machinery cost, and sustain or slightly increase yields. Since 1988 a series of trials with early sowing have been carried out at the Division of Soil Management, Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. During 1993 a more intensified study of soil water content for crops with early and normal sowing was conducted in a field experiment outside Uppsala. The objectives of the study were to investigate possible differences in soil moisture content between crops with two different sowing dates (14th of April and 3rd of May), and while doing so, compare different soil water content measuring equipments. Two types of time domain reflectometry (TDR), and one neutron probe were used. The different measuring equipments were stationary at the site at 0,2, 0,4 and 0,8 m depth during the growing season, and readings were taken manually. The different measuring readings were calibrated with gravimetrically taken soil moisture samples. Root development, plant establishment and development were also registered for the barley sown at the test site. The soil was a gytjaclay with bulk density  $< 1 \text{ g/cm}^3$ , high amount

of macro-pores and  $\text{pH} < 4.5$  in the subsoil.

Both multiple and simple regression analysis were used for the calibration of TDR/Tektronix. The multiple regression analysis gave slightly higher correlation and lower standard deviation of estimated  $y$ -value than the simple linear regressions. Any of the calibrations made for the test site deviated noticeably from TDR calibration equations reported in literature. The programmed calibration used in TDR/Trase did not correspond very well with gravimetric soil moisture samples. There was a tendency of difference in measured dielectric constant between the two types of TDR-equipments, but due to lack of repetitions, the possible differences could not be statistically shown.

Although registered absolute values of soil water content deviated from each other depending on equipment used for measuring, the changes of soil water content were similar for the different equipments, especially at a depth of 0.2 and 0.4 m. It is likely that the amount of macro-pores influenced the measurements (both TDR and neutron probe) so that measured values of soil water content were underestimating actual/real soil water content. Another possible source of errors was the method used when extracting soil for gravimetric soil moisture samples. During the growing season these moisture samples were taken with a soil auger/earth borer, a tool which leaves some uncertainties if the taken samples actually correspond with assumed depth.

The change of soil water content was greater for barley with early sowing compared to barley with normal sowing date, especially at 0,2 and 0,4 m depth from sowing date until beginning of August. The sowing date did not seem to influence the quotient of actual evapotranspiration divided by potential evapotranspiration,  $\text{ET}_a/\text{ET}_p$ . The quotient equalled 0,5 from respective sowing date until end of June.

The relatively dry and warm weather conditions in April and May, probably misfavoured crop with early sowing compared to crop with normal sowing 1993. Although crop with early sowing had as good establishment as crop with normal sowing, crop with early sowing had significantly lower number of emergent tillers (per  $\text{m}^2$ ) than crop with normal sowing date. The crop had the same number of heads (per  $\text{m}^2$ ) irrespective of sowing date, but yields differed significantly. Crop with early sowing had a relative yield=79 (conventional crop=100) In general root development was poor. This was probably due to low pH in the soil. There was a tendency of a better root development in the early sown treatment although the difference could not be statistically shown.

## REFERENSER

Alharthi, A, J Lange. 1987. Soil water saturation: Dielectric determination. *Water Resources Research* 23(4):591-595.

Andersson, S. 1969. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XVIII. om en ny och enkel evaporimeter. *Grundförbättring* 3:59-60. Avd f hydroteknik, Lantbrukshögskolan.

Ansault, M, L W De Backer, M Declercq. 1985. Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content i porous media. *Soil Science Society of America Journal* 48:47-50.

Arvidsson, J. 1992. Tidig sådd - resultat 1988-92. Meddelande från södra jordbruksförsöksdistriktet. Handlingar från växtodlings- och växtskydds dagar i Växjö den 9-10 december 1992. *Sveriges Lantbruksuniversitet*. 39:21.

Arvidsson, J. 1993. Försök med tidig sådd - resultat 1993. Meddelande från södra jordbruksförsöksdistriktet. Handlingar från växtodlings- och växtskydds dagar i Växjö den 8-9 december 1993. *Sveriges Lantbruksuniversitet*. 40:13.

Arvidsson, J (red). 1994. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1993. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen nr 86: 40-44, *Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala*

Baker, J M, R J Lascano. 1989. The spatial sensitivity of time-domain reflectometry. *Soil Science* 147(5):378-384.

Brady, N C. 1990. The nature and properties of soil (10th ed). Macmillan Publishing Company, New York.

Dirksen, C, S Dasberg. 1993. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal* 57:660-667.

Gardner, W. 1965. Methods for soil analysis (9:104-127). Editor: C A Black. American Society of Agronomy, Inc. Madison Wisconsin.

Haahr, V, P L Ølgaard. 1965. Comparative experimental and theoretical investigations of the neutronic method for measuring the water content in soil. *Isotopes and radiation in soil-plant nutrition studies*. International Atomic Energy Agency, s 129-146.

Heimovaara, T J. 1993. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Science Society of America Journal* 57(6):1410-1417.

Herkelrath, W N, S P Hamburg, F Murphy. 1991. Automatic, real-time monitoring in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resources Research* 27(5):857-864.

Hillel, D. 1982. *Introduction to soil physics* (2nd ed). Academic Press, Inc. London.

Hook, W R, N J Livingston, Z J Sun, P B Hook. 1992. Remote diode shorting measurement of soil water by time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal* 56:1384-1391.

Knight, J H. 1992. Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resource Research* 28(9):2345-2352.

Ledieu, J, P De Ridder, P De Clerck, S Dautrebande. 1986. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology* 88:319-328.

Roth, K, R Schulin, H Flübler, W Attinger. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research* 26(10):2267-2273.

Roth, C H, M A Malicki, R Plagge. 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science* 43:1-13.

Rydberg, T. 1991. Plöjningsfri odling och/eller tidig sådd, en väg till förbättrad lönsamhet. *Meddelande från södra jordbruksförsöksdistriktet*. 38.

Sandsborg, J, B Olofsson. 1980. Observations on the water balance for winter wheat, barley and fallow. *Swedish Journal of Agricultural Research* 10:17-23.

Sandsborg, J, N Rodskjer. 1983. Changes of soil water under winter wheat, barley and bare soil during the growing season. A field study. *Swedish Journal of Agricultural Research* 13:17-29.

Schjønning, P, O H Jacobsen. 1993. Field evaluation of time domain reflectometry for soil water measurement. *Journal of Hydrology* 151:159-172.

Soilmoisture Equipment Corp. 1990. Trase system 1: operating instructions. Soilmoisture Equipment Corp, Santa Barbara, CA.

Tektronix, Inc. 1990. 1502C Metallic Time Domain Reflectometer: Operational Manual (rev ed). Tektronix, Inc, Beaverton, OR.

Topp, G C, J L Davis, P Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16(3): 574-582.

Visvalingam, M, J D Tandy. 1972. The neutron method for measuring soil moisture content - a review. *Journal of Soil Science* 23(4):499-511.

#### Annan litteratur

Djurle, E. 1983. *Elektricitetslära (2:a uppl)*. Teknisk högskolelitteratur (THS), Stockholm.

Malmstadt, H, C Henke, S Crouch. 1981. *Electronics and Instrumentation for Scientists*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc, Menlo Park, CA.

Sears, F W, M W Zemansky, H D Young. 1987. *University Physics (7nd ed)*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

APPENDIX I: Försöksplan över försök nr 552/93 på Kasby

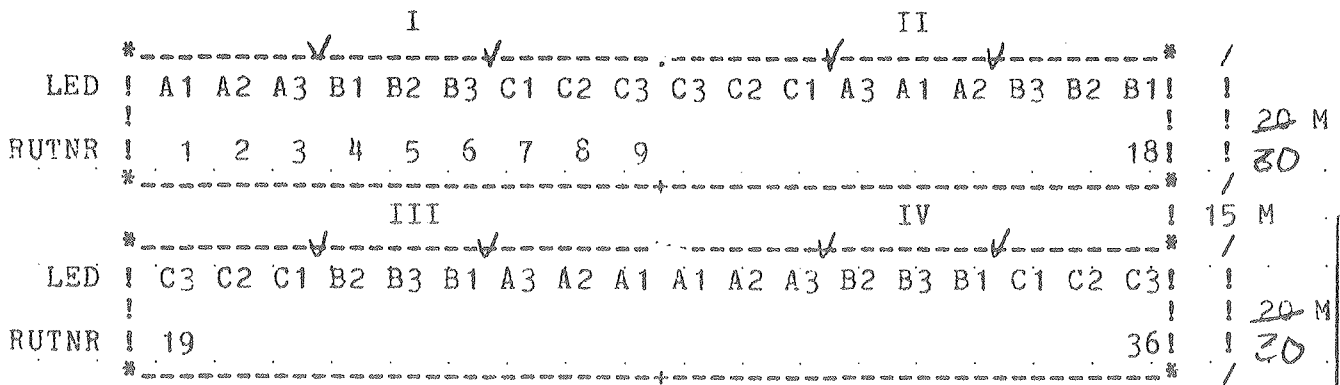
FÄLTKORT för jordbruksförsök \* 027376

Fältkort 8 \* 3\* 3\* 0\* 0\* 4\* 0\* 5\*0101\*

Försöksseriens benämning TIDIG SADD MED OLIKA KORNSORTER	Skördeår 1993	Plan nr R2-4031	Jbr-omr UL	Lan UL	Försök nr 552/93
Försöksvärd (Texta) Utning egendom	Gård eller by Kasby	Postadress			

- A = NORMAL SATID konventionell säbäddsbör.  
 B = TIDIG SADD  
 C = EXTRA TIDIG SADD
- 1 = KORN FILIPPA (TIDIG)  
 2 = KORN GOLF (NORMAL)  
 3 = KORN ~~ETNA~~ Lina (SEN)

√ = 3 m vändtag

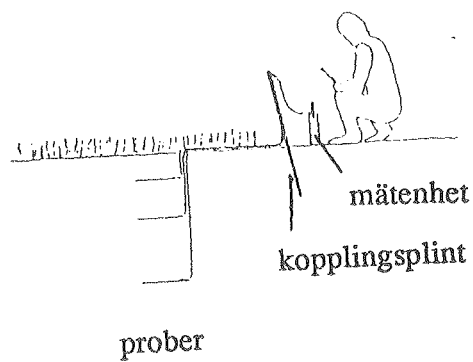
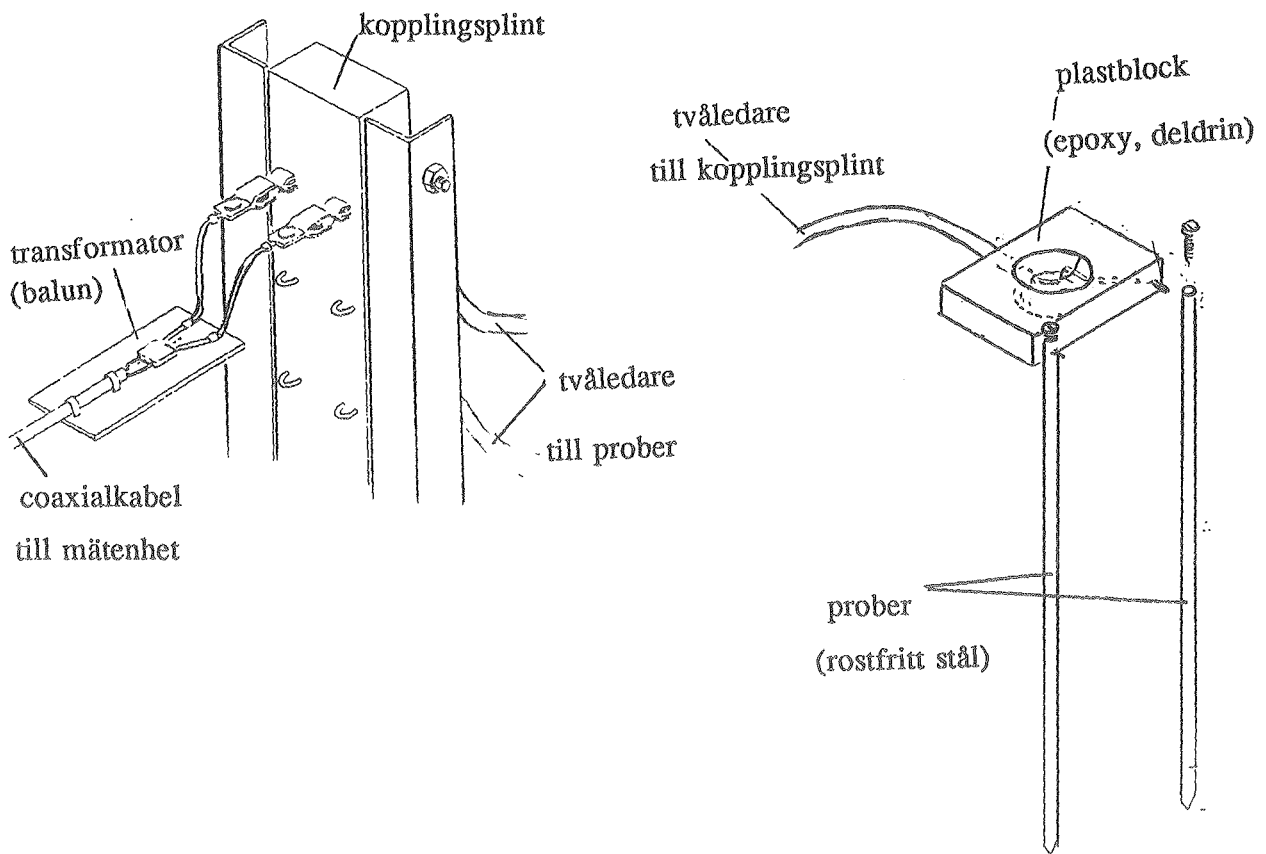


Vattenläck

markväg → Lövsta →

Försöksfältet är beläget ca 50 meter i S riktning från Vattenläcken		Norrstreck →	Plöjningsriktning ←	Skifte nr 45a
Bruttoruta 3 x 30 = 90 m <sup>2</sup>	Skorderuta 16.7 x 13.0 =		m <sup>2</sup>	
SORT 1	SCRT 2	SORT 3		
FÖRFRUKT Korn	PROVTAGNING, MÄTNING O GRADERINGAR: PLANTRÄKNING RUTVIS			
SADD EXTRA TIDIGT	MÄN-DAG 04-13	OGRASRÄKNING PUTVIS		
SADD TIDIGT	MÄN-DAG 04-23	STRÅSTYRKA VID SKÖRD (0-100) RUTVIS		
SADD NORMAL TID	MÄN-DAG 05-03	GRÖNSKOTT VID SKÖRD (0-100) RUTVIS		
GÖDSLING MEDEL KG/HA 1 samband med på resp. 286/ha kg	MÄN-DAG	PROV AV SKÖRDEPRODUKTER LEDVIS		
OGRASBEK MEDEL KG/HA NCPA + Glean 1,5 + 0,018	MÄN-DAG 05-30	GENERALPROV AV MATJORD		
ÖVRIG BEKÄMPNING Barnon + Ripolin 1,5 + 3,0	MÄN-DAG 06-09	ANTECKNINGAR		

APPENDIX II: Skiss över prober och kopplingar som användes i försök nr 552/93 till TDR/Tektronix (efter A Thomsen, Institutionen för agrometeorologi, Foulum, Danmark)





MEDDELANDEN FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Nr	År	
1	1992	Johan Arvidsson, Sixten Gunnarsson, Lena Hammarström Inge Håkansson, Tomas Rydberg, Maria Stenberg, Bo Thunholm: 1990 års jordbearbetningsförsök. 40 s.
2	1992	Mats Tobiasson: EKOODLAREN - En studie av ett kombinationsredskap för sådd och ogräshackning, utförd våren och sommaren 1991. Examensarbete. 19 s.
3	1993	Mats Tobiasson: Såbillar för reducerad bearbetning. Undersökningar av nya såbillar för odlingssystem med reducerad bearbetning, utförda 1991 och 1992. 23 s.
4	1993	Anna Borg: Flöden av kväve och fosfor i Forshällaåns avrinningsområde - beräkning av olika källors bidrag till växtnä ringsläckaget. Examensarbete. 45 s. <i>Flows of nitrogen and phosphorus in the Forshällaån watershed - estimations of the contributions from different sources to the leaching of plant nutrients. 45 pp.</i>
5	1993	Thomas Grath: <i>Effects of soil compaction on physical, chemical and biological soil properties and crop production.</i> 101 pp.
6	1993	Estela Pasuquin: <i>Tillage influences on soil conditions and crop response under dry weather in the Philippines and in Sweden.</i> 62 pp.
7	1994	Hans Pettersson: Radhackning i stråsäd med ny hackutrustning. Examensarbete. 28 s. <i>Rowhoeing in cereals with new hoeing equipment. 28 pp.</i>
8	1994	Jörgen Lidström och Lars Olsson: Nya såmaskiner för reducerad bearbetning. Examensarbete. 57 s. <i>New drills for reduced tillage. 57 pp.</i>
9	1994	Sara Lindén: Tidig start och tillväxt av sockerbetor. Examensarbete. 37 s. <i>Early start and growth of sugarbeets. 37 pp.</i>
10	1994	Sasa Ristic och Tomas Rydberg: Optimering av bearbetningsintensitet och jordpackning samt studier av markfysikaliska orsaker till ojämna bestånd i oljevaxter. 13 s.
11	1994	Jennie Andersson: Vattenhaltsmätningar med TDR och neutron sond i försök med tidig sådd av korn. Examensarbete. 34 s. <i>Soil moisture measurements with TDR (time domain reflectometry) and neutron probe in a field experiment with early sowing of barley. 34 pp.</i>

