



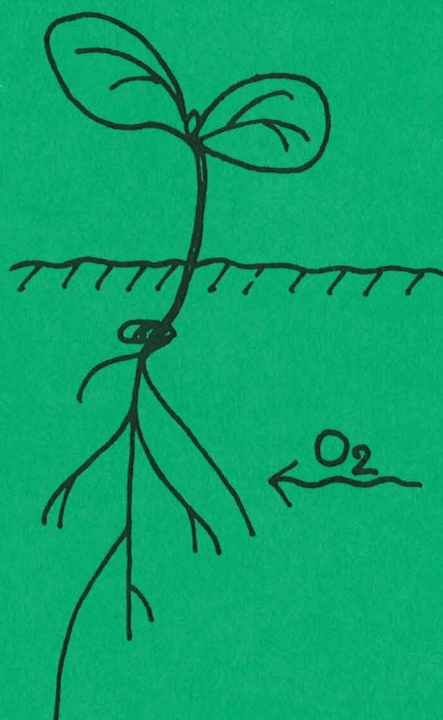
SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET

SVENIGES LANTBRUKSUNIVERSITET
Institutionen för markvetenskap
Avd för hydroteknik
750 07 UPPSALA 7

BIBLIOTEKET

SYREDIFFUSION OCH REDOXPOTENTIAL VID OLIKA MARKVATTENHALTER I STYV LERA

Åsa Nilsson

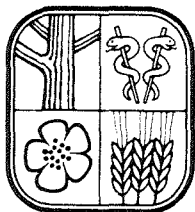


Examensarbete i lantbrukets hydroteknik
Handledare: Jan Lindström

Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik

Avdelningsmeddelande 88:2
Uppsala 1988

ISSN 0282-6569
ISBN 91-576-3354-1

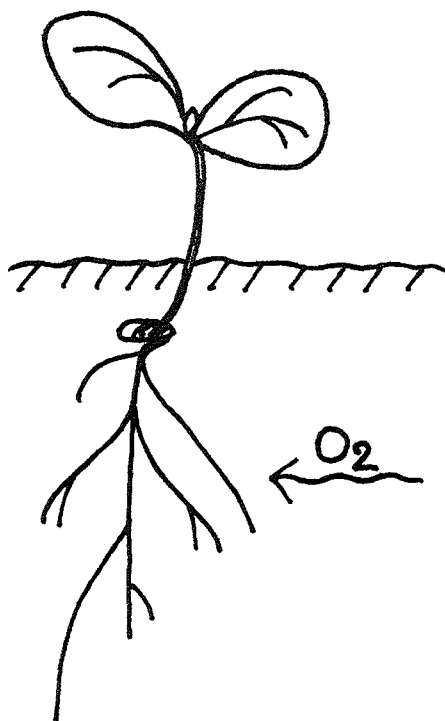


SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET

SYREDIFFUSION OCH REDOXPOTENTIAL VID OLIKA MARKVATTENHALTER I STYV LERA

Åsa Nilsson

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET
Institutionen för markvetenskap
Avd för hydroteknik
750 07 UPPSALA 7



BIBLIOTEKET

Examensarbete i lantbrukets hydroteknik
Handledare: Jan Lindström

Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för lantbrukets hydroteknik

Avdelningsmeddelande 88:2
Uppsala 1988

ISSN 0282-6569
ISBN 91-576-3354-1

REFERAT

Undersökningens syfte var att på laboratorium pröva en syreflödesmätare som utformats av Armstrong & Wright (1976). Med hjälp av denna skulle ett gränsvärde för syrediffusion, det s.k. kritiska ODR-värdet, fastställas i två mellansvenska lerjordar vid vilket syretillgången blir begränsande för uppkomst och tillväxt hos värraps. Avsikten var dessutom att studera hur bevattning och jordpackning inverkar på syrediffusionen samt att göra kompletterande mätningar av redoxpotential i de båda jordarna.

Ostörda jordprover stansades ut i stålcyllindrar och utsattes för olika vattenavförande tryck samt besåddes med raps. Syrediffusionen (ODR) i proven bestämdes med hjälp av en platinaelektrod som påfördes en potential av -0.65 V relativt en referenselektrod bestående av ett silverbleck nedsänkt i kaliumkloridlösning. Syrgas reducerades då vid platinaytan och en strömstyrka registrerades som antogs vara proportionell mot syrediffusionen i markvätskan närmast platinaytan. Vid bestämning av redoxpotential användes samma elektroder men ingen potential påfördes då systemet. Ett inledande försök gjordes där det kunde fastslås att stålcyllindern inte hade någon störande inverkan på den uppmätta strömstyrkan.

Den statistiska säkerheten för att ODR ökade när vattenhalten minskade var för de flesta prover hög. ODR-värdena kunde dock variera avsevärt inom och mellan prover, antagligen beroende på jordens heterogenitet. Efter bevattning samt i packade prover uppmättes i allmänhet lägre ODR-värden än i motsvarande obevattnade och opackade prover. ODR-värdet hade en tendens att öka med ökande värden på redoxpotential. Trots de ofta mycket låga ODR-värdena (mindre än $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) var uppkomst och tillväxt normal i alla opackade prover. Antagligen berodde detta på att rötterna sökte sig till mellanrummet mellan jord och cylindervägg där syretillgången var bättre än inne i jordprovet. Det var därför inte möjligt att fastställa något kritiskt ODR-värde med detta försök.

Med utgångspunkt från de uppnådda försöksresultaten kan sägas att ODR-metoden lämpar sig väl som komplement till andra idag förekommande metoder för bestämning av syreförhållandena i jord.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sida
REFERAT	
FÖRORD	6
INLEDNING	7
LITTERATURÖVERSIKT	9
ODR-METODENS PRINCIP	9
METODENS BEGRÄNSNINGAR	12
Katodens nedförande i marken	12
Vattenfilmens tjocklek	12
pH-effekter	13
Den elektriska resistansen i jordprovet	14
Beläggning av katodytan	15
FÖRVÄNTADE RESULTAT	15
BESTÄMNING AV MARKENS REDOXPOTENTIAL	16
MATERIAL OCH METODER	19
MATUTRUSTNING	19
Multiplexerenheten	19
Den centrala enheten	20
Polarogramenheten	20
Elektroderna	20
FÖRSÖKSUPPLÄGGNING	21
Upprättande av ström-spänning-diagram	23
Bestämning av ODR och redoxpotential i jordproven	23
Statistisk metod	27
RESULTAT OCH DISKUSSION	29
STRÖMSTYRKANS BEROENDE AV EFFEKTIV SPÄNNING	29
PROVERNAS POROSITET	29
UPPMÄTTA ODR-VÄRDEN I OBEVATTNADE PROVER	32
UPPMÄTTA ODR-VÄRDEN I BEVATTNADE PROVER	37
SAMBANDET MELLAN REDOXPOTENTIAL OCH ODR	42
PLANTUTVECKLING OCH KRITISKT ODR-VÄRDE	43
SLUTSATSER	45
SUMMARY	47
LITTERATURFÖRTECKNING	49
BILAGA	51

FÖRORD

Ett stort tack vill jag härmed rikta till alla dem som på något sätt hjälpt mig med att göra detta arbete möjligt. Särskilt vill jag tacka min handledare, Jan Lindström, samt Mary M=Afee Graham och Waldemar Johansson för de värdefulla råd och synpunkter som de givit mig under arbetets gång.

INLEDNING

Växtrötter och aeroba mikroorganismer är för sin respiration beroende av en god tillgång på syrgas i marken. Vid vattenmättnad blir syretillgången begränsad till det syre som finns löst i vattnet samt till det som finns "instängt" i små luftfyllda porer dit vattnet inte når, framförallt inuti jordaggregaten (Blackwell, 1983). Syrebristen påverkar växten dels direkt genom att respirationen avtar, dels indirekt genom att rötternas upptag av vatten och därmed lösta näringsämnen försvåras p.g.a. energibrist (Brady, 1984). Vid långvarig syrebrist kan också vissa för växterna toxiska ämnen, t.ex. sulfider, bildas i marken (Glinski & Stepniewski, 1983).

Det finns flera olika metoder för bestämning av markens syretillstånd. Däribland kan nämnas gaskromatografisk analys av markluftens syrekonzentration, bestämning av syrets diffusionskoefficient i de luftfyllda markporerna samt bestämning av markens redoxpotential. Redan år 1926 belyste dock Hutchins vikten av att också känna till den hastighet varmed nytt syre kan nå fram till rötternas ytor sedan det redan tillgängliga förbrukats vid respirationen. Rötterna omges av tunna vattenfilmer, och diffusionskoefficienten för syrgas i vatten är ca 10 000 gånger lägre än i luft. Ett mått på hur snabbt syrgas kan diffundera genom dessa vattenfilmer vid olika syrehalter i markluften skulle, enligt Hutchins (1926), ge värdefull information om rötternas syreupptag. År 1952 introducerade Lemon & Erickson en metod för mätning av sådan syrediffusion i mark. Sedan dess har metoden, som ofta kallas ODR-metoden efter engelskans Oxygen Diffusion Rate, utvecklats vidare och används idag, jämsides med andra, för bestämning av markens syretillstånd.

Syftet med undersökningen var att på laboratorium pröva en syreflödesmätare (figur 7) som inte tidigare använts i svenska försök. Med hjälp av denna mätare skulle ett gränsvärde för syrediffusionen, det s.k. kritiska ODR-värdet, fastställas i två mellansvenska lerjordar (tabell 1) vid vilket syretillgången blir begränsande för uppkomst och tillväxt hos en för syrebrist känslig gröda, i detta fall värraps. Avsikten var dessutom att studera hur bevattning och jordpackning inverkar på syrediffusionen samt att göra kompletterande mätningar av redoxpotential i de båda jordarna.

LITTERATURÖVERSIKT

ODR-METODENS PRINCIP

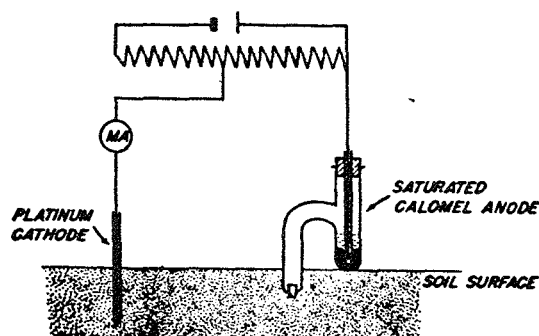
En elektrod av platina nedföres i marken och påföres en negativ potential på mellan -0.2 V och -0.8 V relativt en referenselektrod som står i kontakt med jorden via en saltbrygga (figur 1). Referenselektroden kan bestå av antingen kvicksilverklorid (HgCl) eller ett silverbleck nedsänkt i kaliumkloridlösning (KCl) (Lemon & Erickson, 1955). I fallet med silver oxideras detta enligt följande formel:



En ström av elektroner från referenselektroden (anoden) uppkommer härmed och på platinarelektrodens (katodens) yta sker då en reduktion av syremolekyler. Vid $\text{pH} < 3.5$ sker reduktionen enligt följande formel (Odén, 1962):

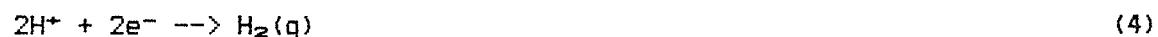


samt vid $3.5 < \text{pH} < 12$ enligt följande formel:



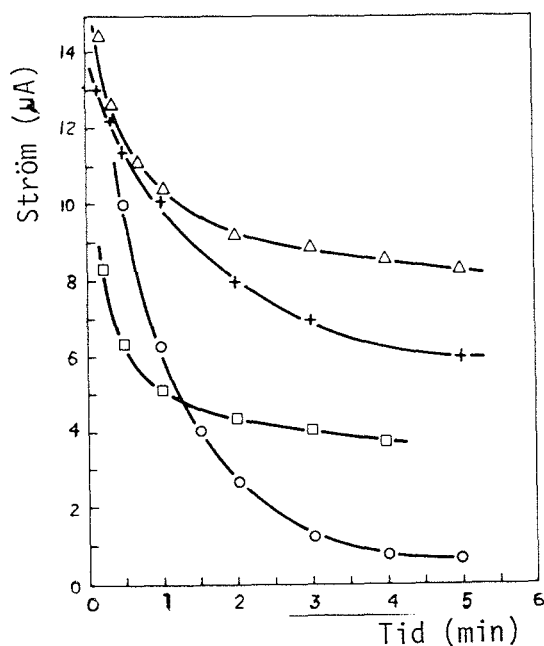
Figur 1. Principskiss över elektrodsystem för mätningar in situ av syrediffusion i jord (Lemon & Erickson, 1955).

Reduktionen av syre på katodens yta sker ej spontant, utan systemet måste tillföras energi. Detta åstadkoms genom att lägga en lämplig spänning över elektroderna med en likströmskälla. Först vid en potential av -0.2 V relativt anoden börjar syre reduceras vid katoden. Höjs potentialen över -0.8 V börjar däremot en annan reaktion ta vid, nämligen den där vätejoner reduceras till vätegas (Lemon & Erickson, 1955):



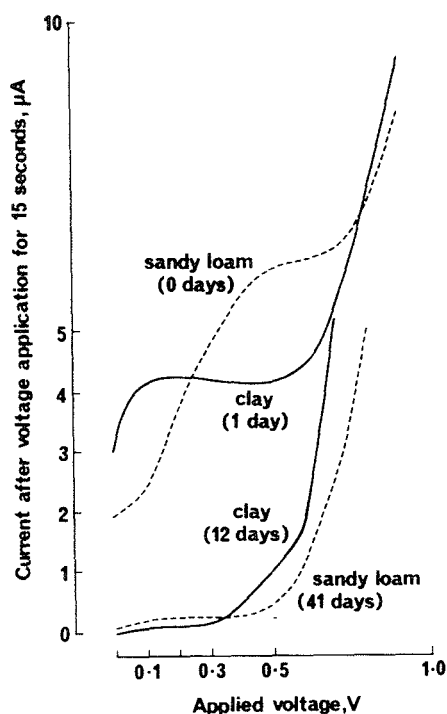
Ett villkor för att reduktion av syremolekyler överhuvudtaget ska kunna ske i marken är att platinarelektroden är omgiven av en sammanhängande vattenfilm samt att vätskekontakt finns mellan katod och anod.

Efterhand som syre reduceras vid katodens yta tillförs nytt syre från omgivningen genom diffusion, och i vattenfilmen utvecklas en syregradient som så småningom utbreder sig allt längre från katodytan. Den ström som uppkommer genom syrereduktionen kan mätas med en amperemeter och är relativt hög i början. Den sjunker dock snabbt för att till slut jämnas ut (figur 2). Om allt syre som når fram till katodytan omedelbart reduceras blir strömstyrkan efter utjämningsen direkt proportionell mot syrediffusionen och syrets diffusionskoefficient i markvätskan. Innan strömstyrkan registreras bör man alltså vänta tills denna utjämnings skett. Den s.k. polarisationstiden är i allmänhet 3 - 5 minuter (Lemon & Erickson, 1952).



Figur 2. Uppmätt strömstyrka som funktion av tiden i fyra olika icke vattenmättade jordar (McIntyre, 1970).

Genom att avsätta strömstyrkan vid en viss tidpunkt mot den pålagda spänningen (V_A) kan diagram av den typ som visas i figur 3 upprättas. I diagrammet kan utläsas att en plata utbildas inom ett visst spänningsintervall där strömstyrkan blir oberoende av den pålagda spänningen. Inom detta intervall bestäms strömstyrkan enbart av syrediffusionen i vattenfilmen. Man bör i sina mätningar välja en sådan spänning att man hamnar på denna plata (Lemon & Erickson, 1955; Danfors, 1962). De flesta författare har använt en pålagd, konstant spänning av -0.65 V relativt referenselektroden i sina försök (Stepniewski, 1977; Gawlik, 1980; m.fl.) men både högre (Lemon & Erickson, 1952; Odén, 1962; m.fl.) och lägre spänningar (Blackwell, 1983; m.fl.) har använts.



Figur 3. Strömstyrkans beroende av pålagd spänning mätt på 5 cm djup i två olika vattenmättade jordar. Siffror inom parentes anger hur många dagar respektive jord stått under vatten (Blackwell, 1983).

Syrediffusionen (f) kan uttryckas som (Lemon & Erickson, 1952):

$$f = \frac{I}{nFA} \quad (\text{ekv. 1})$$

där f = syrediffusionen $(\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$

I = diffusionsströmmen (A)

n = det antal elektroner som åtgår per reducerad syremolekyl (=4)

F = Faradays konstant (A s mol^{-1})

A = den yta av elektroden som står i kontakt med jorden (m^2)

I äldre litteratur (Lemon & Erickson, 1952; Danfors, 1962; Odén, 1962; Letey & Stolzy, 1964; m.fl.) uttrycks syrediffusionen (ODR) i $\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$.

Platinaelektroden kan, om den är tillräckligt tunn och omges av en vattenfilm när den tryckts ner i marken, liknas vid en rot. Den typ av syrereduktion som äger rum på elektrodens yta sker ju också vid respirationen hos rötterna (Lemon & Erickson, 1952).

METODENS BEGRÄNSNINGAR

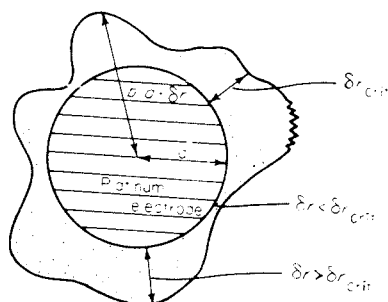
Katodens nedförande i marken

För att få ett medelvärde på syrediffusionen i en viss jord krävs ett större antal mätningar där katoden flyttas mellan varje mättillfälle. Varje mätvärde reflekterar ju den unika omgivning i vilken platinaelektroden befinner sig. Värdena kan variera mycket inom en och samma jord, exempelvis beroende på om platinaspetsen hamnar i en naturlig spricka eller inuti ett jordaggregat (Lemon & Erickson, 1952). För att undvika att katoden hamnar i en vertikal spricka kan den med fördel tryckas ned i jorden bildande en vinkel av exempelvis 45° med markytans horisontalplan (Blackwell, 1983).

Trots att platinaspetsen oftast har en diameter av endast 0.4 - 1.2 mm, är den i allmänhet fastsatt i en betydligt bredare stav (figur 8). Elektrodens nedförande i marken innebär därför en viss sammanpressning av de närmast liggande jordpartiklarna, vilket kan påverka den uppmätta strömstyrkan. Hur stor denna påverkan blir beror på jordens porositet och hållfasthet (Scott, 1963, s. 387 - 390). Greacen m.fl. (1967) visade dessutom att små sprickor formas närmast elektroden när denna trycks ned i marken. Dessa sprickor kan i luftade jordar fyllas med luft och ge ett för högt ODR-värde. Att, som ovan beskrivits, föra ned katoden i 45° vinkel mot markytan kan minska risken för sådan sprickbildning (Blackwell, 1983).

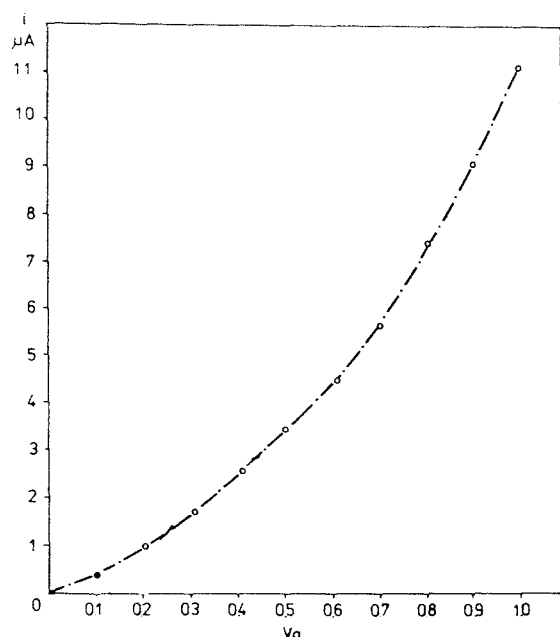
Vattenfilmens tjocklek

Så länge den relativa fuktigheten i marken är hög, vilket den normalt är även i luftade jordar, bildas alltid en sammanhängande vattenfilm runt katoden. Detta beror bl.a. på att vatten lätt adsorberas till platinaytan (McIntyre, 1970).



Figur 4. Schematisk bild över vattenfilmen som omger platinaelektroden i jorden, där δ_{eff} betecknar den "mini-tjocklek" på vattenfilmen som erfordras för att diffusionen ska vara den enda process som styr storleken på uppmätt strömstyrka (McIntyre, 1970).

I figur 4 visas en modell av hur katoden och dess omgivande vattenfilm kan se ut i marken. Man har funnit att det krävs en viss "mini-tjocklek" (δ_{crit}) på vattenfilmen för att ett rättvisande värde på syrediffusion ska kunna erhållas. Syrediffusionen blir då den enda process som blir begränsande för den uppmätta strömstyrkan. Detta är aktuellt i jordar som är helt eller nästan vattenmättade. I luftade jordar är dock risken större för att vattenfilmens tjocklek på något ställe ska bli mindre än δ_{crit} . Syreflödet till katoden ökar då, p.g.a. syrets betydligt högre diffusionskoefficient i luft än i vatten, så mycket att markluftens syrehalt samt reaktionshastigheten för syrets reduktion istället blir begränsande för den uppmätta strömstyrkan. Den pålagda spänningen påverkar reaktionshastigheten och blir följaktligen också bestämmande för den uppmätta strömstyrkan. Som figur 5 visar, erhålls ingen plåtå liknande den för vattenmättade jordar i figur 3. I luftade jordar kan, i enlighet med ovanstående resonemang, inget rättvisande värde på syrets diffusion i markvätskan erhållas (McIntyre, 1970).



Figur 5. Strömstyrkans beroende av pålagd spänning i en icke vattenmättad sandig lera (efter Glinski & Stepniewski, 1983).

pH-effekter

Koncentrationen av vätejoner (H^+) inverkar på den potential vid vilken H^+ -joner börjar reduceras (4), dvs. på H^+ -jonens s.k. dekompositionspotential. Denna potential antar ett konstant värde av ca -0.8 V så länge H^+ -koncentrationen är låg (och pH är högt). Med sjunkande pH sänks också dekompositionspotentialen. Detta är främst fallet i vattenmättade jordar. Armstrong (1967) visade exempelvis att vid ett pH-värde av 6.3 var H^+ -jonens dekompositionspotential endast ca -0.5 V i en vattenmättad jord. Den i försök ofta använda pålagda spänningen -0.65 V kan därför i vattenmättade jordar ge ett för högt ODR-värde p.g.a. att även H^+ -reduktion uppträder och påverkar den uppmätta strömstyrkan (Armstrong, 1967).

I luftade jordar påverkas inte H^+ -jonens dekompositionspotential i pH-intervallet $3.5 < pH < 11$ utan förblir lika med -0.8 V. Det är först vid $pH < 3.5$ som potentialen närmar sig 0. Detta kan förklaras av att det vid $pH > 3.5$ bildas OH^- när syre reduceras (3). Dessa joner kan neutralisera H^+ och därmed höja pH i området runt katodytan. I luftade jordar bidrar den höga syrehalten till att betydligt mer OH^- bildas runt katoden än i vattenmättad jord. Dessa joner kan inte lika lätt transporteras bort från katodytan som vid vattenmättnad utan ackumuleras i den omgivande vattenfilmen (Odén, 1962).

Ackumulation av OH^- i vattenfilmen kan enligt Will (1963) ge upphov till att potentialen, och därmed också den reducerande förmågan, sänks på vissa delar av platinaytan. Med en ökning av den pålagda spänningen kan OH^- lättare drivas bort från katoden, och detta är sannolikt en av orsakerna till varför strömstyrkan blir beroende av pålagd spänning i luftade jordar (Stepniewski, 1979).

Den elektriska resistansen i jordprovet

Kristensen (1966) och McIntyre (1967) har visat att den elektriska resistansen i undersökta jordar ofta antar ett för ODR-mätningarna icke försumbart värde. Ett spänningsfall uppstår över den jord som befinner sig mellan katod och anod och den verkliga eller effektiva spänningen i systemet blir mindre än den spänning som läggs över elektroderna, d.v.s. den pålagda spänningen. Följande ekvation gäller (McIntyre, 1967):

$$V_E = V_A - iR \quad (V) \quad (\text{ekv.2})$$

där V_E = verklig eller effektiv spänning (V)

V_A = pålagd spänning (V)

i = strömstyrkan (A)

R = resistansen i jorden
mellan elektroderna (Ω)

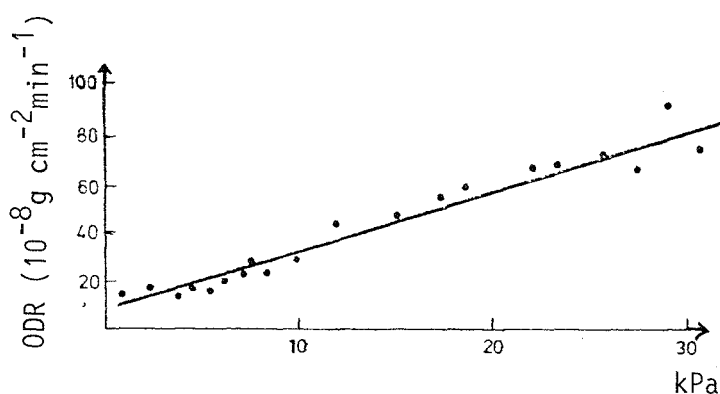
Resistansen kan i jordprovet anta värden upp till ca 70 000 Ω. Spänningsfallet kan därför med de strömmar det här är frågan om bli så högt som 0.2 - 0.4 V, särskilt i luftade jordar. I vattenmättade jordar kan det däremot oftast räknas som försumbart, åtminstone så länge som den effektiva spänningen hamnar inom plattaintervallet i figur 3. I luftade jordar saknas denna platta (figur 5). Den kraftiga variation i effektiv spänning, och därmed också i uppmätt strömstyrka, som uppkommer p.g.a. varierande resistans i jorden mellan elektroderna gör att mätningarna inte bör utföras med en konstant pålagd spänning i dessa jordar. För att man ska kunna erhålla jämförbara resultat bör istället den effektiva spänningen hållas konstant (Kristensen, 1966; McIntyre, 1967). Rankin & Sumner (1978) gjorde mätningar där den effektiva spänningen var densamma vid varje mättillfälle, och deras resultat tyder på att man på detta sätt kan få en relativt god korrelation mellan syretillstånd och ODR även i luftade jordar.

Beläggning av katodytan

Om katoden lämnas kvar i marken en längre tid kan en beläggning av exempelvis oxider bildas på dess yta. Detta påverkar den reducerande förmågan. Den friktion mellan jordpartiklarna och katodytan som uppstår då katoden trycks ned i marken anser McIntyre (1970) vara tillräcklig för att avlägsna all sådan beläggning.

FÖRVANTADE RESULTAT

ODR-metoden kan, om den används rätt med hänsyn till vad som tidigare nämnts, vara ett värdefullt komplement till andra idag förekommande mätmetoder för bestämning av markens syretillstånd (McIntyre, 1970). För de flesta jordar gäller att ODR ökar med ökande vattenavförande tryck (figur 6). Denna korrelation är stark upp till ett visst vattenavförande tryck, vilket anses vara 5 - 10 m vp (50 - 100 kPa) i de flesta jordar. Vid högre tryck än 10 m vp ökar risken för att vattenfilmen runt katoden på något ställe ska brista. Den reducerande förmågan avtar då kraftigt med låga ODR-värden som följd (Stepniewski, 1980).



Figur 6. ODR som funktion av vattenavförande tryck i en organogen jord (efter Gawlik, 1980).

Skillnader i effektiv spänning, använd mätteknik samt skillnader inom och mellan jordar gör det svårt om ens möjligt att fastställa något allmängiltigt kritiskt ODR-värde för rottillväxt. Varje jord och gröda måste undersökas för sig (McIntyre, 1970). Många författare (Letey & Stolzy, 1964; Gawlik, 1980; Stepniewski, 1980) anser dock att ett kritiskt ODR-värde av 200 - 400 $\text{ng cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ (i SI-enheter motsvarande ca 1.1 - 2.1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) kan tjäna som riktvärde för de flesta odlade grödor. Stepniewski (1980) påpekar samtidigt att det kritiska ODR-värdet kan vara betydligt lägre för gräs och andra växter som är mindre känsliga för syrebrist i marken. Värdet kan också variera med växtens olika utvecklingsstadier.

Stepniewski (1977) har visat i flera försök att ODR-värdena sänks i jordar som bevattnats för att återigen öka när jorden torkar ut. Han har också visat (1980) att ODR-värdena minskar ju högre skrymdensiteten är, dvs. ju mer packad jorden är.

BESTÄMNING AV MARKENS REDOXPOTENTIAL

Redoxpotentialen är ett mått på markvätskans oxiderande förmåga. Oxiderande lösningar har stor tendens att ta upp elektroner och har därmed hög redoxpotential, medan reducerande lösningar har stor tendens att avge elektroner och har låg redoxpotential. Redoxpotentialen anges i förhållande till normalvätgaselektroden och benämns då E_h . För det generella redoxparet $Ox + ne^- \rightarrow Red$, där Ox betecknar den oxiderade formen av ett ämne, Red den reducerade formen och ne^- det antal elektroner som skiljer formerna åt, ges redoxpotentialen av Nernsts formel:

$$E_h = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{Ox}{Red} \quad (\text{ekv.3})$$

där E_h = redoxpotential (V)

E_o = normalpotential för redoxparet (V)

R = allmänna gaskonstanten (J mol⁻¹ K⁻¹)

T = absolut temperatur (K)

n = antal elektroner

F = Faradays konstant (J mol⁻¹ V⁻¹)

Ox = aktiviteten av oxiderad form (mol m⁻³)

Red = aktiviteten av reducerad form (mol m⁻³)

Markens redoxpotential kan bestämmas med hjälp av samma sorts elektroder som beskrivits ovan. I detta fall läggs ingen spänning över systemet utan elektroderna sätts i förbindelse med varandra via en voltmeter med hög inre resistans (10¹⁰ - 10¹³ Ω). Det tar ca 5 minuter för värdet att stabilisera sig. För att vid mätningarna få ett rättvisande värde på E_h kontrolleras elektroderna först i en buffrad standardlösning med känt E_h -värde. Alla uppmätta värden justeras sedan med hänsyn till detta (Ponnamperuma, 1972).

Markens pH inverkar på E_h dels genom att H⁺-joner medverkar i oxidations/reduktions-processerna, dels genom att pH påverkar lösligheten hos de ämnen som deltar i dessa processer. Ofta korrigeras uppmätt E_h till vad motsvarande E_h skulle vara vid pH 7 (Grable & Siemer, 1968; m.fl.). Korrektionsfaktorn varierar med olika grad av vattenmättnad i marken (Ponnamperuma, 1972).

E_h är temperaturberoende, varför alla mätningar bör utföras vid en konstant marktemperatur. Påpekas kan också att en bestämning av markens E_h inte bör följa omedelbart efter det att elektroderna använts för registrering av ODR. Det uppmätta E_h -värdet kan annars bli för lågt p.g.a. den polarisering som elektroderna blivit utsatta för. Denna effekt försvinner om elektroderna efter ODR-mätningen tas upp och sätts ner på ett nytt ställe i marken innan bestämning av E_h sker (Glinski & Stepniewski, 1983).

Med hänsyn till bl.a. ovan nämnda pH-effekter är E_h ett relativt osäkert mått på markens syretillstånd. Det är särskilt svårt att erhålla stabila och reproducerbara värden i luftade jordar (Ponnamperuma, 1972). Enligt Glinski & Stepniewski (1983) kan dock trovärdiga E_h -värden erhållas även i jordar där det vattenavförande trycket är högre än 10 m vp. Det räcker enligt dem med att delar av platinaytan är omgiven av en vattenfilm för att registrering av E_h ska vara möjlig. Bestämning av markens E_h -värde blir därmed ett värdefullt komplement till ODR-mätningarna.

I väldränerade jordar antar E_h oftast ett positivt värde av mellan 0.4 V och 0.7 V. Värdet sjunker med ökande grad av vattenmättnad i marken och kan under extrema anaeroba förhållanden bli så lågt som -0.4 V (Brady, 1984).

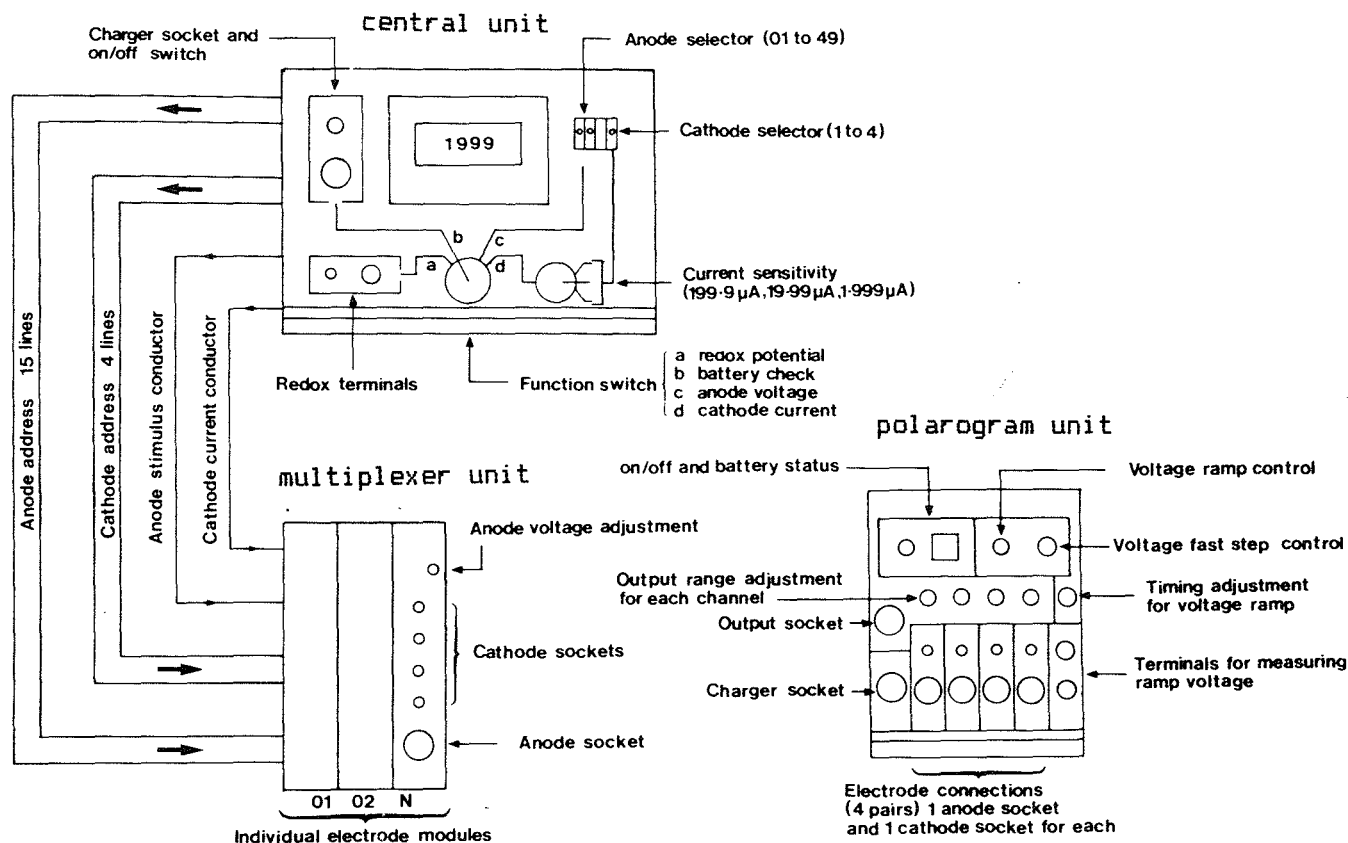
MATERIAL OCH METODER

MÄTUTRUSTNING

Den mätare som använts för bestämning av ODR och redoxpotential i jord är en flerkanalig elektrisk syreflödesmätare utformad av Armstrong & Wright (1976) och tillverkad av Ledbury Electronics Ltd i Gloucester, England. Den består av en central enhet, en "multiplexerenhet" och en "polarogramenhet" (figur 7) till vilka mätelektroderna kan anslutas (Blackwell, 1983).

Multiplexerenheten

Till multiplexerenheten kan anslutas upp till 4 anoder och 16 katoder för samtidig registrering av ODR. En spänning läggs över varje elektrodpar och den effektiva spänning som då uppkommer kan här justeras till önskat, konstant värde.



Figur 7. Schema över den syreflödesmätare som utformats av Armstrong & Wright (1976) och tillverkats av Ledbury Electronics Ltd i Gloucester, England för bestämning av syreflöde (ODR) och redoxpotential i jord. Upp till 4 anoder och 16 katoder kan anslutas till multiplexerenheten. Den fristående polarogramenheten gör det möjligt att med hjälp av en X-Y-skrivare eller amperemeter upprätta diagram över strömstyrkans beroende av den effektiva spänning som läggs över elektroderna i det aktuella jordprovet (efter Blackwell, 1983).

Den centrala enheten

På den centrala enheten finns en funktionsväljare med 4 lägen som gör det möjligt att avläsa värden på strömstyrka, redoxpotential, effektiv spänning samt mätarens batterispänning. Aktuellt värde visas i display-fönstret ovanför funktionsväljaren. Till höger om detta fönster sitter en tumhjulskomplare med vars hjälp man väljer vilket anslutet elektrodpar som ska avläsas. Mätaren kan registrera strömstyrkor mellan 1 nA och 200 μ A. Noggrannheten väljs längst ned till höger på panelen. Till denna enhet kan också anslutas ett elektrodpar för registrering av redoxpotential. Batteriet, som är gemensamt för den centrala enheten och multiplexerenheten, laddas via uttaget till vänster om det digitala fönstret.

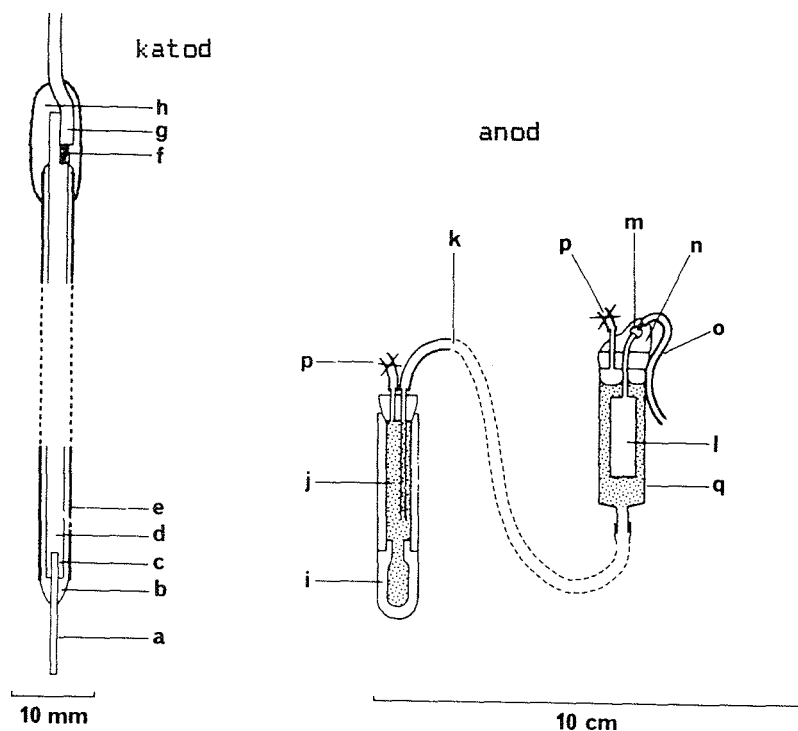
Polarogramenheten

Polarogramenheten är en fristående enhet, vars batteri laddas separat. Upp till fyra elektrodpar kan anslutas. Den effektiva spänningen ökas stegvis med 20 mV / s eller 20 mV / 15 s för en samtidig registrering av strömstyrkan. Därmed kan ström-spänning-diagram för det aktuella jordprovet upprättas med hjälp av en X-Y-skrivare som ansluts till härför avsett uttag på panelen. I anslutning till varje elektrodpar sitter en väljare för skrivarens utslag, vars två lägen är 100 mV / 20 μ A och 100 mV / 200 μ A. Alternativt kan strömstyrkan mätas med hjälp av en amperemeter som kopplas i serie med katoden. Längst ned till höger sitter uttag för registrering av den stegvis ökande spänningen. Dessa uttag kan, om så önskas, förbindas med redoxuttagen på den centrala enheten. Spänningen visas då i display-fönstret.

Elektroderna

En principskiss över de elektroder som användes i försöket visas i figur 8. Platinatråden hade längden 6.8 mm och diametern 1.0 mm. Katod och anod kontrollerades före användandet i en buffrad standardlösning bestående av 0.0033 M $K_3Fe(CN)_6$ och 0.0033 M $K_4Fe(CN)_6$ i 0.1 M KCl som har ett E_n -värde av 0.430 V vid 25° C (Ponnamperuma, 1972). När elektrodparet anslöts till redoxuttagen på mätarens centrala enhet blev då utslaget ca 0.283 V vid 25° C. De katoder som gav avvikande eller instabila värden användes inte i några mätningar.

Om flera katoder ansluts till en och samma anod för samtidig mätning av strömstyrkan bör avståndet mellan de olika katoderna vara minst 30 cm för att undvika interaktion mellan dessa (Blackwell, 1983).



Figur 8. Principiell utformning av katod och anod för elektrometrisk bestämning av syreflöde (ODR) och redoxpotential i jord. Teckenförklaring: a) platinatråd, b) epoxylim, c) sammanpressad, lödd fog, d) elektrisk ledare av metall, e) krympslang, f) lödd förbindelse, g) sladd till mätarens katoduttag, h) isoleringstejp, i) porös, keramisk platta, j) mättad KCl-lösning, k) plastslang fylld med KCl-lösning, l) polariserat silverbleck med arean 25 cm², m) sammanpressad, lödd fog, n) silicongummi, o) sladd till mätarens anoduttag, p) kran för läckande luft från lösningen, q) behållare av plast eller glas (efter Blackwell, 1983).

FÖRSÖKSUPPLÄGGNING

Ostörda jordprover togs ut mellan tjällossningen och vårbruket 1987 från två olika provplatser, Ultuna i Uppland och Limsta i Västmanland. Några data över försöksjordarna visas i tabell 1. Båda jordarna är styva leror men har inte samma odlingssegenskaper, varför det var intressant att undersöka eventuella skillnader i ODR-värden och redoxpotential mellan jordarna. Båda jordarna hade höstplöjts året innan. Jordproverna, 35 stycken från Ultuna och 41 stycken från Limsta, togs ut från markens övre skikt (5 - 15 cm) i öppna cylindrar av rostfritt stål (höjd 10 cm, diameter 7.2 cm) som trycktes ned i marken. överskottsjord skars bort med en kniv så att jordvolymen i varje prov exakt skulle motsvara cylinderns volym.

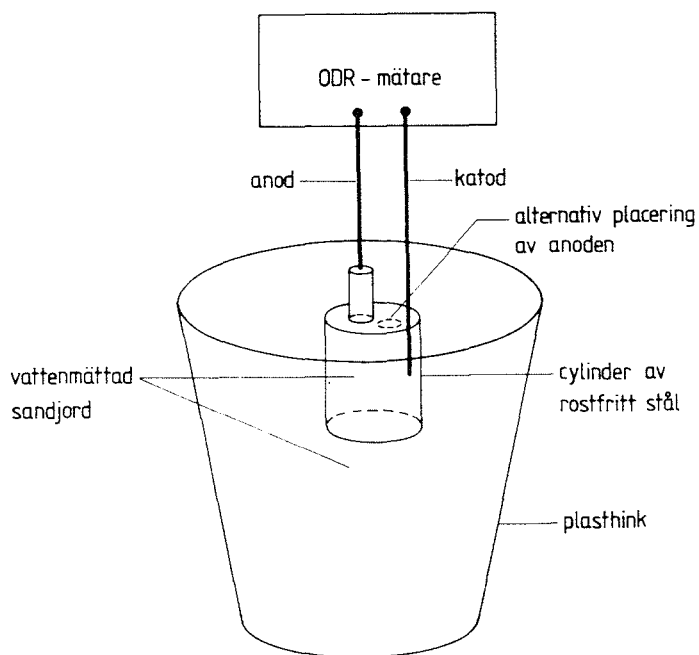
Tabell 1. Några data över försöksjordarna

<u>Kornstorleksfördelning (anges i viktsprocent)</u>							
	Glödf.	Sa.	Gmo.	Fmo.	Gmj.	Fmj.	L.
ULTUNA	5	2	8	12	12	14	47
LIMSTA	5	3	17	8	7	11	49

<u>pH i jordsuspensionen</u>		
	dest. vatten	1M KCl
ULTUNA	5.3	4.2
LIMSTA	6.6	4.9

<u>Tidigare odlade grödor</u>		
	år 1985	år 1986
ULTUNA	höstvede	havre
LIMSTA	höstvede	havre

För att förvissa sig om att stälcylindern inte skulle påverka resultatet vid de kommande mätningarna genom eventuell inverkan på den uppmätta strömstyrkan hade följande inledande försök gjorts (figur 9):



Figur 9. Principskiss över försöksuppställning för kontroll av stälcylinders eventuella inverkan på uppmätt strömstyrka i jordprovet.

En plasthink fylldes med vattenmättad sandjord och en tom stålcylander pressades ner i jorden. Ett elektroddpar placerades i stålcylanderns mitt och anslöts till syreflödesmätaren. Den uppkomna strömstyrkan tilläts stabilisera sig innan ett värde antogs. Vi kan kalla detta värde för X. Anoden flyttades därefter inom stälringen så att avståndet mellan katod och anod ändrades. Strömstyrkan påverkades inte märkbart av detta förfarande utan förblev lika med X. Därefter drogs stålcylandern försiktigt upp ur jorden samtidigt som elektroddparet hela tiden stod kvar i cylanderns mitt. När cylandern avlägsnats helt från jorden avlästes strömstyrkan på nytt. Detta värde avvek heller inte märkbart från X. Utifrån dessa resultat drog vi därför slutsatsen att stålcylandern inte skulle ha någon märkbar inverkan på uppmätt strömstyrka i de kommande försöken.

De i cylindrar uttagna jordproven ställdes med basen i ett vattenfyllt kar i 10 dygn för att bli vattenmättade. Därefter påfördes proven olika vattenavförande tryck. Detta åstadkoms genom att ställa proven på avsugningsplattor av keramik som utsattes för olika vattenavförande tryck tills jämvikt mellan vattenhållande och vattenavförande tryck erhöles i proven. Använda tryck relativt jordprovets mitt var 0, 0.05, 0.15, 0.50 och 1.00 m vp. Dessutom påfördes några prov från Limsta ett vattenavförande tryck av 2.00 m vp. Två prov från varje jord med avsugningen 0.50 och 1.00 m vp packades sedan i en ödometer. Trycket var 2 kp / cm² och därmed åstadkoms en volymminskning med ca 10 procent i Utunaproven och ca 15 procent i Limstaproven.

Upprättande av ström-spänning-diagram

Ett vattenmättat cylinderprov (avsugning 0 m vp) från varje jord användes för upprättande av ström-spänning-diagram. Anodens saltbrygga placerades härvid på ytan av jordprovet och katoden trycktes ned så att platinaspetsen hamnade på ca 1.5 cm djup. Elektrodderna anslöts till mätarens polarogramenhet och den effektiva spänningen tilläts öka med ca 20 mV / 15 s. Uttagen för registrering av effektiv spänning anslöts till redoxuttagen på den centrala enheten och den effektiva spänning som visades i display-fönstret antecknades för varje steg. Strömstyrkan uppmättes med hjälp av en amperemeter som kopplades i serie med katoden.

Bestämning av ODR och redoxpotential i jordproven

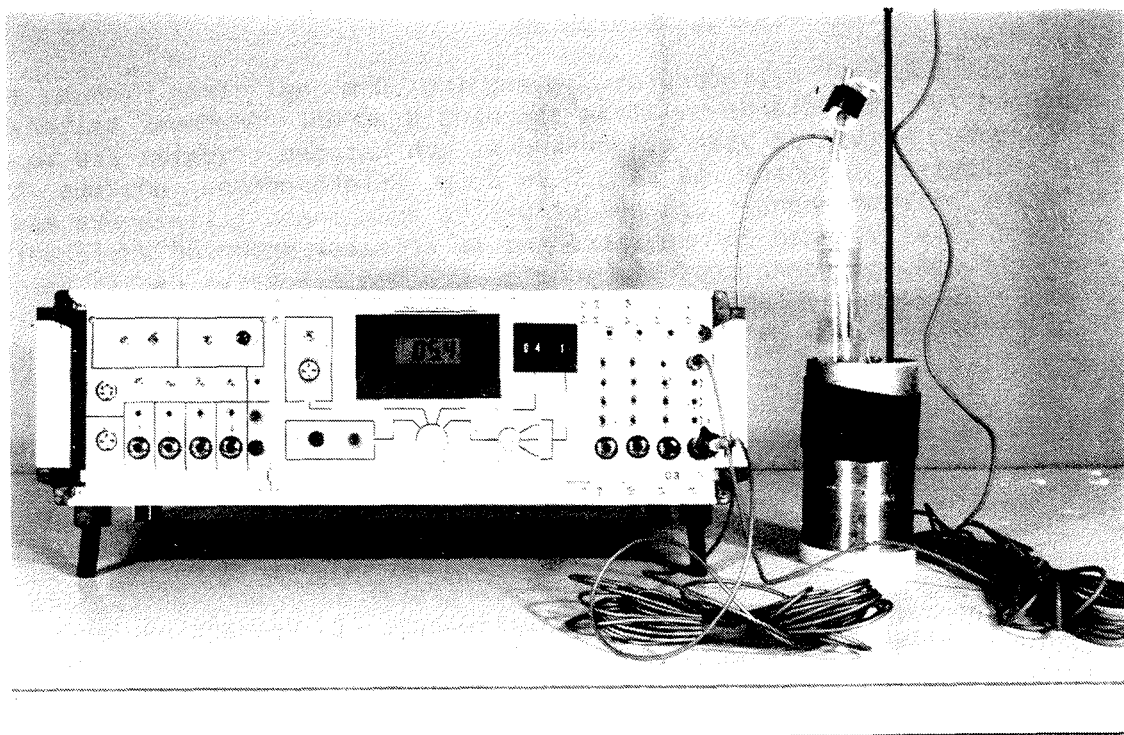
Dag 0

Efter avsugningen vägdes alla cylinderprover för att möjliggöra en senare beräkning av porositet och vattenhalt i respektive prov. En första mätning av redoxpotential och ODR i alla prover gjordes. Anodens saltbrygga placerades härvid på jordprovets yta, som var ca 40 cm², och den korresponderande katoden trycktes ned vinkelrätt mot ytan så att platinaspetsen hamnade på ca 1.5 cm djup. Avståndet mellan katod och anod var ca 5 cm. För att undvika interaktion mellan olika elektroddpar användes endast ett elektroddpar åt gången i varje jordprov. Elektrodderna anslöts till redoxuttagen på den centrala enheten. Ett första värde på redoxpotential antecknades efter det att värdet tillätits stabilisera sig under 4 minuter. Till det uppmätta värdet adderades sedan 0.147 V (se under rubriken "Elektrodderna") för att redoxpotentialen skulle kunna anges i förhållande till normalvätgaselektroden.

Utan att flytta elektroderna anslöts de därefter till multiplexerenheten och den effektiva spänningen 0.65 V lades över kretsen. Efter 4 minuter avlästes strömstyrkan som kunde räknas om till syrediffusion enligt ekvation 1.

Katoden flyttades till ett nytt ställe i samma jordprov och redoxpotential och strömstyrka avlästes på nytt. Därefter flyttades katoden ytterligare två gånger i provet men i dessa fall uppmättes endast strömstyrkan.

När denna mätning slutförts "såddes" 3 frön vörraps (Hanna) på ytan av varje jordprov. Ett prov från varje jord och avsugningssteg lämnades dock obesätt. Alla prov försågs med en vägd "toppcylinder" (höjd 5.0 cm, diameter 7.2 cm) som fixerades ovanpå jordprovet med hjälp av en gummimanschett, också den vägd. Ca 100 cm³ såbäddsjord från respektive jord hälldes därefter över fröna i varje cylinder. Rapsfröna täcktes härigenom med ett ca 3 cm tjockt lager jord. I såbäddsjorden hade blandats NPK i flytande form motsvarande en gödselgiva av ca 160 kg N / ha, 30 kg P / ha och 130 kg K / ha. Alla prover ställdes i klimatkammare med hög luftfuktighet (ca 70 procent) och en temperatur som varierade mellan +15° C och +20° C.



Figur 10. Den i försöket använda utrustningen för mätning av syrediffusion och redoxpotential i jordprover. Foto: Jan Lindström.

Dag 6

Efter 6 dagar hade de flesta plantor grott och kommit upp med två hjärtblad. En gallring utfördes så att endast en planta återstod i varje cylinder. ODR mättes (figur 10) fyra gånger i varje jordprov och katoden flyttades mellan varje mättillfälle. Såbäddsjorden hade torkat upp något i ytan varför saltbryggan fick föras ned en bit under ytan för att garantera vätskekontakt mellan katod och anod. Katoden trycktes ned till samma djup i jordprovet som användes i mätningarna dag 0, dvs. med platinaspetsen 1.5 cm under frödjup. Mätningarna gjordes dock inte på samma ställen i jordprovet som dag 0, detta för att undvika att katoden hamnade i de eventuella hål som bildades vid katodens nedförande i föregående mätning. Alla prover vägdes med toppcylinder och såbädd innan de ställdes tillbaka i klimatkammaren.

Dag 7

Några av de prover som utsatts för avsugning 0.15, 0.50, 1.00 och 2.00 m vp tillsattes efter 7 dygn 60 ml kranvatten vardera, vilket skulle motsvara en bevattningsgiva av ca 15 mm.

Dag 8

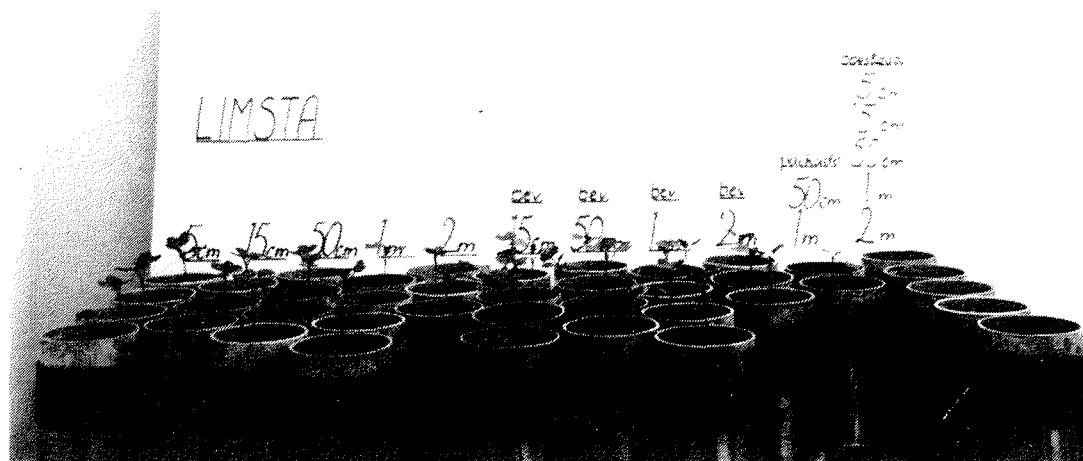
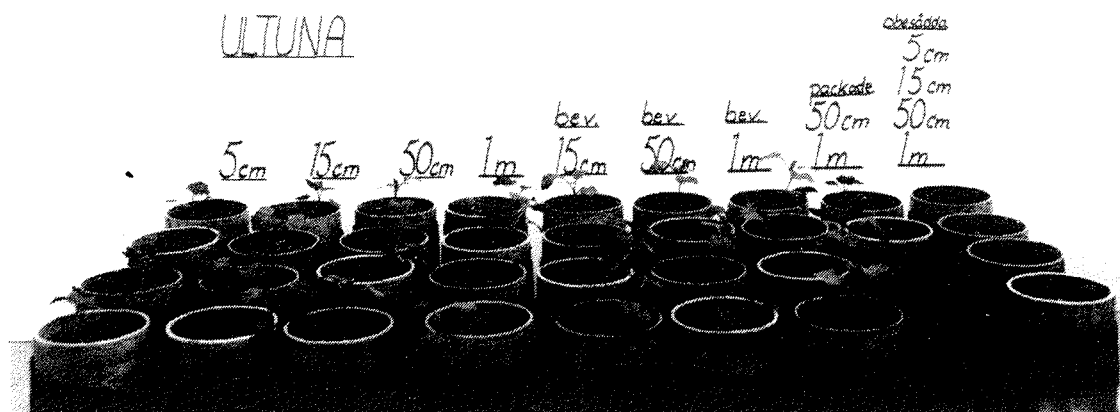
Dag 8 mättes ODR i alla bevattnade prover. Detta tillgick på samma sätt som dag 6 med undantag för att saltbryggan nu inte behövde tryckas ned så långt eftersom såbädden var mycket fuktig även på ytan. Dessutom vägdes alla bevattnade prover.

Dag 18

Alla jordprover vägdes och värden på ODR uppmättes en sista gång. Plantornas utseende vid denna tidpunkt visas i figur 11. Hos de flesta plantor var fyra blad utvecklade.

Dag 19/23

Alla plantor drogs upp och ritades av på mm-papper för bestämning av bladytorna. Detta skedde dag 19 för Limsta-proverna och dag 23 för Ultuna-proverna. Jorden delades åter upp i "cylinderjord" och såbäddsjord och vägdes. Det rotsystem som utvecklats i de besädda jordproverna studerades. Proverna torkades sedan i värmeskåp vid en temperatur av 105° C i tre dygn.



Figur 11. De i försöket ingående jordproverna från Ultuna och Limsta med olika initialt vattenavförande tryck, där bev. betecknar bevattnade prover. Korten är tagna 18 dagar efter sådd av vårrips. Foto: Jan Lindström.

Dag 22/27

De torkade proverna av cylinder- respektive såbäddsjord vägdes. Detta skedde dag 22 för Limstajorden och dag 27 för Ultunajorden. Vattenhalten i cylinder- respektive såbäddsjord vid varje mättillfälle beräknades. Kompaktdensiteten var sedan tidigare känd (2.66 g / cm^3 för Limsta och 2.64 g / cm^3 för Ultuna) varför även provernas totala porositet kunde beräknas. Diagram ritades där ODR avsattes som funktion av vattenhalten. Eftersom platinaspetsen vid varje mättillfälle befunnit sig i cylinderprovet avsattes alltid cylinderjordens vattenhalt på x-axeln. För de bevattnade leden avsattes ODR som funktion av tiden. Diagram över sambandet mellan ODR och redoxpotential där dessa mätts på samma ställe i jorden upprättades också.

Statistisk metod

Medelvärden för ODR vid varje mättillfälle för respektive jord och avsugningssteg beräknades. Härvid skildes på bevattnade och obevattnade prover. Underlaget för varje medelvärde var 12 eller 16 observationer. Variansen för dessa medelvärden beräknades därefter. Dessutom gjordes en hypotesprövning för de förändringar i medelvärdena som uppkom mellan olika mättillfällen. Alla mätvärden ansågs som oberoende och materialet som approximativt normalfördelat samt t-fördelat ($n_1 + n_2 - 2$). Varianserna för de två medelvärden som skulle jämföras poolades och probvärden beräknades med hjälp av tabell 5, sidan 707 i "Introductory statistics for business and economics" (Wonnacott & Wonnacott, 1984). Förändringen i ODR-medelvärdet ansågs som statistiskt signifikant om probvärdet blev mindre än eller lika med 5 procent.

En liknande hypotesprövning gjordes för att undersöka om de ODR-värden som uppmätts i de packade proverna var signifikant lägre än i de prover som inte packats. Observeras bör dock att underlaget för medelvärdet vid varje mättillfälle var 16 observationer för de opackade men endast 4 observationer för de packade proverna.

RESULTAT OCH DISKUSSION

STRÖMSTYRKANS BEROENDE AV EFFEKTIV SPÄNNING

I diagram 1 - 2 visas strömstyrkans beroende av den effektiva spänning som läggs över elektroderna i de båda vattenmättade jordproverna. En plåtå uppträder för både Ultuna- och Limstaprevet i intervallet 0.2 - 0.4 V. Den uppmätta strömstyrkan har då ett relativt konstant värde av ca 0.2 μA vilket motsvarar ett syreflöde av ca 0.02 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Den konstanta effektiva spänning som användes i försöket, -0.65 V relativt referenselektroden, hamnar utanför denna plåtå. Eftersom pH är relativt lågt i jordarna (tabell 1) har man då anledning misstänka att det vid vattenmättnad även sker en reduktion av H^+ -joner på platinaytan (Armstrong, 1967) vilket skulle kunna ge upphov till att en för hög strömstyrka uppmäts, i detta fall 5 μA (ca 0.6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) för Ultuna och 8 μA (ca 0.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) för Limsta.

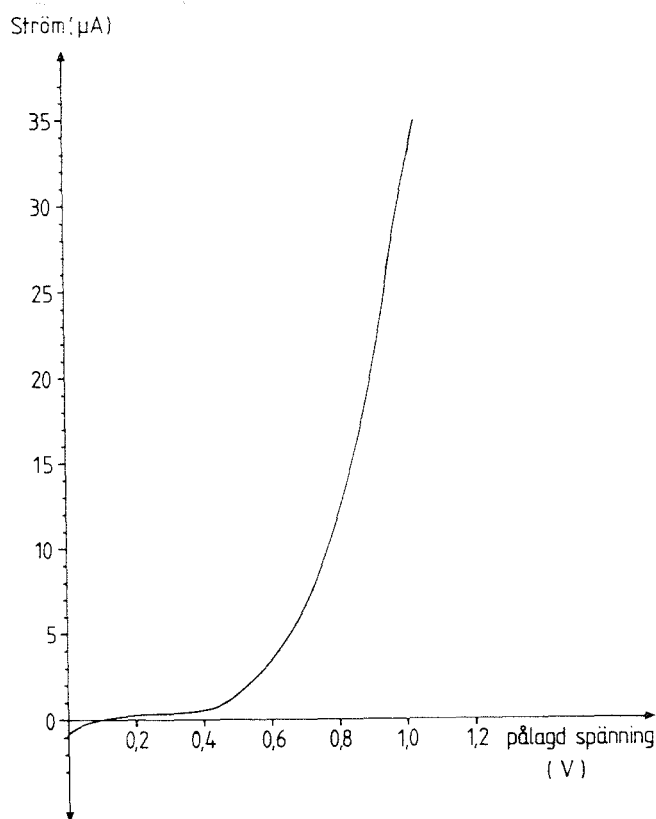


Diagram 1. Strömstyrkans beroende av pålagd, effektiv spänning i ett vattenmättat jordprov från Ultuna.

PROVERNAS POROSITET

I tabell 2 redovisas jordprovernans porositet. Cylinder- respektive såbäddsjord redovisas var för sig och man ser här att såbädden är betydligt porösare än cylinderjorden både för Ultuna och Limsta. Detta är en förklaring till varför såbädden torkade ut relativt snabbt i ytan. De packade proverna har helt naturligt lägre porositet än övriga prover. Cylinderproverna från Limsta har genomgående högre porositet än proverna från Ultuna.

Tabell 2. Porositeten (volymprocent) i cylinderjorden (Cyl) och i såbädden (Så) för de i försöket ingående jordproverna från Ultuna och Limsta, där IVT betecknar initialt vattenavförande tryck i m vp, B betecknar bevattnade prover, O obesädda prover och P packade prover

<u>ULTUNA</u>				<u>LIMSTA</u>				
IVT	Prov	Cyl	Så	IVT	Prov	Cyl	Så	
0.05	1	44.9	72.7	0.05	1	51.5	78.0	
	2	47.0	72.5		2	47.7	77.2	
	3	47.4	73.1		3	45.5	76.7	
	4	44.8	74.8		4	50.7	79.1	
0.15	5	42.8	73.5	0.15	5	49.7	77.5	
	6	44.4	75.0		6	48.7	78.1	
	7	42.9	72.2		7	49.1	77.3	
	8	44.6	67.3					
0.50	9	45.6	75.2	0.50	8	48.7	77.5	
	10	44.4	71.6		9	48.5	76.6	
	11	43.1	75.6		10	47.7	77.4	
	12	45.7	71.6		11	45.4	76.2	
1.00	13	45.9	68.4	1.00	12	49.0	79.2	
	14	46.9	73.0		13	48.1	79.4	
	15	44.7	70.8		14	47.9	78.1	
	16	48.2	72.8		15	47.5	78.7	
				2.00	16	47.0	77.1	
					17	49.6	75.9	
					18	52.2	78.1	
0.15	17	43.1	73.1	0.15	19	45.0	76.6	B
	18	43.8	72.8		20	46.0	75.9	B
	19	45.8	71.6		21	45.3	79.0	B
	20	48.5	74.9		22	47.6	78.8	B
0.50	21	41.8	70.9	0.50	23	49.0	79.4	B
	22	43.4	72.5		24	48.0	80.1	B
	23	43.6	70.5		25	47.6	78.6	B
	24	44.2	70.1		26	47.2	77.9	B
1.00	25	41.8	73.1	1.00	27	47.7	78.2	B
	26	42.5	68.7		28	45.9	76.2	B
	27	43.3	70.6		29	47.0	79.0	B
	28	46.7	71.8		30	47.2	77.0	B
				2.00	31	49.4	75.6	B
					32	46.1	79.2	B
					33	47.9	78.3	B
0.05	29	43.0	68.1	0.05	34	47.6	75.0	O
0.15	30	44.2	67.6	0.15	35	48.6	76.1	O
0.50	31	43.5	75.1	0.50	36	48.8	80.2	O
1.00	32	46.0	69.5	1.00	37	45.7	74.7	O
				2.00	38	50.1	77.1	O
0.50	33	39.2	73.6	0.50	39	44.2	76.6	P
1.00	34	41.3	70.4	1.00	40	40.9	77.1	P

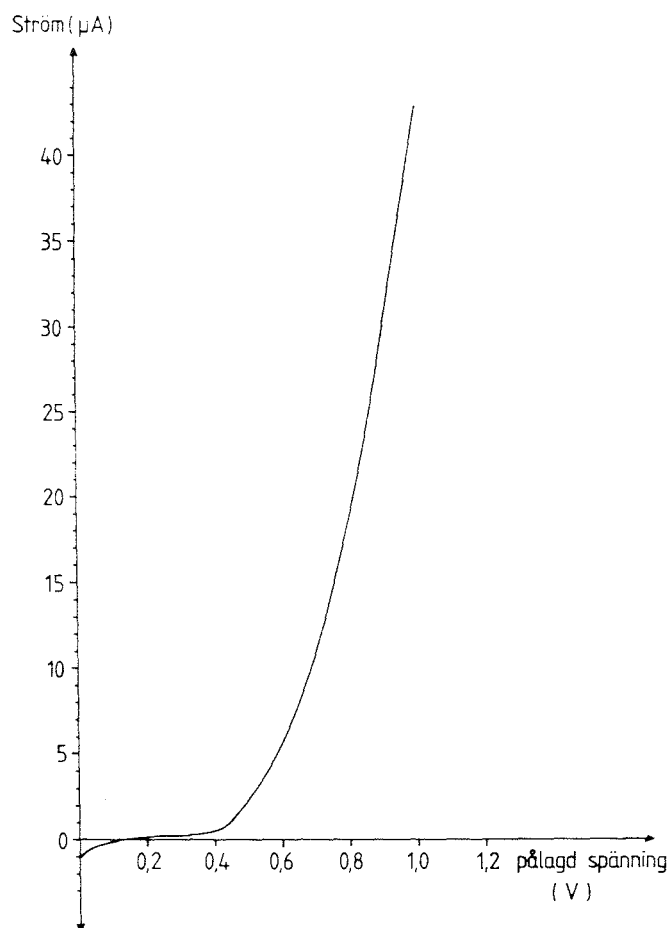


Diagram 2. Strömstyrkans beroende av pålagd, effektiv spänning i ett vattenmättat jordprov från Limsta.

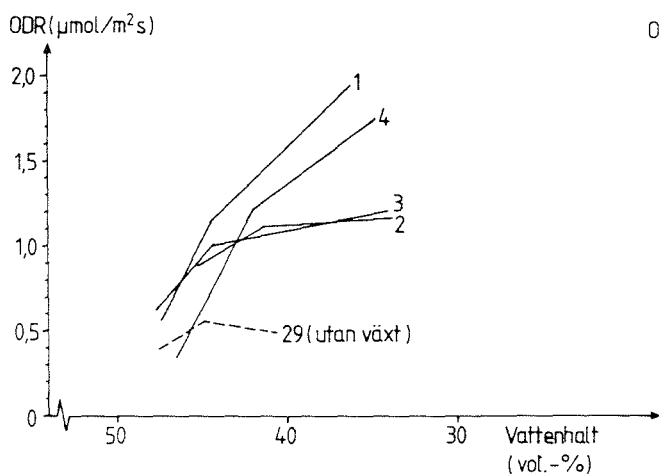


Diagram 3. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Ultuna med det initiala vattenavförande trycket 0.05 m vp. Prov 1 - 4 är bevuxna, prov 29 obevuxet.

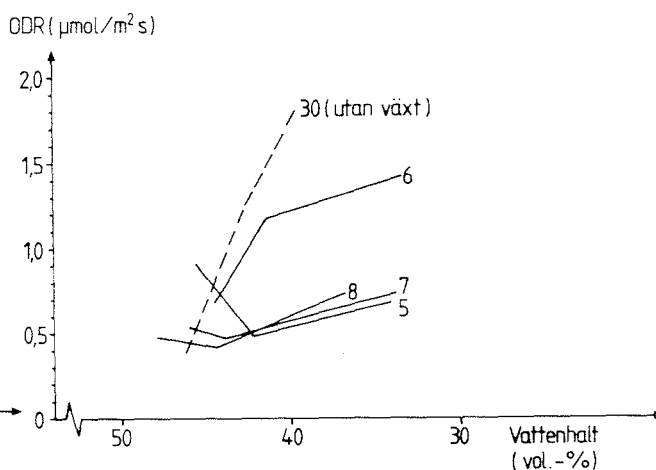


Diagram 4. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Ultuna med det initiala vattenavförande trycket 0.15 m vp. Prov 5 - 8 är bevuxna, prov 30 obevuxet.

UPPMÄTTA ODR-VÄRDEN I OBEVATTNADE PROVER

I bilaga 1 återfinns alla uppmätta strömstyrkor för de båda jordarna. Värdena kan variera avsevärt inom och mellan jordprover vid ett måttillfälle, och denna variation får betraktas som naturlig med tanke på jordens heterogenitet (Lemon & Erickson, 1952). Antagligen tyder ett avvikande, högt värde i ett vattenmättat prov på att platinaspetsen hamnat i en luftpor eller spricka samt ett avvikande, lågt värde på att spetsen hamnat inuti ett jordaggregat i ett i övrigt välluftat prov.

I diagram 3 - 11 visas syrehalsets beroende av cylindervattenhalten i de obevattnade proverna för respektive initialt vattenavförande tryck. Varje punkt motsvarar ett medelvärde av de fyra ODR-värden som uppmäts i ett prov. Den första punkten i varje kurva motsvarar medelvärdet dag 0, den andra medelvärdet dag 6 och den tredje medelvärdet dag 18. Som synes torkar proverna under försökets gång. Detta kan bero dels på att luftfuktigheten i klimatkammaren inte var tillräckligt hög och stabil för att vattenhalten i jordproverna skulle vara konstant, dels på att växterna förbrukade vatten i de besädda proverna. De flesta obesädda prover har en högre vattenhalt än de besädda dag 6 och 18, men även de obesädda proverna torkar under försökets gång.

Anmärkningsvärt är att cylindervattenhalten dag 0 i vissa fall är högre än den porositet (tabell 2) som räknats fram för det aktuella provet. Det förekommer särskilt ofta för Ultunaproverna. Detta kan eventuellt förklaras av att två olika metoder använts för beräkning av vattenhalt respektive porositet och / eller av att proverna svällt något under vattenmättnaden.

I de allra flesta prover ökar ODR som förväntat med minskande vattenhalt. Detta tyder på att en sammanhängande vattenfilm bildas runt platinaytan och att den reducerande förmågan är god även sedan proverna torkat dag 18. Som tidigare nämnts har man anledning misstänka att för höga strömstyrkor uppmäts i de vattenmättade proverna när den effektiva spänningen -0.65 V läggs över platinaelektroden. Detta gäller dock inte för luftade prover med de pH-värden det här är frågan om (Armstrong, 1967). Eftersom proverna, efter att ha varit i det närmaste vattenmättade dag 0, torkar under försökets gång, kan man anta att skillnaderna i ODR mellan olika måttillfällen är större än vad diagrammen visar.

Vid varje måttillfälle har Limstaproverna i allmänhet högre ODR-värden än Ultunaproverna. Detta kan bero på att Limstajorden har något högre porositet (tabell 2) och att graden av vattenmättnad i Limstaproverna är något lägre än i Ultunaproverna.

I de packade proverna (diagram 5 - 6 och 9 - 10) erhålls ofta lägre värden på ODR än i motsvarande opackade prover, vilket stämmer väl överens med de resultat som Stepniewski (1980) fick i sina packningsförsök. Antagligen bidrar den lägre porositeten i de packade proverna till att syrehalterna och därmed också ODR-värdena blir låga. I tabell 3 visas den statistiska säkerheten för att de packade proverna ger lägre ODR-värden än motsvarande opackade prover. Den statistiska säkerheten för detta förhållande är störst för Limstaproverna. Detta kan bero på att Limstaproverna har högre porositet och därför trycks ihop mer vid packning än Ultunaproverna. Man bör dock observera att underlaget för denna statistiska beräkning inte är stort.

Diagram 5. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Ultuna med det initiala vattenavförande trycket 0.50 m vp. Prov 9 - 12 är bevuxna, prov 31 obevuxet och prov 33 packat.

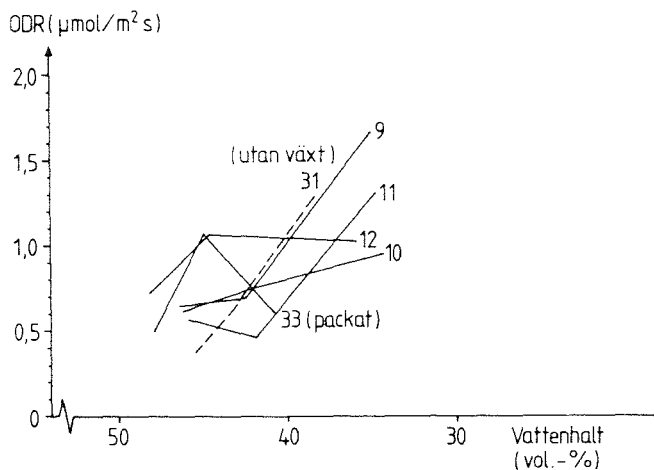


Diagram 6. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Ultuna med det initiala vattenavförande trycket 1.00 m vp. Prov 13 - 16 är bevuxna, prov 32 obevuxet och prov 34 packat.

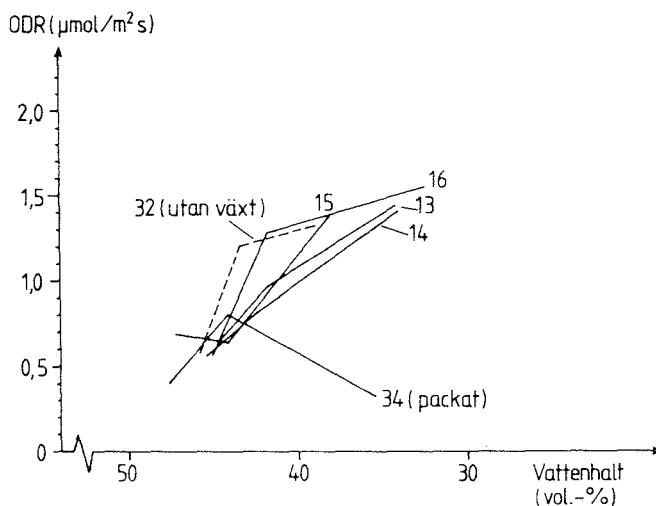


Diagram 7. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 0.05 m vp. Prov 1 - 4 är bevuxna, prov 34 obevuxet.

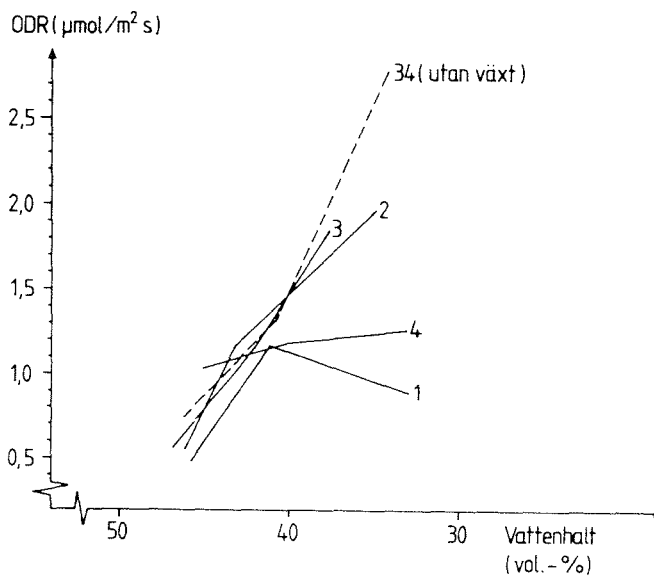


Diagram 8. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 0.15 m vp. Prov 5 - 7 är bevuxna, prov 35 obevuxet.

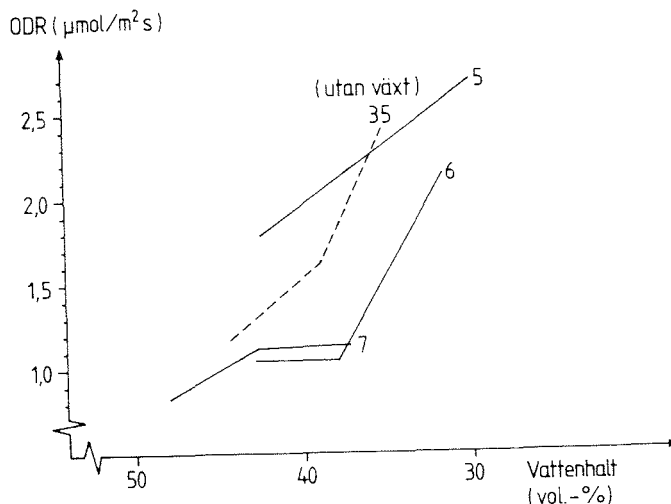


Diagram 9. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 0.50 m vp. Prov 8 - 11 är bevuxna, prov 36 obevuxet och prov 39 packat.

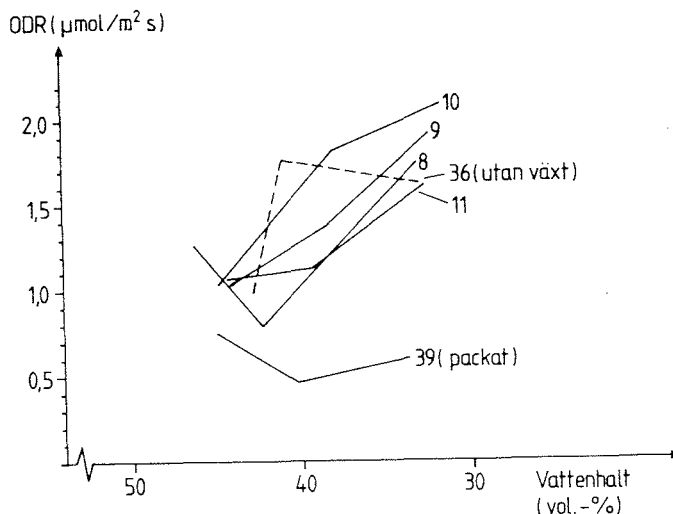


Diagram 10. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 1.00 m vp. Prov 12 - 15 är bevuxna, prov 37 obevuxet och prov 40 packat.

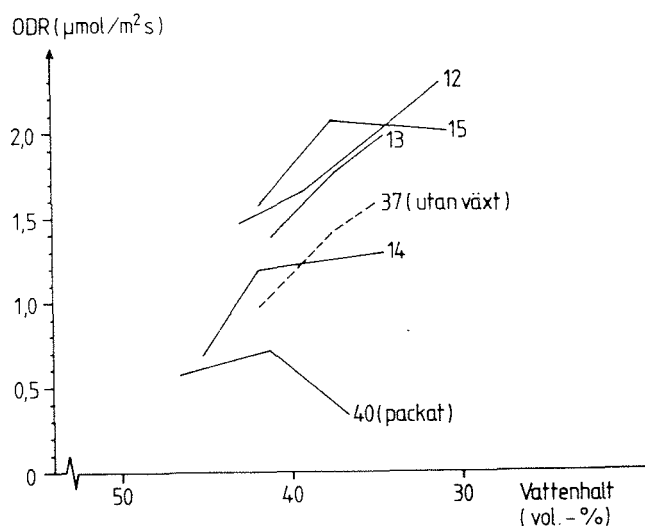


Diagram 11. ODR som funktion av vattenhalten i jordprover från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 2.00 m vp. Prov 16 - 18 är bevuxna, prov 38 obevuxet.

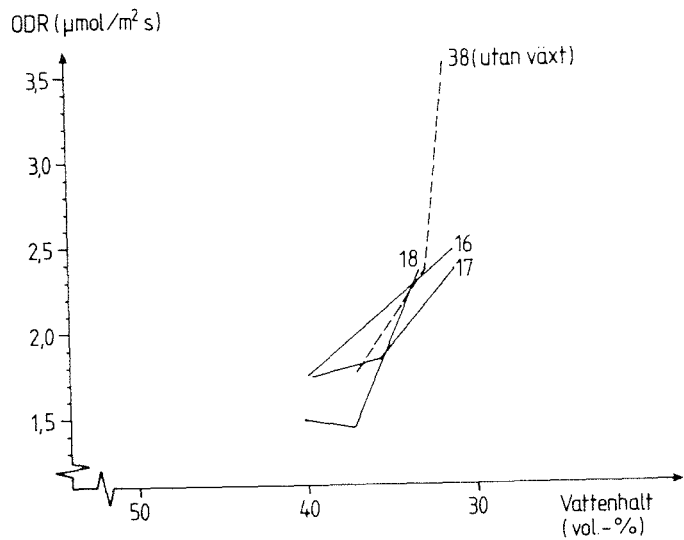


Diagram 12. ODR som funktion av vattenhalten för de obevattnade Ultunaproverna med angivna initiala vattenavförande tryck.

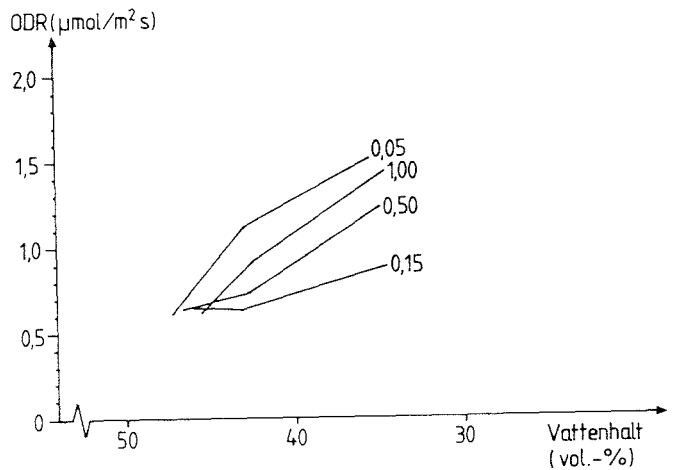
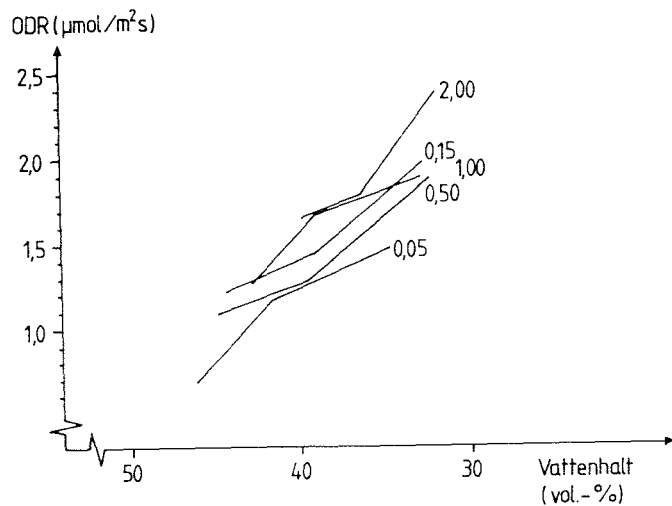


Diagram 13. ODR som funktion av vattenhalten för de obevattnade Limstaproverna med angivna initiala vattenavförande tryck.



Tabell 3. Den statistiska säkerheten för att packade prover ger lägre ODR-medelvärden ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) än opackade prover vid angivet mättillfälle och initialt vattenavförande tryck (IVT i m vp) utgående från en signifikansnivå av 5 procent, där * anger 95 procent säkerhet; ** 99 procent säkerhet och *** 99.9 procent säkerhet

<u>ULTUNA</u>				
	IVT	Dag 0	Dag 6	Dag 18
opackat	0.50	0.64	0.61	1.24
packat	"	0.50	1.05	0.60
opackat	1.00	0.62	0.92	1.44
packat	"	0.40	0.80	0.32***
<u>LIMSTA</u>				
	IVT	Dag 0	Dag 6	Dag 18
opackat	0.50	1.09	1.28	1.89
packat	"	0.75	0.46**	0.60**
opackat	1.00	1.28	1.67	1.89
packat	"	0.57*	0.71*	0.33***

Tabell 4. Den statistiska säkerheten för förändringen i ODR-medelvärdena ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) under de angivna tidsperioderna för respektive initialt vattenavförande tryck (IVT i m vp) utgående från en signifikansnivå av 5 procent, där * anger 95 procent säkerhet, ** 99 procent säkerhet samt *** 99.9 procent säkerhet

<u>ULTUNA</u>			
IVT	Dag 0-6	Dag 6-18	Dag 0-18
0.05	0.54-1.12**	1.12-1.67*	0.54-1.67***
0.15	0.60-0.57	0.57-0.89	0.60-0.89
0.50	0.64-0.61	0.61-1.24*	0.64-1.24***
1.00	0.62-0.92*	0.92-1.44**	0.62-1.44***
<u>LIMSTA</u>			
IVT	Dag 0-6	Dag 6-18	Dag 0-18
0.05	0.68-1.17***	1.17-1.47	0.68-1.47***
0.15	1.22-1.44	1.44-1.98	1.22-1.98**
0.50	1.09-1.28	1.28-1.89*	1.09-1.89**
1.00	1.28-1.67	1.67-1.89	1.28-1.89**
2.00	1.65-1.78	1.78-2.39*	1.65-2.39**

I diagram 12 - 13 visas medelvärden för vattenhalter och ODR för varje initialt vattenavförande tryck. Inga större skillnader i vattenhalter uppträder mellan prover med olika initialt vattenavförande tryck i någon av jordarna. Det är först vid ett vattenavförande tryck av 2 m vp (Limsta) som en märkbar sänkning av vattenhalten uppträder. Den statistiska signifikansen för förändringen i ODR-medelvärdena under försökets gång redovisas i tabell 4. Om man ser till hela perioden (dag 0 - 18) sker en ökning av ODR med minskande vattenhalt i alla prover med en säkerhet som endast i ett fall (Ultuna, avsugning 0.15 m vp) understiger 99 procent. Detta tyder på ett starkt samband mellan ODR och vattenhalt för de jordar och vattenhalter som är aktuella här.

UPPMÄTTA ODR-VÄRDEN I BEVATTNADE PROVER

I diagram 14 - 20 visas syreflödet som funktion av tiden i de bevattnade proverna för respektive initialt vattenavförande tryck. Varje punkt motsvarar ett medelvärde av de fyra ODR-värden som uppmätts i ett prov. I tabell 5 redovisas cylindervattenhalten vid varje mättillfälle. Som synes sker i de flesta fall en markant sänkning av uppmätt ODR strax efter bevattningen, vilket var förväntat. Vattenhalten dag 8 är i många fall högre än dag 0. I Ultunaproverna är vattenhalten dag 8 till och med genomgående högre än beräknad porositet. Detta tyder på att proverna är fullständigt vattenmättade dag 8, åtminstone vad gäller Ultuna. Förändringen i ODR-medelvärdet mellan dag 6 och dag 8 har streckats i diagrammen eftersom ODR p.g.a. upptorkning troligen ökar något ytterligare mellan dag 6 och 7 innan bevattningen sker. Dag 18 har proverna återigen torkat och ODR-värdena är då ungefär lika höga som för motsvarande obevattnade prover dag 18 (diagram 3 - 11).

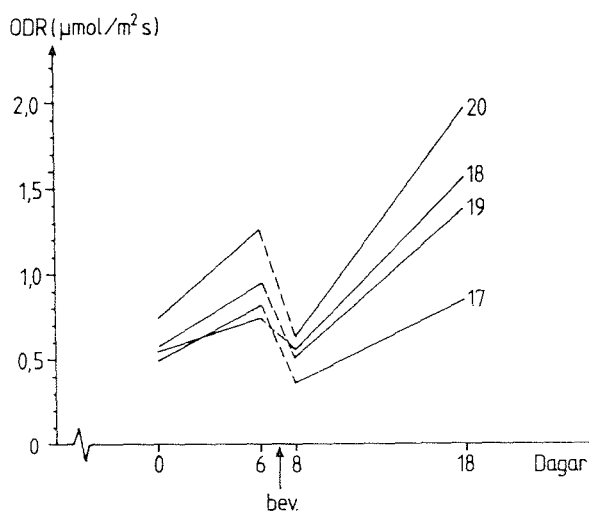


Diagram 14. ODR som funktion av tiden i bevattnade jordprover (17 - 20) från Ultuna med det initiala vattenavförande trycket 0.15 m vp. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.

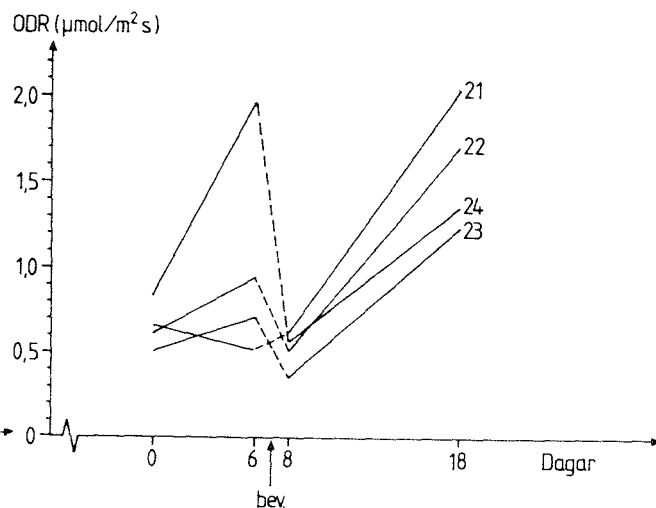


Diagram 15. ODR som funktion av tiden i bevattnade jordprover (21 - 24) från Ultuna med det initiala vattenavförande trycket 0.50 m vp. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.

Diagram 16. ODR som funktion av tiden i bevattnade jordprover (25 - 28) från Ultuna med det initiala vattenavförande trycket 1.00 m vp. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.

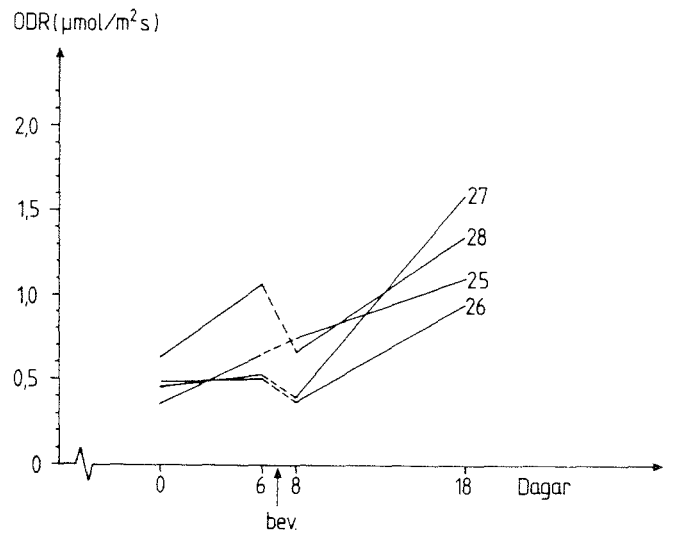


Diagram 17. ODR som funktion av tiden i bevattnade jordprover (19 - 22) från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 0.15 m vp. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.

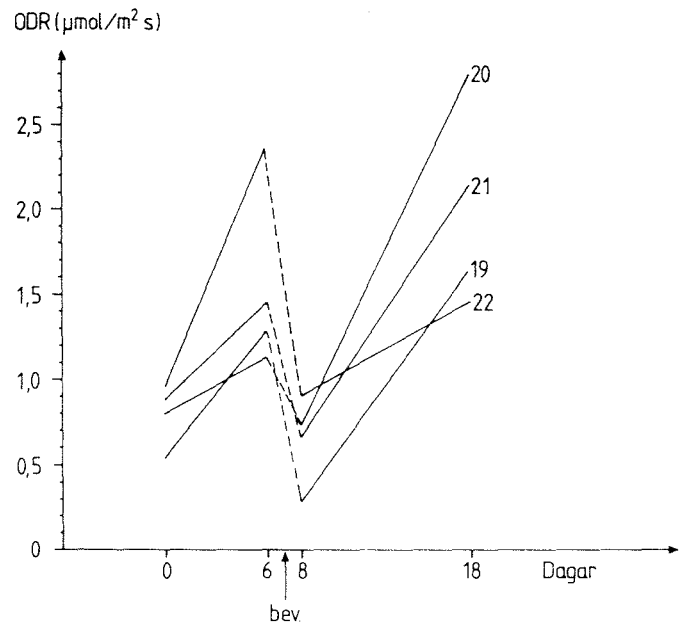


Diagram 18. ODR som funktion av tiden i bevattnade jordprover (23 - 26) från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 0.50 m vp. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.

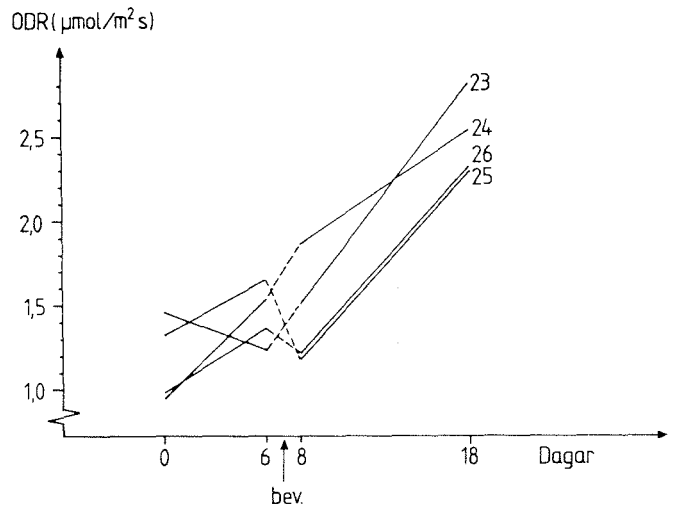


Diagram 19. ODR som funktion av tiden i bevattnade jordprover (27 - 30) från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 1.00 m vp. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.

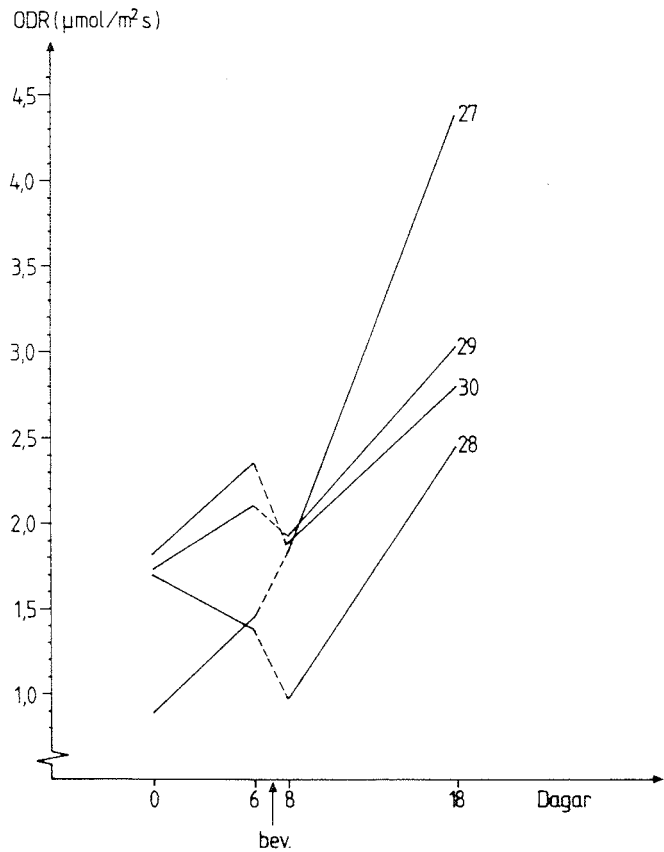
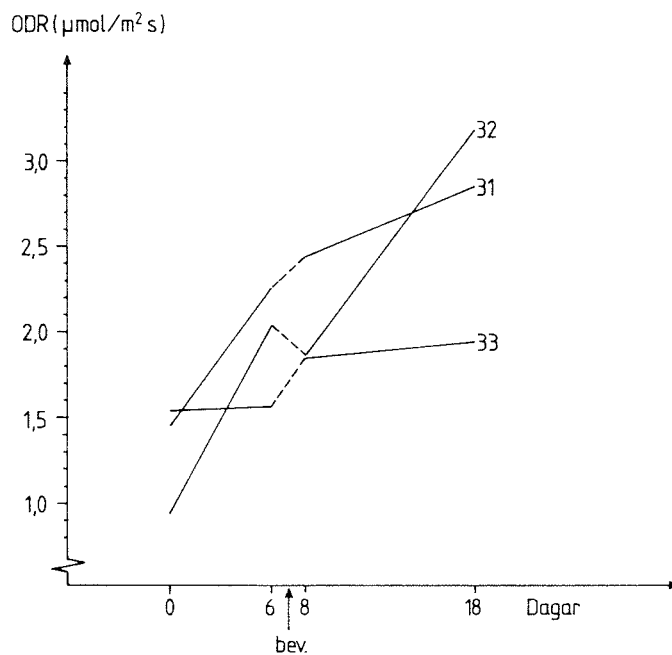


Diagram 20. ODR som funktion av tiden i bevattnade jordprover (31 - 33) från Limsta med det initiala vattenavförande trycket 2.00 m vp. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.



Tabell 5. Vattenhalter (volymprocent) vid de olika provtagnings-tillfällena i de bevattnade proverna med olika initialt vattenavförande tryck (IVT i m vp) från Ultuna och Limsta, där bevattningen skedde dag 7

	IVT	Prov nr	Dag 0	Dag 6	Dag 8	Dag 18
ULTUNA	0.15	17	44.2	40.9	47.3	37.1
		18	45.0	41.3	47.2	34.2
		19	45.1	41.5	51.9	37.7
		20	42.4	39.3	46.3	32.5
	0.50	21	45.1	41.9	47.9	36.0
		22	43.3	39.6	46.6	36.5
		23	45.1	42.0	48.1	34.8
		24	46.4	43.1	52.3	40.3
	1.00	25	43.1	39.7	47.6	39.2
		26	46.1	43.0	49.8	37.7
		27	45.0	41.6	47.7	35.6
		28	43.8	40.3	47.8	34.0
LIMSTA	0.15	19	45.4	42.4	46.1	33.3
		20	43.9	41.3	45.7	32.1
		21	44.6	41.0	44.5	32.2
		22	43.6	39.6	43.7	32.5
		23	43.3	39.5	43.1	33.0
	0.50	24	41.0	38.3	41.0	29.6
		25	44.2	39.8	43.2	31.0
		26	43.4	40.1	42.7	31.1
		27	42.1	36.8	41.7	30.0
		28	42.1	36.9	41.4	30.7
	1.00	29	42.3	36.4	41.3	30.1
		30	41.1	36.4	41.9	30.5
		31	39.4	34.7	42.5	31.2
	2.00	32	40.8	35.2	40.0	30.3
		33	38.2	34.0	39.0	28.5

I diagram 21 - 22 visas medelvärden för ODR vid varje måttillfälle för respektive initialt vattenavförande tryck i de båda jordarna. Den statistiska säkerheten för förändringen i ODR-medelvärdena under försökets gång redovisas i tabell 6. I tre fall sker en statistiskt säker minskning av ODR-medelvärdet som följd av bevattning. Man kan notera att den uppgång i ODR-värdet som uppträder mellan dag 6 och 8 för Limsta, avsugning 2 m vp, inte är statistiskt säkerställd. Kanske hade sänkningen av vattenhalten blivit mer signifikant om man bevattnat proverna vid ett senare tillfälle när jorden hunnit torka upp ytterligare. Man bör också observera att de uppmätta ODR-värdena dag 8 troligen är för höga p.g.a. att, som redan tidigare påpekats, H⁺-joner reduceras vid platinaytan när proverna är vattenmättade.

Spridningen i materialet är betydligt större för Limsta. Dessutom är ODR-värdena för Limsta oftast högre än för Ultuna vid samma måttillfälle. Detta kan förklaras av att Limstaproverna har högre porositet (tabell 2) samt något lägre vattenhalter (tabell 5) vid de olika måttillfällena.

Tabell 6. Statistisk säkerhet för förändringen i ODR-medelvärdena ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) under de angivna tidsperioderna i bevattnade prover med olika initialt vattenavförande tryck (IVT i m vp) utgående från en signifikansnivå av 5 procent, där * anger 95 procent säkerhet, ** 99 procent säkerhet och *** 99.9 procent säkerhet

ULTUNA

IVT	Dag 0-6	Dag 6-8	Dag 8-18	Dag 0-18
0.15	0.56-0.94**	0.94-0.52**	0.52-1.44***	0.56-1.44***
0.50	0.65-0.94	0.94-0.52**	0.52-1.59***	0.65-1.59***
1.00	0.49-0.68*	0.68-0.54	0.54-1.24***	0.49-1.24***

LIMSTA

IVT	Dag 0-6	Dag 6-8	Dag 8-18	Dag 0-18
0.15	0.81-1.57***	1.57-0.64***	0.64-2.02***	0.81-2.02***
0.50	1.17-1.45	1.45-1.44	1.44-2.48***	1.17-2.48***
1.00	1.53-1.83	1.83-1.66	1.66-3.18***	1.53-3.18***
2.00	1.31-1.95**	1.95-2.05	2.05-2.66	1.31-2.66***

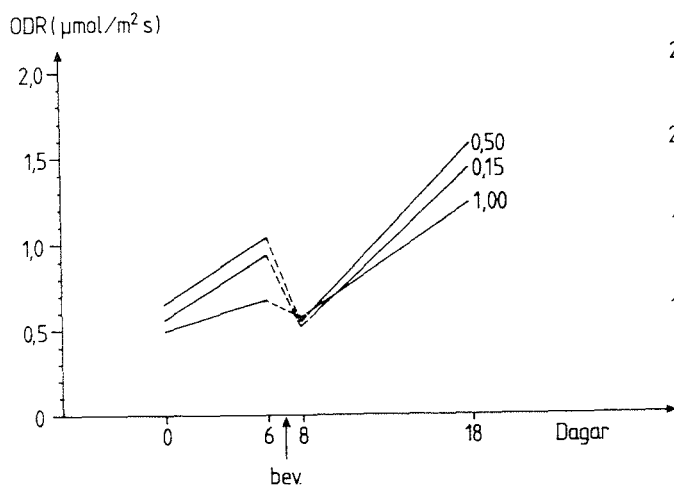


Diagram 21. ODR som funktion av tiden för de bevattnade Ultuna-proverna med angivna initiala vattenavförande tryck. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.

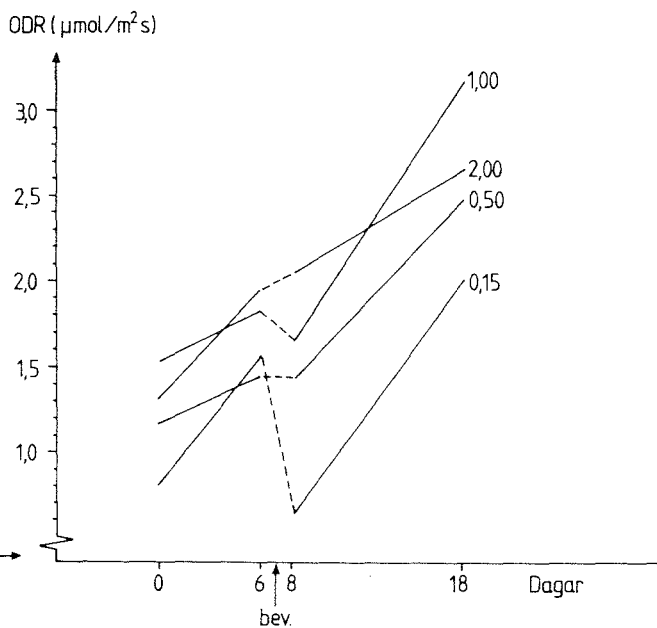


Diagram 22. ODR som funktion av tiden för de bevattnade Limsta-proverna med angivna initiala vattenavförande tryck. Bevattning skedde dag 7 vilket markerats på x-axeln.

SAMBANDET MELLAN REDOXPOTENTIAL OCH ODR

Sambandet mellan redoxpotential och ODR visas i diagram 23 - 24. För varje punkt har ett värde på redoxpotential och ett på ODR registrerats utan att platinaelektroden flyttats mellan mätningarna. Man kan anta att elektrodens omgivning varit mer vattenmättad ju längre till vänster i diagrammet som punkten befinner sig. Spridningen i materialet är stor, men tendensen är ändå att ODR ökar med ökande värden på redoxpotential, vilket var förväntat. Graden av vattenmättnad är i de flesta prover hög dag 0 (diagram 3 - 11, tabell 5) varför redoxpotentialen antar relativt låga värden.

Redoxpotentialen är mellan 0.1 och 0.5 V i de båda jordarna men verkar inte stiga mycket över 0.5 V även om ODR antar höga värden. En förklaring till detta skulle kunna vara att redoxpotentialen mäts över ett relativt stort område, dvs. mellan katod och anod, medan ODR-värdet endast avspeglar de syreförhållanden som råder i platinaelektrodens omedelbara närhet. ODR kan därmed anta relativt höga värden om elektroden hamnar i en luftpor i ett i övrigt vattenmättat jordprov. Uppmätt redoxpotential visar troligen ett medelvärde av luftförhållandena i hela provet och blir därför inte mycket högre än 0.5 V i dessa vattenmättade prover.

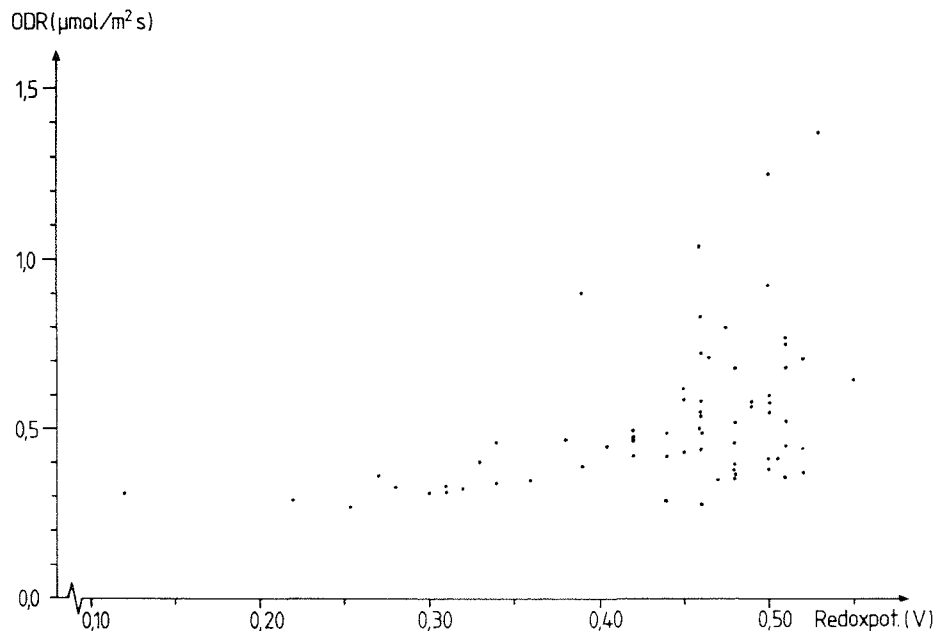


Diagram 23. ODR som funktion av redoxpotential dag 0 i Ultunaproverna. Varje punkt motsvarar en placering av platinaelektroden i jordprovet.

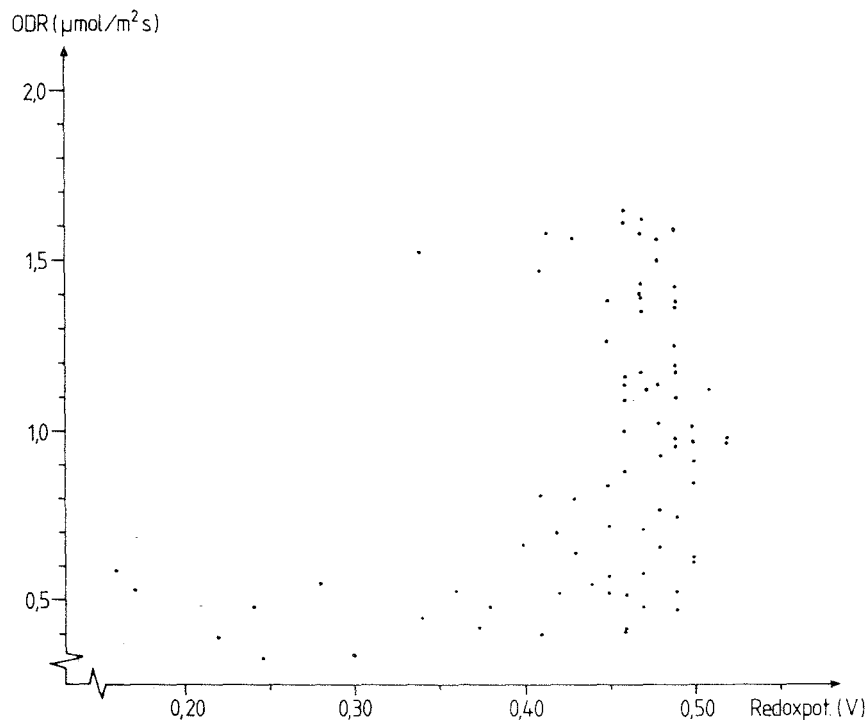


Diagram 24. ODR som funktion av redoxpotential dag 0 i Limstaproverna. Varje punkt motsvarar en placering av platinaelektroden i jordprovet.

PLANTUTVECKLING OCH KRITISKT ODR-VÄRDE

Uppkomsten skedde samtidigt i alla prover som ingick i försöket utom i de packade proverna där uppkomsten var försenad med ca ett dygn. I det packade provet från Ultuna med det initiala vattenavförande trycket 1 m vp grodde inget av de sådda rapsfröna.

I diagram 25 - 26 finns bladareorna dag 23 för Ultuna och dag 19 för Limsta representerade i form av staplar. Man ser inga signifikanta skillnader mellan bladareorna för olika initiala vattenavförande tryck hos jordproverna. Eventuellt är areorna något större i de bevattnade proverna. I de packade proverna har plantorna däremot utvecklats betydligt sämre och areorna är där ca hälften av vad de är i opackade prover.

Rötterna hade ofta sökt sig till utsidan av jordprovet. Detta kan antagligen förklaras av att motståndet mot rötternas framträngande var som minst utefter stälcyklinderns innervägg. Antagligen blev mellanrummet mellan cylindervägg och jord större allteftersom proverna torkade. Rötterna i bevattnade prover befann sig på utsidan av jordprovet i lika stor utsträckning som i obevattnade prover.

Som tidigare nämnts anses ett kritiskt ODR-värde av $1.1 - 2.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ kunna tjäna som riktvärde för de flesta odlade grödor. De uppmätta ODR-värdena befann sig oftast i detta intervall (diagram 3 - 22). I många fall, särskilt i början av försöksperioden samt efter bevattning, uppmättes till och med ODR-värden som var lägre än $1.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Eftersom både uppkomst och tillväxt skedde normalt i alla opackade prover är det dock omöjligt att fastställa något kritiskt ODR-värde för dessa prover. En förklaring till varför tillväxten var god trots den höga graden av vattenmättnad och de låga ODR-värdena kan vara att rötterna till stor del befann sig i mellanrummet mellan jorden och stälcyklinderns vägg. Där var antagligen syretillgången i många fall betydligt bättre än inne i jordprovet.

Diagram 25. Rapsplantornas bladareor dag 23 i Ultunaproverna. För varje initialt vatten- avförande tryck (IVT) har två plantor ritats av.

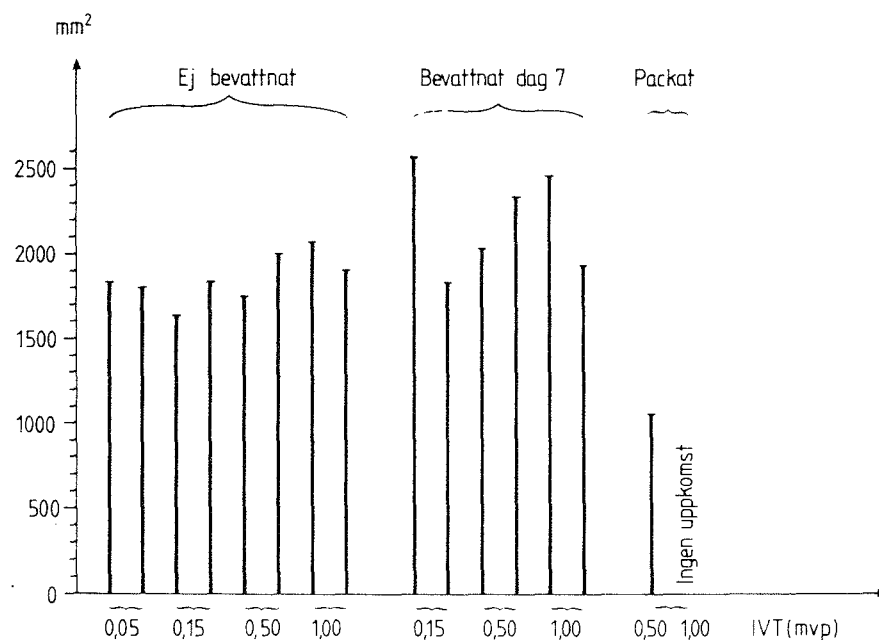
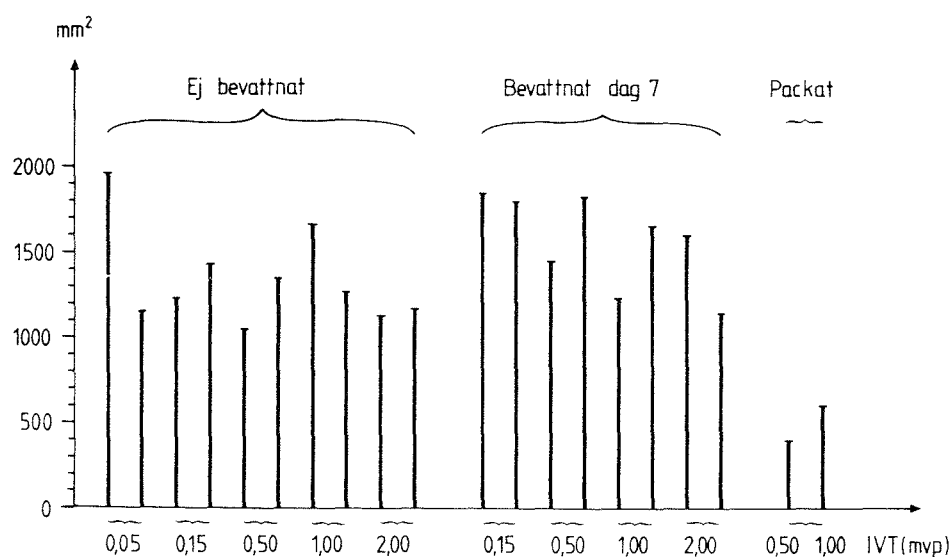


Diagram 26. Rapsplantornas bladareor dag 19 i Limstaproverna. För varje initialt vatten- avförande tryck (IVT) har två plantor ritats av.



SLUTSATSER

- Uppmätta ODR-värden kunde variera avsevärt inom och mellan jordprover vid ett måttillfälle. Denna variation får betraktas som naturlig med tanke på jordens heterogenitet.
- ODR-värdena ökade när vattenhalterna i proverna minskade. Den statistiska säkerheten för detta förhållande var ofta mycket hög.
- Efter bevattning sjönk i allmänhet ODR-värdena kraftigt för att återigen stiga när proverna torkade.
- I de packade proverna erhöles ofta lägre värden på ODR än i motsvarande opackade prover. Underlaget för dessa resultat var dock relativt litet. Uppkomst och tillväxt hos rapsen hämmades kraftigt i de packade proverna.
- I många fall uppmättes ODR-värden som var betydligt lägre än det riktvärde som anses som kritiskt för de flesta odlade grödor, $1.1 - 2.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Trots detta skedde ingen synbar hämning av uppkomst och tillväxt hos rapsen i de opackade proverna. Det var därför inte möjligt att fastställa något kritiskt ODR-värde i dessa prover.
- En förklaring till varför tillväxten hos plantorna var god trots de låga ODR-värdena kan vara att rötterna till stor del befann sig i mellanrummet mellan jorden och stälcyklinderns innervägg, där syretillgången antagligen var bättre än inne i jordprovet.
- ODR hade en tendens att öka med ökande värden på redoxpotential i jordproverna. Uppmätt redoxpotential visade troligen ett medelvärde av luftförhållandena i hela området mellan katod och anod medan ODR-värdet endast avspeglade de syreförhållanden som rådde i platinaelektrodens omedelbara närhet.
- Med utgångspunkt från de uppnådda försöksresultaten kan sägas att ODR-metoden lämpar sig väl som komplement till andra idag tillgängliga metoder för bestämning av syreförhållandena i jord. Vill man fastställa ett kritiskt ODR-värde för tillväxt hos en gröda bör man förslagsvis göra mätningarna i prover med större volym än de i försöket använda cylindrarna. Om sådana cylindrar ändå används bör jordproven förseglas med något tätt material så att rötterna inte kan söka sig ut till mellanrummet mellan jord och cylindervägg.

SUMMARY

OXYGEN DIFFUSION RATE AND REDOXPOTENTIAL AT DIFFERENT MOISTURE TENSIONS IN HEAVY CLAY SOILS

The purpose of this greenhouse investigation was to test a multichannel oxygen flux meter (Fig. 7) which was first designed by Armstrong & Wright (1976). The aim was to determine values of oxygen diffusion rate (ODR) critical for the growth of summer rape in two different clay soils from the middle part of Sweden (Table 1). A further aim was to study the effects of irrigation and soil compaction on ODR and to measure redoxpotential in the two soils.

Undisturbed soil samples were extracted from the soil surface in steel cylinders with a height of 10 cm and a diameter of 7.2 cm. Different soil water suctions were applied to the samples and summer rape was sown on a number of cylinders.

ODR was measured with a bare platinum electrode which was forced into the soil to a depth of 1.5 cm. A reference silver electrode was also lightly but firmly pressed into the soil. The leads from the two electrodes were connected to the oxygen flux meter which maintained an effective voltage of 0.65 V across the electrodes. An electric current resulted from the reduction of oxygen at the platinum surface and was assumed to be proportional to ODR in the surrounding soil solution (Lemon & Erickson, 1952). The current was allowed to flow for 4 minutes before a reading was taken. In an initial experiment (Fig. 9) it was concluded that the steel cylinder would have no measurable disturbing effect on the current. The same pair of electrodes was used to register the redoxpotential of the soil sample, but in this measurement no voltage was applied to the system.

ODR values greatly varied within as well as between soil samples, probably due to the heterogeneity of soil (Lemon & Erickson, 1952). Despite this, the statistical significance of an increase in ODR values with a decrease in water content was high for most samples studied (Tables 4 and 6). In general, low ODR values were obtained as a result of irrigation (Diagrams 14 - 20) and soil compaction (Diagrams 5 - 6 and 9 - 10). There was a tendency for ODR to increase with increase in redoxpotential (Diagrams 23 - 24).

Despite the low ODR values often obtained (less than $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) the growth of rape was normal in all noncompacted samples (Diagrams 25 - 26). This was probably due to the high percentage of roots growing on the outer surface of the sample next to the cylinder wall, where the oxygen supply was assumed to be more adequate than inside the soil sample. Because of this, it was not possible to determine a critical ODR value for the growth of summer rape in these samples.

Regarding the results obtained from this investigation, it can be concluded that the ODR method is a good indicator of soil aeration status and a complement to other existing methods of measuring soil aeration.

LITTERATURFÖRTECKNING

- Armstrong, W. 1967. The relationship between oxidation-reduction potentials and oxygen diffusion levels in some waterlogged organic soils. *J. Soil Sci.* 18, s. 27-34.
- Armstrong, W. & Wright, E.J. 1976. A polarographic assembly for multiple sampling of oxygen flux in the field. *J. Appl. Ecol.* 13, s. 849-856.
- Blackwell, P.S. 1983. Measurements of aeration in waterlogged soils: some improvements of techniques and their application to experiments using lysimeters. *J. Soil Sci.* 34, s. 271-285.
- Brady, N.C. 1984. The nature and properties of soils, 9:e uppl., 750 s. New York.
- Danfors, E. 1962. Elektrometriska syrebestämningsmetoders anpassning för mätning i jord-vatten samt mätningarnas betydelse ur kulturteknisk synpunkt. *Grundförbättring* 15:3, s. 137-149.
- Gawlik, J. 1980. An attempt to determine the upper critical moisture limit of some hydrogenic soils on the basis of the ODR index under laboratory conditions. *Polish J. Soil Sci.* 13, s. 99-107.
- Glinski, J. & Stepniewski, W. 1983. Soil aeration and its role for plants, 229 s. Boca Raton, Florida.
- Grable, A.R. & Siemer, E.G. 1968. Effects of bulk density, aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32, s. 180-186.
- Greacen, E.L., Farrell, D.A. & Forrest, J.A. 1967. Measurement of density patterns in soil. *J. Agr. Engin. Res.* 12, s. 311-313.
- Hutchins, L.M. 1926. Studies on the oxygen-supplying power of the soil together with quantitative observations on the oxygen-supplying power requisite for seed germination. *Plant Physiol.* 1, s. 95-150.
- Kristensen, K.J. 1966. Factors affecting measurements of oxygen diffusion rate (ODR) with bare platinum microelectrodes. *Agron. J.* 58, s. 351-354.
- Lemon, E.R. & Erickson, A.E. 1952. The measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum microelectrode. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 16, s. 160-163.
- Lemon, E.R. & Erickson, A.E. 1955. Principle of the platinum micro-electrode as a method of characterizing soil aeration. *Soil Sci.* 79, s. 383-392.
- Letey, J. & Stolzy, L.H. 1964. Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum microelectrode. I. Theory and equipment. *Hilgardia* 35, s. 545-554.
- McIntyre, D.S. 1967. Physical factors affecting operation of the oxygen cathode in unsaturated porous media. *Soil Sci.* 103, s. 118-125.

- McIntyre, D.S. 1970. The platinum microelectrode method for soil aeration measurement. *Adv. Agron.* 22, s. 235-283.
- Odén, S. 1962. Principiella problem rörande syrediffusionselektroder och deras utformning. *Grundförbättring* 15:3, s. 150-178.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24, s. 29-96.
- Rankin, J.M. & Sumner, M.E. 1978. Oxygen flux measurement in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, s. 869-873.
- Scott, R.F. 1963. Principles of soil mechanics. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Stepniewski, W. 1977. The effect of irrigation and increased mineral fertilization on the aeration status of a cultivated soil. *Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych* 197, s. 203-220. Lublin, Polen.
- Stepniewski, W. 1979. The usefulness of the tip-point micro electrode in the measurement of ODR in soil. *Roczniki Gleboznawcze* 30, s. 15-23.
- Stepniewski, W. 1980. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. I. ODR. *Pol. J. Soil Sci.* 13, s. 3-13.
- Will, F.G. 1963. Electrochemical oxidation of hydrogen on partially immersed platinum electrodes. I. Experiments and interpretation. *J. Electrochem. Soc.* 110, s. 145-151.
- Wonnacott, T.H. & Wonnacott, R.J. 1984. Introductory statistics for business and economics, 3:e uppl. 746 s. New York.

Bilaga 1. Alla uppmätta strömstyrkor (μA) i jordproverna från Ultuna och Limsta, där IVT betecknar initialt vattenavförande tryck i m vp

OBEVATTNADE PROVER									
ULTUNA					LIMSTA				
IVT	Prov	Dag 0	Dag 6	Dag 18	IVT	Prov	Dag 0	Dag 6	Dag 18
0.05	1	2.9	5.1	18.3	0.05	1	4.2	10.3	3.9
		7.1	13.5	13.9			3.9	9.1	7.0
		2.6	12.1	16.8			3.9	7.2	4.7
	2	7.1	8.4	17.5		2	4.8	13.6	14.7
		7.2	13.3	8.1			5.2	9.7	19.3
		3.5	8.2	14.2			6.5	12.6	12.2
	3	3.9	9.9	2.9		3	4.8	13.5	14.2
		15.9	7.0	14.8			4.5	4.3	17.5
		2.7	10.7	17.2			5.5	5.3	9.7
	4	2.6	9.9	2.2		4	4.0	14.2	19.2
		7.5	5.1	13.9			5.9	7.3	15.4
		9.0	8.7	8.1			4.3	12.7	18.9
0.15	1	3.6	16.3	17.6	0.15	1	11.0	9.3	14.9
		3.1	4.3	16.7			11.4	10.2	9.7
		3.5	10.1	10.3			9.8	9.7	11.0
	2	2.1	11.1	15.5		2	3.1	11.3	7.7
		5.3	4.9	2.0			16.2	19.1	22.9
		13.7	3.9	9.8			13.8	22.8	23.2
	3	5.7	5.1	6.6		3	14.4	15.0	24.3
		6.5	3.0	4.9			16.3	17.0	21.1
		5.8	16.6	11.2			9.1	10.3	27.9
	4	7.1	11.2	14.5		4	9.7	3.1	11.9
		5.1	4.3	18.8			9.8	4.6	17.3
		5.8	8.3	3.8			7.5	17.9	15.7
0.50	1	3.3	3.2	12.5	0.50	1	3.3	8.0	12.2
		4.1	2.8	6.0			11.0	16.4	13.8
		7.7	2.7	2.6			5.5	10.2	7.8
	2	3.2	7.3	4.1		2	8.1	3.2	5.2
		5.2	3.5	4.0			9.7	12.7	9.9
		2.5	3.1	2.4			4.2	4.8	8.4
	3	3.9	3.4	6.4		3	14.4	5.7	19.4
		4.7	4.3	12.5			14.9	4.1	22.5
		6.2	4.6	16.6			5.2	13.2	5.6
	4	5.8	2.9	16.8		4	10.3	10.1	10.4
		5.3	10.8	16.1			4.0	12.6	26.9
		4.7	5.4	7.8			15.8	10.9	22.3
1.00	1	3.6	8.7	8.0	1.00	1	4.8	11.6	13.3
		9.3	5.1	4.5			9.8	17.7	21.7
		3.9	7.6	5.8			9.0	16.8	20.5
	2	3.9	3.1	14.7		2	11.7	16.4	23.3
		7.5	3.8	9.2			7.5	4.5	3.9
		4.8	2.9	7.5			13.6	14.0	13.4
	3	3.7	5.9	7.7		3	6.8	7.9	17.0
		4.0	3.0	20.0			7.5	11.7	20.8
		4.2	5.4	6.9			16.1	19.0	19.7
	4	4.3	4.9	10.3		4	15.8	24.1	21.1
		11.7	22.0	9.5			5.9	2.4	22.2
		4.8	4.0	8.2			12.4	10.9	15.6

2	5.4	4.3	4.2	2	11.6	11.8	16.0			
	4.4	9.9	14.7		8.1	14.1	14.9			
	4.7	9.0	14.6		13.2	21.3	20.1			
	5.4	4.3	14.6		14.6	13.8	16.7			
3	4.6	9.2	7.8	3	7.2	11.8	13.6			
	6.0	3.3	11.2		6.3	7.8	10.8			
	4.8	4.7	16.5		5.7	17.2	15.1			
	7.8	4.8	12.3		4.6	4.1	4.6			
4	3.2	4.8	16.7	4	14.6	13.2	17.0			
	4.5	13.2	6.4		10.2	14.5	16.6			
	6.3	9.6	13.4		13.7	22.6	13.5			
	5.7	16.1	16.4		15.2	20.5	21.2			
2.00	1	15.8	20.4	9.2	1	15.8	20.4	9.2		
		15.6	16.3	19.6		15.6	16.3	19.6		
		11.5	16.1	23.5		11.5	16.1	23.5		
		16.6	17.1	32.2		16.6	17.1	32.2		
		2	21.3	9.5		23.4	2	21.3	9.5	23.4
			6.6	15.6		18.3		6.6	15.6	18.3
			5.7	17.4		23.7		5.7	17.4	23.7
		3	25.4	20.2		15.3	3	25.4	20.2	15.3
			11.3	15.1		22.7		11.3	15.1	22.7
			14.3	12.9		17.5		14.3	12.9	17.5
			12.7	10.1		21.8		12.7	10.1	21.8
			12.7	11.2		18.4		12.7	11.2	18.4

BEVATTNADE PROVER

		ULTUNA, DAG:						LIMSTA, DAG:			
IVT	Prov	0	6	8	18	IVT	Prov	0	6	8	18
0.15	1	5.5	9.0	3.5	5.9	0.15	1	3.4	5.8	3.0	14.2
		4.2	11.4	2.7	2.8			5.9	14.0	1.1	15.5
		4.1	4.1	3.5	5.0			5.8	15.8	3.1	17.7
		3.4	3.3	2.7	15.2			4.2	8.5	2.8	8.6
	2	4.9	8.6	5.3	10.9		2	10.0	7.2	2.8	22.6
		8.0	9.8	6.6	21.8			5.7	14.3	2.5	15.3
		2.7	3.5	3.4	14.7			6.5	13.8	12.0	34.7
		2.7	3.5	3.7	6.0			5.1	3.7	7.7	23.1
	3	6.8	12.6	5.5	8.6		3	4.8	16.3	3.5	10.3
		4.3	7.6	4.7	12.7			9.7	14.2	2.9	13.3
		3.5	9.1	4.2	17.7			5.3	8.3	4.5	18.3
		2.3	3.4	3.0	8.3			10.8	11.0	11.6	31.6
	4	8.3	16.3	4.7	16.4		4	11.9	14.6	3.3	3.3
		4.4	8.3	3.9	22.2			6.3	20.0	3.3	9.0
		3.5	7.0	4.9	20.4			3.9	22.9	16.3	17.0
		8.7	11.2	8.2	8.1			11.2	23.4	8.2	21.0
0.50	1	7.7	8.8	6.6	18.9	0.50	1	16.5	13.8	6.0	23.7
		3.7	3.0	5.3	22.3			10.9	6.5	13.6	22.9
		7.3	2.9	5.3	15.4			10.6	9.0	17.6	25.8
		3.8	3.0	3.9	13.3			11.6	12.9	14.2	23.6
	2	5.9	6.1	3.7	9.8		2	7.1	18.5	10.3	26.0
		5.5	9.3	4.9	24.2			11.4	3.2	24.9	25.8
		4.7	11.7	4.4	5.3			9.4	16.8	6.4	20.6
		4.8	5.3	4.4	19.0			4.2	14.3	22.1	14.4
	3	4.5	4.2	3.0	11.5		3	9.8	15.1	6.2	21.1
		4.0	5.6	3.3	2.8			11.8	12.0	7.3	25.7
		4.7	11.1	3.4	19.0			12.7	16.4	13.6	13.7
		4.6	3.6	3.1	9.3			10.9	12.7	13.2	17.8

	4	12.5	20.7	8.3	15.4		4	8.5	6.1	2.9	19.1
		4.1	12.9	2.9	18.8			8.4	8.8	6.9	24.7
		8.2	19.9	4.5	5.3			11.1	12.2	6.6	20.2
		3.9	13.7	3.9	7.5			5.0	19.5	24.5	14.8
1.00	1	3.7	9.0	5.6	3.2	1.00	1	5.3	14.0	21.2	18.2
		3.3	4.1	3.2	20.0			4.7	9.4	15.7	41.2
		2.9	5.1	9.4	10.6			9.1	12.0	14.0	46.2
		2.8	3.2	6.7	3.8			11.2	14.0	12.0	44.7
	2	5.8	5.9	3.3	8.2		2	13.5	16.7	5.7	20.1
		3.8	3.8	3.0	12.2			15.0	11.6	4.1	13.9
		3.3	4.6	3.3	6.3			11.1	11.4	10.3	25.2
		3.9	3.1	3.4	5.1			18.4	7.8	13.4	25.3
	3	3.6	7.0	3.4	17.8		3	12.5	18.8	13.8	22.6
		5.7	4.8	3.3	11.1			15.9	17.5	17.7	38.3
		3.4	2.9	3.3	16.9			13.1	18.0	24.9	17.8
		3.3	2.9	3.3	8.7			17.4	17.7	9.7	25.6
	4	5.6	7.9	4.1	17.8		4	8.8	21.7	18.3	21.9
		6.8	4.8	3.5	2.8			11.3	23.6	13.6	26.3
		4.1	11.6	7.5	12.9			23.5	19.3	16.6	20.8
		4.6	12.0	7.5	12.8			18.8	15.8	16.0	26.8
						2.00	1	4.2	21.4	17.9	20.7
								13.9	19.2	26.5	29.5
								13.7	19.0	27.8	20.3
								17.6	17.4	10.9	26.9
							2	13.8	12.1	18.3	24.4
								5.2	21.5	15.5	23.5
								9.0	19.6	14.4	23.7
								4.2	16.5	15.8	37.6
							3	12.6	19.6	19.3	19.8
								14.0	12.2	24.1	21.0
								13.0	14.3	15.9	22.1
								13.3	7.3	4.2	3.4

OBESADDA PROVER

ULTUNA					LIMSTA				
IVT	Prov	Dag 0	Dag 6	Dag 18	IVT	Prov	Dag 0	Dag 6	Dag 18
0.05	1	3.1	3.0	3.0	0.05	1	7.0	12.2	24.0
		4.7	3.0	5.5			7.4	3.2	38.9
		2.4	7.7	4.1			5.3	11.7	6.6
		2.9	5.5	4.1			5.4	17.6	25.6
0.15	2	3.4	13.4	17.6	0.15	2	11.7	13.8	12.9
		4.0	11.0	2.4			9.6	11.0	28.4
		2.9	9.2	19.2			8.1	12.3	20.6
		3.0	8.7	22.8			10.8	18.0	20.0
0.50	3	2.7	4.8	16.6	0.50	3	9.3	15.8	11.5
		3.7	4.6	12.4			6.4	12.7	18.8
		2.9	6.2	7.0			9.6	14.5	20.5
		3.6	5.5	8.1			8.6	16.8	4.6
1.00	4	4.9	4.2	11.4	1.00	4	4.5	17.5	2.6
		3.2	9.2	7.8			15.6	4.4	2.2
		3.3	12.2	13.1			4.8	10.1	43.8
		8.3	9.5	12.7			8.3	16.4	5.8
					2.00	5	14.7	13.0	28.7
							15.2	22.6	22.5
							9.3	25.4	30.6
							21.0	19.3	40.2

PACKADE PROVER

		ULTUNA			PACKADE PROVER					LIMSTA				
IVT	Prov	Dag 0	Dag 6	Dag 18	IVT	Prov	Dag 0	Dag 6	Dag 18	IVT	Prov	Dag 0	Dag 6	Dag 18
0.50	1	5.0	11.6	3.7	0.50	1	6.6	3.2	2.7	0.50	1	6.6	3.2	2.7
		5.0	5.6	5.2			7.7	3.5	2.8			7.7	3.5	2.8
		4.7	12.0	4.2			4.1	3.1	2.4			4.1	3.1	2.4
		2.6	7.0	7.4			7.1	6.0	12.6			7.1	6.0	12.6
1.00	2	2.9	7.8	3.0	1.00	2	4.0	9.1	3.0	1.00	2	4.0	9.1	3.0
		5.2	5.1	2.2			8.0	9.2	2.7			8.0	9.2	2.7
		10.4	9.5	3.0			3.8	1.8	3.3			3.8	1.8	3.3
		2.1	4.9	2.5			3.7	4.5	2.4			3.7	4.5	2.4

Förteckning över utgivna häften i publikationsserien

SVERIGES LANTBRUKSUNIVERSITET, UPPSALA. INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP. AVDELNINGEN FÖR LANTBRUKETS HYDROTEKNIK. AVDELNINGSMEDDELANDE.

- 81:1 Berglund, G., Eriksson, J., Berglund, K., Ingvarsson, A., Karlsson, I., Karlsson, S.-E.: Resultat av 1980 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 13 + 47 + 38 s.
- 82:1 Berglund, G., Eriksson, J., Berglund, K. & Karlsson, S.-E.: Resultat av 1981 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 80 s.
- 83:1 Berglund, G., Eriksson, J. & Karlsson, S.-E.: Resultat av 1982 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 82 s.
- 83:2 Bjerketorp, A.: Höjning av nivåerna vid lågvattenföringar i Forsmarksåns vattensystem uppströms Lövestabruk. 4: Vattenståndet i den centrala sjökedjan. 41 s.
- 84:1 Berglund, G., Eriksson, J., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L.: Resultat av 1983 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 103 s.
- 84:2 McAfee, M.: Assessing the effects of mole drainage on physical properties of a peat soil. Results from an experiment in mole drainage laid down in 1983. 23 s.
- 85:1 Linnér, H., Persson, R., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L.: Resultat av 1984 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 89 s.
- 85:2 Jernlås, R.: Transport av bekämpningsmedel efter markapplicering. Litteraturstudie och experiment. 33 s.
- 85:3 McAfee, M.: Ytsänkning på torvjord. Bälinge Mossar 1904-1984. 31 s.
- 85:4 Heimer, A.: Värmlands Säby: Bestånds- och rotutveckling efter yt-täckning och strukturkalkning på en slammingsbenägen, torkkänslig mellanlera. 55 s.
- 85:5 Aronsson, Y.: Markförsämring genom saltanrikning. 87 s.
- 85:6 Bjerketorp, A. & Josefsson, L.: Vattenföring genom cirkulära brotrummar. Beräkningssätt under olika hydrauliska betingelser. 16 s. Manuskript.
- 85:7 Armstrong, B.: Bevattning - en global översikt. 55 s.
- 86:1 Linnér, H., Persson, R., Berglund, K., Svensson, M., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L.: Resultat av 1985 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 85 s.
- 86:2 Bjerketorp, A. & Johnson, L.: Kalhuggningens och skogsdikningens inflytande på flödet i vattendragen. En kortfattad kunskapsöversikt. 15 s. Manuskript.
- 86:3 Johansson, W: Rapport över nordisk forskarkurs om markluft. 30 s.

- 87:1 Linnér, H., Persson, R., Berglund, K., Karlsson, S.-E. & Gustafsson, E.-L.: Resultat av 1986 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning. 100 s.
- 87:2 Ljung, G.: Mekanisk analys. Beskrivning av en rationell metod för jordartsbestämning. 13 s.
- 87:3 Benz, J. Underbevattning. Studier av grödans tillväxt och vattenförbrukning vid olika djup till grundvattenytan på en lerig grovmo. S. 1-15
Alinder, S. Avloppsvatten för underbevattning. Försök med biologiskt renat avloppsvatten till underbevattning. S. 16-24.
- 87:4 Olovsson, I. Tubulering - En metod att förbättra dräneringen på jordar med låg genomsläpplighet. 35 s.
- 87:5 Segerros, M. Inverkan av uppdämning på grundvattenstånd. En studie på Mästermyr. 67 s.
- 88:1 Linnér, H., Persson, R., Berglund, K. & Karlsson, S.-E.: Resultat av 1987 års fältförsök avseende täckdikning, övrig grundförbättring och bevattning
- 88:2 Nilsson, Å.: Syrediffusion och redoxpotential vid olika markvattenhalter i styv lera. 54 s.

Denna serie meddelanden utges av Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Serien innehåller sådana forsknings- och försöksredogörelser samt andra uppsatser som bedöms vara av i första hand internt intresse. Uppsatser lämpade för en mer allmän spridning publiceras bl a i avdelningens rapportserie. Tidigare nummer i meddelandeserien kan i mån av tillgång levereras från avdelningen.

This series of Communications is produced by the Division of Agricultural Hydretechnics, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. The series consists of reports on research and field trials and of other articles considered to be of interest mainly within the department. Articles of more general interest are published in, for example, the department's Report series. Earlier issues in the Communications series can be obtained from the Division of Agricultural Hydrotechnics (subject to availability).

DISTRIBUTION:

Sveriges Lantbruksuniversitet

Avdelningen för lantbrukets hydroteknik

S-750 07 UPPSALA, Sverige

Tfn 018/17 11 65, 018/17 11 81
