



SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET
UPPSALA

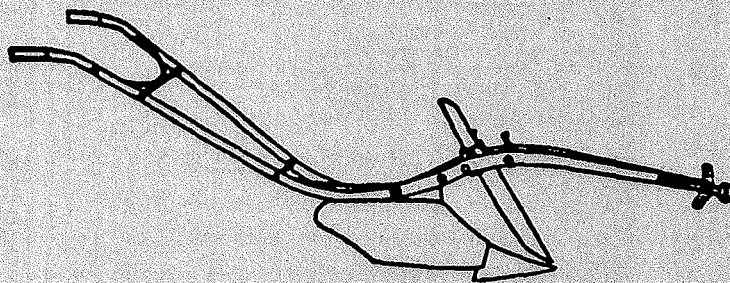
INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP

RAPPORTER FRÅN _____ JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Swedish University of Agricultural Sciences,
S-750 07 Uppsala

Department of Soil Sciences

Reports from the Division of Soil Management



Nr 87

1994

Thomas Grath

Inverkan av jordpackning och anaeroba markförhållanden på grödornas näringsupptagning samt på rotröta och utveckling hos ärter.

Influences of soil compaction and anaerobic soil conditions on crop nutrient uptake and on root rot and growth of peas.

ISSN 0348-0976

ISRN SLU-JB-R--87--SE

RAPPORTER från JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

- Nr Ar
- 1 1968 Inge Håkansson: Fysikalisk och kemisk beskrivning av markprofiler från 8 platser i Uppland och Västergötland. 128 s.
- 2 1968 Inge Håkansson: Några synpunkter på forskning och försöksverksamhet i jordbearbetning. 6 s.
- 3 1968 Nils M. Nilsson, Lennart Henriksson: Försök med harvning till vårsådd 1941-1959. 29 s.
Field trials with harrowing to spring-sown cereals 1941-1959.
- 4 1968 Åke Huhtapalo, Reijo Heinonen: Inledande försök med gödsel radmyllning kombinerat med sådd 1964-1966. 37 s.
- 5 1968 Lennart Henriksson: Orienterande försök med bearbetning till höstvetete. 7 s.
- 6 1968 Lennart Henriksson: Försök med olika såtider. 7 s.
- 7 1968 Reijo Heinonen: Berättelse över studieresa till Sovjet den 11-26 juli 1967. 13 s.
- 8 1968 Inge Håkansson: Markfysikaliska studier i ett växtföljdsförsök på Ås den 15-16 juli 1966. 13 s.
- 9 1968 Bo Thente: Luftpermeabilitetsmätning som markfysikalisk undersökningsmetod. 41 s.
- 10 1968 Reijo Heinonen, Åke Huhtapalo: Besvarade och obesvarade frågor om radmyllning av kvävegödsel. 13 s.
- 11 1968 Lennart Fergedal: Försök med jordpackning vid olika tidpunkter på våren. År 1967. 9 s.
- 12 1968 Nils M. Nilsson, Lennart Henriksson: Alvluckningsförsök 1937-1963. 32 s.
- 13 1968 Reijo Heinonen: Tidig vårsådd. Växtfysiologiska och ekologiska synpunkter på aktuella tendenser i såbäddsberedning och sådd av stråsådd. 19 s.
- 14 1968 Erik Jakobsson: Plöjningsförsök med olika tiltbredder och vändskiveformer. 10 s.
- 15 1968 Lennart Henriksson: Försök med grund plöjning. 9 s.
- 16 1968 Stig Ledin: Olika halmedbruksmetodernas verkan på kvickrot och på några frögräs. 21 s.
- 17 1969 Inge Håkansson, Börje Gillberg: Lufttrycket i traktor-däcken under fältarbeten. En stickprovundersökning hösten 1968. 32 s.
Investigation into the inflation pressure of the tires of Swedish tractors engaged in field work.
- 18 1969 Göte Bertilsson: Studier över tryckets markpåverkan. 67 s.
- 19 1969 Peter Edling, Nils M. Nilsson, Inge Håkansson: Sju skånska försök med alvluckring och djupplöjning 1964-68. 26 s.
Seven experiments with subsoiling and deep ploughing in Southwestern Sweden 1964-68.
- 20 1969 Bengt Reimersson, Gunnar Falk: Försök på Persbo gård 1968 med minskad jordpackning. 8 s.
A field experiment with reduced soil compaction on a clay soil.
- 21 1970 Lennart Henriksson: Olika redskapstyper för stubbearbetning. Jämförelser av arbetssätt och arbetsresultat. 19 s.
Different types of implements for stubblecultivation. A study of working methods and working results.
- 22 1970 Inge Håkansson, Lennart Fergedal: Försök med jordpackningens ackumulativa efterverkningar. Preliminär redogörelse. 21 s.
Experiments with the accumulative after-effects of soil compaction. Preliminary report.
- 23 1971 Göran Kritz, Inge Håkansson: Såbäddens utformning på vårsådda fält. Stickprovundersökning 1969-70. 43 s.
Investigation into seedbed preparation and properties of the seedbed on spring sown fields in Sweden, 1969-1970.
- 24 1971 Lennart Henriksson: Tilljämning av plogtiltan på hösten. Försök med höstharvning och tillsatsredskap till plogen. 68 s.
- 25 1971 Ann Pettersson: Nya redskap för gödselplacering och sådd. 50 s.
- 26 1971 Lennart Fergedal: Jordpackning med traktor vid olika tider för vårsådd. 140 s.
- 27 1971 Göran Kritz: Jordbearbetningsforskning i Europa. Rapport från en studieresa. 16 s.
- 28 1972 Helmut Frese: Zur Frage spezialisierter oder interdisziplinärer Forschung am Boden. 15 s.
- 29 1972 Inge Håkansson, Sven Alvelid: Två försök i Kalmar län med halmedplöjning för att minska vinderosionen. 4 s.
- 30 1972 Ann Pettersson, Sten Wikström: Inledande undersökningar om radmyllning till potatis. 50 s.
- 31 1972 Peter Edling, Lennart Fergedal: Modellförsök med jordpackning 1968-69. 71 s.
- 32 1973 Åke Huhtapalo, Ann Wikström, Sten Wikström: Försök med kombisåmaskiner 1971-72. 46 s.
- 33 1973 Inge Håkansson: Tung körning vid skörd av slättervall. Tre försök på Råbäcksdalen. 1969-72. 20 s.
Effect of heavy machinery when harvesting ley crops. Three field experiments in northern Sweden 1969-72.
- 34 1973 Göran Kritz: Såbäddens utformning på vårsådda fält. Stickprovundersökning 1969-72. Maskin användningen på provplatserna. 76 s.
- 35 1973 Lennart Henriksson: Redskap för såbäddsberedning. Undersökningsmetoder och inledande studier. 35 s.
Implements for seedbed preparation. Methods of investigation and preliminary studies.
- 36 1973 Inge Håkansson, Jozsef von Polgar: Försök åren 1969 och 1970 med en maskin för kombinerad såbäddsberedning och sådd (Svenska Sockerfabriks AB:s värbruksmaskin). 26 s.
Experiments in the years 1969 and 1970 with a machine for combined seedbed preparation and sowing.
- 37 1974 Lennart Engström: Intervjuundersökning om extremt tidig sådd våren 1973. 33 s.
A sampling study into extremely early spring sowing in Sweden in 1973.
- 38 1974 Lennart Henriksson: Studier av några jordbearbetningsredskaps arbetssätt och arbetsresultat. 144 s.
Studies of the mode of working and the working results of some soil tillage implements.
- 39 1975 Tomas Rydberg: Plöjningsfri odling i Sverige. En intervjuundersökning 1974. 21 s.
- 40 1975 Ulf Olsson: Redskap för såbäddsberedning, arbetssätt och arbetsresultat. 55 s.
Implements for seedbed preparation; studies of the mode of working and the working results.
- 41 1975 Inge Håkansson: Rapport över studieresa till USA hösten 1974. 15 s.
- 42 1976 Inge Håkansson: Elva försök med alvluckring och djupplöjning i Syd- och Västsverige 1964-1975. 35 s.
Eleven Swedish field experiments with subsoiling and deep ploughing 1964-1975.
- 43 1976 Peter Edling: Redskap och intensitet vid värbruk till potatis. Resultat av 11 försök i Norrland 1965-1969. 10 s.
Eleven experiments in northern Sweden with spring tillage for potatoes.
- 44 1976 Göran Kritz: Såbäddens utformning på vårsådda fält III. Stickprovundersökning 1969-72. Primärdata för 300 provplatser. 76 s.
Seed bed preparation and properties of the seed bed in spring sown fields in Sweden III. Sampling investigation 1969-72. Primary results from 300 investigated places.
- 45 1976 PROCEEDINGS of the 7th Conference of the International Soil Tillage Research Organization. ISTR0.
- 46 1976 Inge Håkansson, Jozsef von Polgar: Modellförsök med såbäddens funktion. I. Såbädden som skydd mot avdunstning. 52 s.
Model experiments into the function of the seedbed. I. The seedbed as a protective layer against drought.
- 47 1976 Lars Gunnar Nilsson: Texturanalys och jordartsklassifikation. Rapport från ett NJF-symposium i Uppsala 1976-03-09. 26 s.
- 48 1976 Inge Håkansson: Olika gröders känslighet för packningsgraden i matjorden. Två försök med vallväxter 1971-74. 17 s.
The sensitivity of different crops to the degree of compactness in the plough layer. Two field experiments with forage crops 1971-74.
- 49 1976 Göran Kritz: Såbäddens utformning på vårsådda fält IV. Stickprovundersökning 1969-72. En översiktlig studie av några viktiga faktorer. 33 s.
Seed bed preparation and properties of the seed bed in spring sown fields in Sweden IV. Sampling investigation 1969-72. A general survey of some important factors.
- 50 1977 Såbäddsberedning och sådd: Uppsatser presenterade vid Lantbruks högskolans försöksledarmöte 1977.
- 51 1977 Lennart Henriksson: Stubbearbetningsredskapens arbetsresultat med hänsyn till mark- och halmförhållandena. 32 s.
The results given by implements for stubble cleaning with regard to different soil- and straw conditions.
- 52 1977 Arne Ljungars: Olika faktorerens betydelse för traktorernas jordpackningsverkan. Mätningar 1974-1976. 43 s.
Importance of different factors on soil compaction by tractors. Measurements in 1974-1976. 43 p.
- 53 1977 Inge Håkansson & Jozsef von Polgar: Modellförsök med såbäddens funktion. II. Försök med skiktade och oskiktade såbäddar. 22 s.
Model experiments into the function of the seedbed. II. Experiments with stratified and unstratified seedbeds. 22 p.
- 54 1978 Ulf Olsson: Harvens konstruktion och harvningens utförande - inverkan på bearbetningsresultatet. 28 s.
Influence of harrow construction and harrowing on the tillage result. 29 p.
- 55 1978 Olle Wallbom & Kjell Wretler: Förekomsten av några viktiga växtskadegörare vid plöjningsfri odling. 29 s.
Occurrence of some important plant diseases on ploughless cereal cropping. 29 p.

Sveriges Lantbruksuniversitet
Institutionen för markvetenskap
Avdelningen för jordbearbetning

Rapporter från jordbearbetnings-
avdelningen. Nr 87, 1994
ISSN 0348-0976
ISRN SLU-JB-R--87--SE

Thomas Grath

**INVERKAN AV JORDPACKNING OCH ANAEROBA MARK-
FÖRHÅLLANDEN PÅ GRÖDORNAS NÄRINGSUPPTAGNING SAMT
PÅ ROTRÖTA OCH UTVECKLING HOS ÄRTER**

INFLUENCES OF SOIL COMPACTION AND ANAEROBIC SOIL
CONDITIONS ON CROP NUTRIENT UPTAKE AND ON ROOT ROT AND
GROWTH OF PEAS

LICENTIATAVHANDLING

Abstract

This thesis comprises

(1) A literature review (in Swedish) on:

- * Steps to be taken in order to reduce negative effects of soil compaction*
- * The function of the soil/root system*
- * Mechanical impedance of root growth*
- * Consequences of anaerobic soil conditions*
- * Nitrogen losses under anaerobic conditions*
- * Morphological and physiological effects of anaerobiosis*
- * Effects of soil compaction on root and plant growth with direction mainly on peas*
- * Aphanomyces root rot and steps in order to control root diseases in peas*

(2) Three papers (in English) on field studies conducted in the province of Halland in southwestern Sweden in 1990-1991 (I, II, III).

Two of these studies were case studies on effects of soil compaction on development and nutrient uptake of peas and a study on soil compaction and Aphanomyces root rot as causes of uneven pea growth, respectively. One of them was a field experiment on effects of soil compaction on plant nutrient uptake, root rot incidence and growth of peas on a sandy loam.

"Så lite man vet om så mycket"

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Inledning	3
Åtgärder för att minska packningens negativa verkningar	3
Funktionen hos mark och rot	4
Mekanisk hämning av rottillväxten	6
Konsekvenser av anaeroba förhållanden	10
Kväveförluster under anaeroba förhållanden	19
Morfologiska och fysiologiska effekter av anaerobi	26
Effekter av markpackning på rottillväxt, plantutveckling och skörd	28
Ärter	28
Rotsjukdomar på ärter	29
Ärtrottröta	30
Åtgärder för att bekämpa jordbundna svampar	31
Sammanfattning av fältstudier utförda i Halland i ärter 1990-1991 (I, II, III) samt personliga kommentarer	32
Referenser	37

Denna avhandling baseras på följande publikationer eller manuskript, vilka här refereras till med romerska siffror, och vilka bifogas i slutet av rapporten.

- (I) Grath, T. & Håkansson, I. 1992. Effects of soil compaction on development and nutrient uptake of peas. Swedish J. agric. Res. 22, 13-17. 42
- (II) Grath, T. & Håkansson, I. 1994. A case study on soil compaction and *Aphanomyces* root rot as causes of uneven pea growth. Swedish J. agric. Res. 24, 000-000 47
- (III) Grath, T & Håkansson, I. 1994. Effects of soil compaction on plant nutrient uptake, root rot incidence and growth of peas on a sandy loam. (Manuscript to be submitted to Soil Tillage Res.) 53

INVERKAN AV JORDPACKNING OCH ANAEROBA MARKFÖRHÅLLANDEN PÅ GRÖDORNAS NÄRINGSUPPTAGNING SAMT PÅ ROTRÖTA OCH UTVECKLING HOS ÄRTER

INLEDNING

Mekaniseringen inom jordbruket ökar i ett globalt perspektiv. I många länder betraktas denna trend med oro p g a den packning som uppstår när tunga maskiner överfar jordbruksmark. I större eller mindre grad påverkar markpackning alla fysikaliska, kemiska och biologiska markegenskaper och processer, likaväl som plantutveckling och skörd. Dessa markegenskaper måste upprätthållas vid en optimal nivå för att man skall nå tillfredsställande skördar. Grödans tillväxt och avkastning minskar om packningsgraden ligger antingen över eller under ett optimalt värde som varierar med jordart, gröda och klimatiska förhållanden (Fig.1). I genomsnitt var i svenska försök enl. Fig. 1 den optimala packningsgraden 87 men med betydande variationer. I försöksled utan packning hade höstplöjd jord under vintern satt sig så att packningsgraden i medeltal var 79. Därför behövdes det i regel en viss packning för maximal skörd. Efter en överfart med traktorhjul med lågt ringtryck (50-80 kPa) blev packningsgraden i genomsnitt 86, dvs obetydligt under den optimala. Efter en överfart med traktorhjul med högt ringtryck (130-160 kPa) blev packningsgraden i genomsnitt något över den optimala och efter flera överfarter blev den 92, dvs betydligt över den optimala.

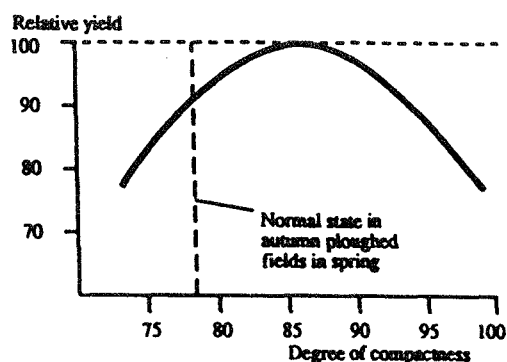


Fig 1. Sammanställning av resultaten från ett hundratal ettåriga packningsförsök i korn på olika jordar. En idealiserad avkastningskurva visar vid vilken packningsgrad skörden i genomsnitt var högst. (Efter Håkansson, 1989).

Att den optimala packningsgraden varierar beror på flera faktorer, såsom väderleken under växtsäsongen, grödan och växtnäringstillståndet. Under våta somrar har i regel en förhållandevis lucker jord (låg packningsgrad) varit bäst, under torrare somrar en mera packad jord. Vad som är väsentligt är dock, att när samma gröda odlats på olika jordar i samma trakt under samma år (dvs vid samma väderlek), så har den optimala packningsgraden blivit densamma på de olika jordarna, vilket just var avsikten med detta sätt att karaktärisera packningstillståndet.

I jämförande försök har korn, vete och sockerbetor visat sig vilja ha förhållandevis hög packningsgrad, havre och ärter något lägre, raps, rybs och åkerbönor ännu lägre och potatis den lägsta. Sortskillnader kan dock förekomma. Ärternas ställning här kan kanske diskuteras. Enligt nya försök i Halland, som längre fram kommer att diskuteras, visar det sig att ärter är tämligen känsliga för packning, framförallt då i samband med anaerobi och högt infektionstryck av ärtrotörta (I, II).

ÅTGÄRDER FÖR ATT MINSKA PACKNINGENS NEGATIVA VERKNINGAR

Den viktigaste åtgärden för att minska packningen är att undvika körning på våt mark. Under

vårbruket måste detta naturligtvis vägas mot nackdelarna av försenad sådd. Ju lägre marktryck maskinerna har desto mindre beroende blir man av markfuktigheten (Håkansson, 1989). Under såbäddsberedning och sådd på plöjda fält bör man söka återpacka största möjliga andel av fältens yta till en packningsgrad som ligger strax under den som kortsiktigt är optimal. En åtgärd i denna riktning är att förse traktorerna med dubbelmontage eller breda däck. Med nu tillgänglig däckutrustning kommer man i regel utan problem ner i ringtryck på 50-80 kPa, vilket betyder, att med sådana däck sker en packning på en större andel av fältytan men till en lägre packningsgrad jämfört med standarddäck. På nästan alla jordar ökar detta i sig själv avkastningen med 1-3 % (Håkansson, 1989).

En annan möjlighet är att kombinera olika arbetsmoment, exempelvis genom kombisådd eller harvsådd. Detta är av speciellt värde vid plöjningsfri odling, eftersom jorden då inte luckras och inte behöver återpackas (Håkansson, 1989).

Andra åtgärder för att minska packningens negativa verkningar kan vara :

- * **God dränering**, vilket betyder att jorden får förmåga att torka upp snabbare, vilket i sin tur betyder att såbäddsberedning kan insättas tidigare med mindre packning som följd.
- * **Lämpliga grödor**, t ex vall och höstsåd. Ofta sker höstsädessådd under torrare förhållanden än vårsädessådd.
- * **Kalkning/gödsling**. Förbättrar markstrukturen, mildrar packningsverkningarna.
- * **Alvluckring**. Endast under vissa förhållanden.
- * **Tidpunkterna för sådd och skörd**. Påverkas indirekt av dränering och lämplig maskinutrustning.
- * **Begränsad axelbelastning**. Gräns ca 6 ton för att packningen ej skall tränga för djupt ner och orsaka mer eller mindre permanenta skador i alven.
- * **God maskinkapacitet**. Körning när förhållandena är som gynnsammast.
- * **Fyrhjulsdrift**. Utnyttjar traktorns hela tyngd för produktion av dragkraft. Delburna redskap att föredra.
- * **Stora däck/dubbelmontage/låga ringtryck**. Ger lågt marktryck och mindre packning.
- * **God planläggning**, vilket kan innebära att köra så mycket som möjligt i samma spår samt utnyttja välbelägna in- och utfarter.
- * **Fastliggande körstråk eller fältvägar**. Används för tyngre transporter. Extra dräneringsledning samt strukturstabilisering med kalk gör att framkomligheten säkras.

FUNKTIONEN HOS MARK OCH ROT

Markens värde för växtodlingsproduktion beror mycket på dess förmåga att förse rötterna med vatten, syre och växtnäringsämnen. Det fasta jordmaterialet byggs upp av mineralpartiklar samt organisk substans som tillsammans skapar markskelettet (Tamm & Wiklander, 1970). Porsystemet utgörs av ett komplicerat nätverk, bestående av kanaler och håligheter, som då det befinner sig under grundvattenytan fullständigt är fyllt med vatten. Då grundvattenytan sänks, t ex p g a

dränering eller evapotranspiration, dräneras gradvis porsystemet med vatten och markluft införlivas i systemet (Tamm & Wiklander, 1970). Fördelningen av markluft och markvatten bestäms av porstorleksfördelningen, grundvattenytans läge samt tillförsel och konsumtion av vatten i marken.

Porsystemets geometri beror primärt av jordart och textur. I Fig. 2 görs ett försök att beskriva storlekarna av markpartiklar och rothår. Det är huvudsakligen lerfraktionen och den organiska substansen som inverkar på markstrukturen och markvatteninnehållet, men även om ett ökat lerinnehåll betyder en ökad markvattenhållande förmåga, betyder inte det att mängden tillgängligt vatten ökar för växten, vilket beror på att de mycket små lerpartiklarna har förmågan att binda vatten så hårt att det undandras växternas rötter (Tamm & Wiklander, 1970). Å andra sidan har lerfraktionen förmågan att ge upphov till aggregat och på så sätt bilda större porer mellan aggregaten, vilket ger möjlighet till snabba rörelser av vatten och luft i porsystemet (Tamm & Wiklander, 1970).

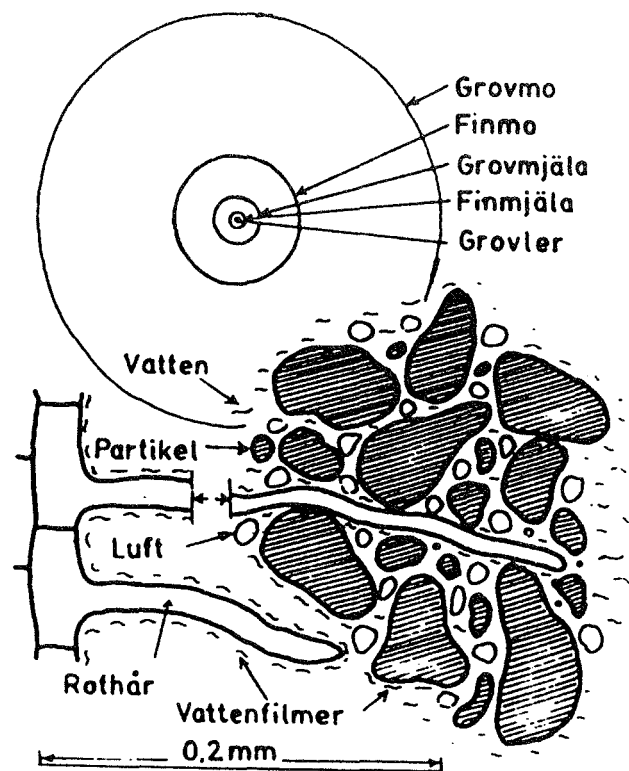


Fig. 2. Schematisk bild av rothår, markpartiklar och porer vid ca 300 gångers förstoring. (Efter Sigvard Andersson).

Förmågan hos rotsystemet att penetrera markprofilen beror delvis på dess genetiska disposition, men rotmiljön modifierar också till betydande del dess förmåga att tillväxa såväl lateralt som longitudinellt (Bengtsson, 1985). Högt mekaniskt motstånd, högt belägen grundvattenyta och andra ogynnsamma förhållanden kan ge upphov till ett begränsat rotsystem med åtföljande reducerad planttillväxt. Vissa växtarter, framför allt vissa perenna gräs, har dock förmågan att övervinna mekaniskt motstånd i marken och på så sätt förbättra markförhållandena för efterföljande grödor (Russell, 1971). En förklaring till detta kan vara att arter som har förmågan att växa under längre period med liten rottillväxt per tidsenhet, har större möjligheter för framgångsrik penetrering av hårt packade jordar än växter med kortare vegetationsperiod (Russell, 1971). En mera trolig är att sådana arters rötter kan passa på att tillväxa, när motståndet är som lägst.

Vatten- och växtnäringsupptagningen sker huvudsakligen via rothåren och antalet av dessa, som

kan vara upp till 10^{10} (10 miljarder) på en mogen råglanta, kan ses som ett mått på plantans förmåga att absorbera vatten och växnäringsämnen. Fig. 3 beskriver strukturen och tillväxtmönstret hos rötter och rothår. Förekomsten av rothår orsakar en tydlig ökning av den absorberande rotytan. En rot med en diameter av 0.5 mm har förmågan att täcka en absorptionsyta av 5 cm^2 per cm rotlängd (Eriksson et al., 1974).

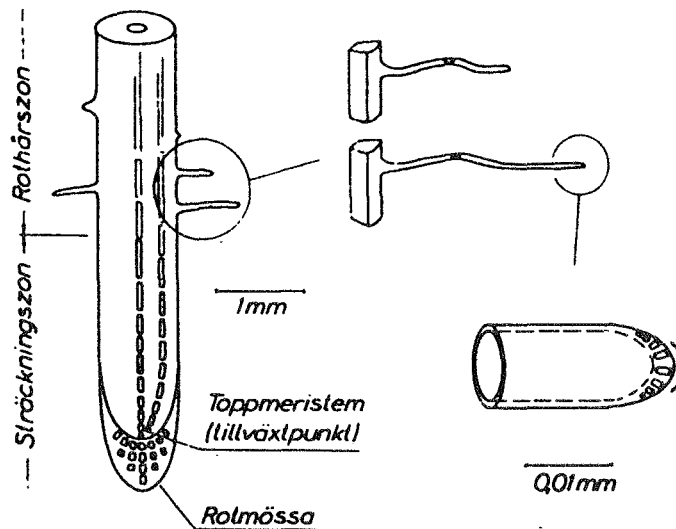


Fig. 3. Rotspetsen och rothårens byggnad och tillväxtmönster. (Efter Eriksson et al., 1974).

MEKANISK HÄMNING AV ROTTILLVÄXTEN

Den primära effekten av markpackning är en reduktion av porvolymen. Sekundärt orsakar packningen en omfördelning av porstorlekarna och dessa förändringar kommer att påverka markens fysikaliska egenskaper. Luftinnehåll, gasutbyte, vattenretention och hydraulisk ledningsförmåga påverkas. Dessutom sker mekanisk hämning av rottillväxten och packningen kommer också indirekt att påverka många kemiska och biologiska processer (Håkansson, 1988).

Så länge markprofilen innehåller större sprickor, kanaler och grövre porer, har rötterna förmåga att tillväxa tillfredsställande under förutsättning att vatten, växnäringsämnen och syre finns tillgängligt. Då pordiametern närmar sig rotdiametern, kommer pordiametern i ökande grad att påverka rottillväxten. De flesta rötterna är tjockare än ca 0.1 mm i diameter medan rothåren normalt har en diameter av ca 0.01 mm (Åberg et al., 1972). När rot- och pordiametern närmar sig varandra, begränsas vidare vertikal rotpenetration. En skrymdensitet mellan 1.3 och 1.8 kg dm^{-3} , beroende på jordart, anses normalt utgöra värden som begränsar rottillväxten (Bengtsson, 1985).

Då marken utsätts för ett yttre tryck, exponeras markskelettet för krafter av olika riktningar och storlekar, vilka dels överförs genom kontakten mellan markpartiklarna och dels via porvatten och porgas. Packningen orsakar i första hand en reduktion av porvolymen och då speciellt av porer med relativt stor diameter (Fig.4). Detta orsakar ett högre mekaniskt motstånd med försvärad penetration för rötterna som följd (Gable, 1971). Det är främst reduktionen av porer med en diameter större än 0.03 mm som sker (Riley, 1983). Sådana porer är av stor betydelse för gasutbyte (både diffusion och massflöde) och mättad hydraulisk konduktivitet (Håkansson et al., 1988). I sådana porer ryms en stor del av växrötterna och högre markorganismer. Populationer av markartropoder och dagmaskar har visat sig påverkas allvarligt av packning och orsakerna kan vara direkta effekter av trycktillskottet, förskjutningar i markprofilen eller förändrad markmiljö (Boström, 1986).

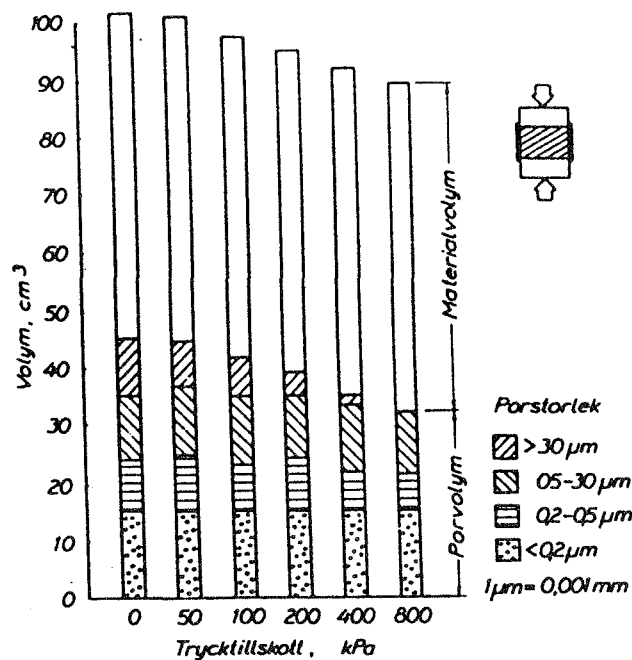


Fig. 4. Förändring i porvolym och porstorleksfördelning vid stigande trycktillskott. Grävsta, Uppsala län, horisont 40.0-42.5 cm, välaggregerad lerjord, lerhalt 40 %. (Efter Eriksson et al., 1974)

Fig. 4 visar hur porstorleksfördelningen förändras vid ökande trycktillskott på en lerjord. I initialstadiet är procentsatsen porer större än 0.03 mm ungefär 10 %. Dessa porer dräneras vid 1.0 m vattenpelare och skapar ett nätverk av underjordiska kanaler och håligheter där rötter kan utvecklas. Samtidigt ger dessa porer upphov till god luft- och vattenpermeabilitet. Om jorden exponeras för ett trycktillskott av 200 kPa reduceras andelen grövre porer avsevärt och vid 800 kPa har dessa fullständigt kollapsat. Vid ett trycktillskott av mer än 200 kPa reduceras även porer som är mindre än 0.03 mm. Detta reaktionsmönster är också tillämpligt för andra jordarter. Ett trycktillskott av 200 kPa kan ur denna synvinkel betraktas som ett gränsvärde (Eriksson et al., 1974).

Rotspetsen utgör ett effektivt organ för penetreringen av porsystemet p g a dess förmåga att tränga fram där den möter minst motstånd. Den kan dock inte kröka hur tvärt som helst. Friktionen mot rotspetsen är normalt av överkomlig storlek då den har förmåga att utsöndra slemämnen (Åberg et al., 1972). Penetrationen av rötter kan också ge upphov till strukturella förändringar i marken hos lerjordar, då sprickor som orsakats av krympning utvecklats p g a rötternas vattenupptagning.

När tillväxande rötter under t ex packade förhållanden når markporer, vars diameter är mindre än rötternas, är fortsatt utbredning endast möjlig om rötterna förmår att antingen utöva tillräckligt stort tryck för att utvidga porerna eller att minska sin egen diameter. En undersökning av Wierserum (1957) visar att rötter inte har förmågan att penetrera stela porer vars diameter är mindre än rötternas. Han fann dessutom att roten ej har möjlighet att minska sin diameter, tvärtom ökar den sin diameter då den utsätts för ett externt trycktillskott. Han noterade också att stelens storlek i stort sett blev opåverkad men att däremot tvärsnittsytan hos cortex ökade tämligen kraftigt. Russell (1977), visade att rötter antog ett mera triangulärt utseende då de penetrerar trånga triangulära porer. Fig.5 beskriver utseendet av rotsystem samt tvärsnitt av rötter hos västkorn odlade i en opackad (A) och packad (B) lättlera (Lipiec et al., 1991). Det packade ledet bestod av 8 överfarter med traktor. Rötter som vuxit i det starkt packade ledet karakteriserades av större diameter, högre grad av tillplattning, en oregelbunden yta med förvridna epidermala celler, vilka hade penetrerats av jordpartiklar samt radiellt förstörade kortexciller. Det antogs att den förstörade kortexcillytan med sin större absorptiva yta har förmågan att motverka växtnäingsbrist. Ovan

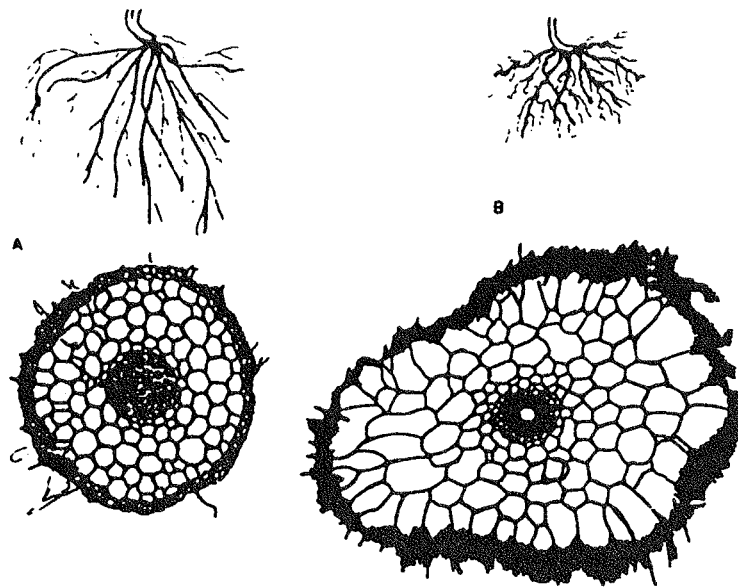


Fig. 5. Rotsystem och tvärsnitt av rötter som vuxit i en opackad (A) och packad (B) lättlera. (x 150). (Efter Lipiec et al., 1991)

nämnda observationer antyder att i detta fall jordmotståndet var den huvudsakliga faktorn som begränsade rottillväxten i det packade försöksledet.

Det maximala tryck som rötter kan utöva rapporterades först av Pfeffer (1893). Han fann i sina undersökningar att rötter har förmågan att utöva longitudinella tryck motsvarande ca 1 MPa och radiella tryck på ungefär hälften av denna storleksklass. Taylor och Ratliff (1969) visade genom att undersöka rötter från ett antal olika arter att dessa kunde utöva maximala longitudinella tryck motsvarande 0.9-1.3 MPa, vilket väl överensstämde med Pfeffers ursprungliga arbete. Men viktigare, med hänsyn till grödornas tillväxt och skörd, borde vara att centrera uppmärksamheten på vilket minimalt tryck som påverkar rottillväxten negativt. Dessa tryckvärden kan, under ofördelaktiga tillväxtförhållanden, hindra rötterna att tillräckligt förses med vatten och näring. Flera undersökningar har genomförts för att illustrera detta, bl. a. modellförsök av Goss (1977). Olika tekniker som använts hade det gemensamma draget att tillväxtmediet utsattes för kända yttre tryck, vilka transmittades genom membraner, medan alla andra faktorer upprätthölls identiska och på gynnsamma nivåer. Fig.6 utgör en sammanställning av resultat från ett större antal experiment, där stigande trycktillskott avsatts som funktion av rottillväxt. Ett tillfört tryck av 20 kPa reducerade rottillväxten till ca hälften jämfört med kontrollerna, och 50 kPa till ungefär 20 %. Ytterligare trycktillskott upp till 100 kPa orsakade endast en mindre reduktion av rottillväxten. I sammanhanget skall nämnas att relationen mellan externa tryck, utövade av membraner och penetrationsmotståndet med hänsyn till rottillväxt eller penetrometer ej hade studerats.

Markens vatteninnehåll påverkar också motståndet mot penetrerande rötter. Sjunkande markvattenpotential ger upphov till en högre hållfasthet i jordent med resultatet att penetrerande rötter måste övervinna ett större mekaniskt motstånd, vilket illustreras i Fig.7. Detta är dock inte det enda sätt på vilket förändringar i markvatteninnehållet kan påverka rötter i en packad jord. Barley (1962) visade i en laboratorieundersökning att effekterna av ett yttre tryck pålagt rotmediet, förhöjdes när förrådet av syre var begränsat till 3-5 vol-% i gasfasen. Konklusionen blir då, att om ett ökande vatteninnehåll reducerar den luftfyllda porvolymen i en packad jord så att syrehalten i jorden minskas, kommer begränsningar i rottillväxten orsakad av mekaniskt motstånd att accentueras.

Den mängd vatten och växnäring en gröda har förmåga att tillgodogöra sig beror på de

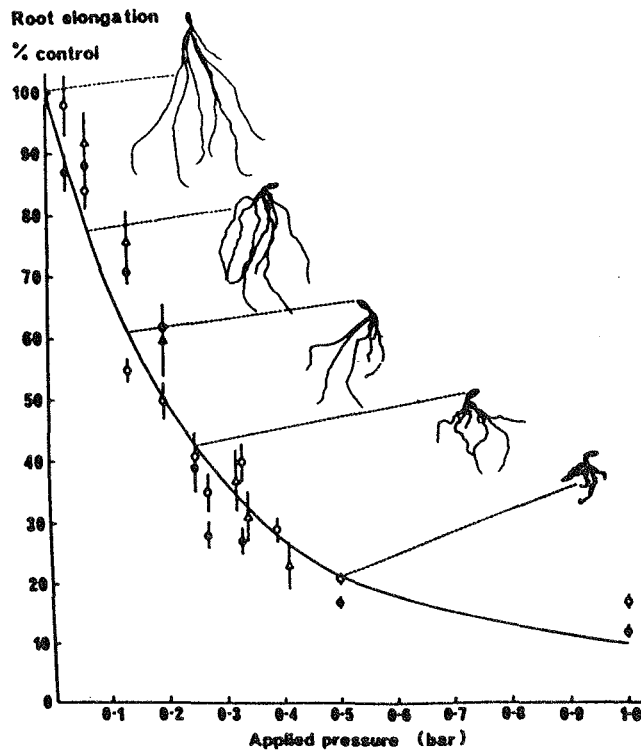


Fig. 6. Effekter av utifrån pålagt tryck på tillväxten av frörötter hos korn (*Hordeum vulgare*) som under 6 dagar odlats i bäddar av glaspärlor med olika diametrar, till vilka rikligt med växtnäringsämnen tillförts i syresatta näringslösningar. (Efter Russell & Goss, 1974).

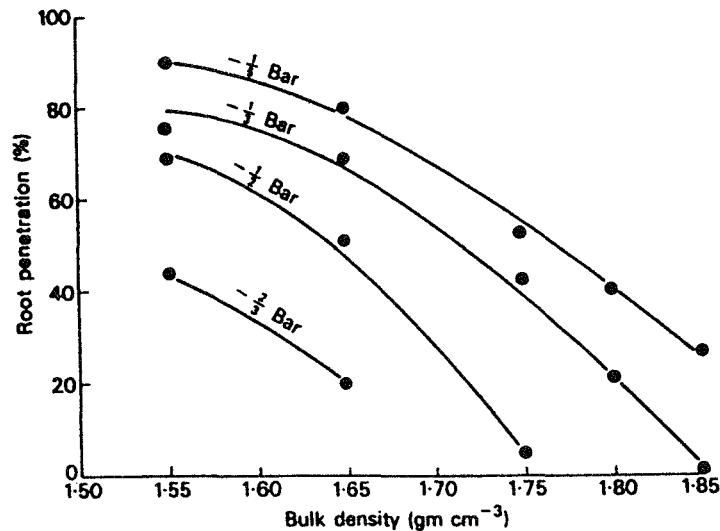


Fig. 7. Effekt av skrymdensitet och vattenpotential på penetrationen av frörötter hos bomull (*Gossypium hirsutum*), som odlats i lager av mojord. (Efter Taylor & Gardner, 1963).

fysikaliska, kemiska och biologiska förhållandena i marken. Dessa faktorer påverkar både förmågan hos jorden att lagra och transportera vatten och möjligheten för rötterna att utnyttja markvattnet och växtnäringsämnena. Växelverkan mellan rottillväxt, mekaniskt motstånd samt syre och vattentillgång illustreras i Fig.8. En ökad skrymdensitet leder till reducerad rottillväxt. Vid bristfällig dränering uppstår syrebrist, vilken blir mer uttalad vid ökad skrymdensitet. Vid höga vattentensioner reduceras rottillväxten p g a vattendeficit i kombination med mekaniskt motstånd.

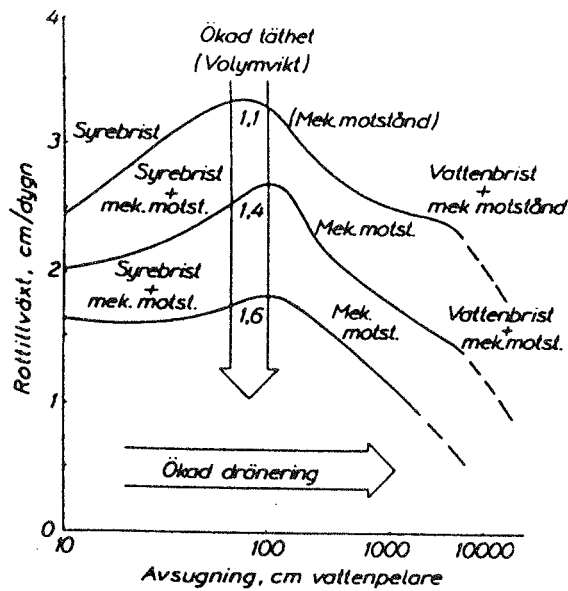


Fig. 8. Rottillväxt vid olika packningstillstånd under varierande avsugning. (Efter Eriksson et al., 1974).

I flesta fall är det inte enbart mekaniskt motstånd som begränsar rottillväxten. Mer vanligt är det fråga om en kombination av mekaniskt motstånd och det faktum att en packad jord har låg syrehalt, som hämmar rottillväxten och begränsar dess möjligheter att övervinna det mekaniska motståndet. Slutligen bör det poängteras att växelverkningarna mellan syrebrist och mekaniskt motstånd och dessa faktors inverkan på tillväxt kräver mer forskning för att ordentligt klargöras.

KONSEKVENSER AV ANAEROBA MARKFÖRHÅLLANDEN

Sammansättningen av markluften skiljer sig från den i atmosfären. Koldioxidhalten i atmosfären är ca 0.03 vol-%, medan den är högre i markens ytskikt, 0.2-1 vol-%. Markluft innehåller också motsvarande lägre syrehalt, ca 20.3 vol-%, vilket skall jämföras med ca 21 vol-% i atmosfären (Mengel & Kirkby, 1987). Den högre halten av CO₂ härstammar från respirationen hos levande markorganismer, vilka konsumerar O₂ och avger CO₂. Respirationen hos växtrötterna beror i hög grad av syretillgången i markluften. Respirationen försör olika metaboliska processer med energi, inklusive det aktiva jonupptaget hos växtrötterna (Mengel & Kirkby, 1987). Det partiella syretrycket, som krävs för tillfredsställande rotmetabolism kan dock vara avsevärt lägre än atmosfärens. Sålunda visade Hopkins et al. (1950) att näringsupptagningen hos tomatplantor försämrades först när syrehalten i markluften understeg 10 vol-%.

Under anaeroba markförhållanden saknas fritt syre. Normalt inträffar dock detta sällan i hela markprofilen, då en viss mängd syre alltid tränger igenom ytlagret, och om det partiella syretrycket hamnar under det atmosfäriska, är det mycket sällan som tömningen är enhetlig i en viss jordvolym (Russell, 1977). När anaerobi uppstår, uppträder den normalt på lokala ställen.

Utvecklingen av anaeroba markförhållanden

En anaerob situation utvecklas i marken endast då den mängd syre som tränger ner i profilen är mindre än den som utnyttjas i den respiratoriska processen hos växtrötter, bakterier, svampar och andra markorganismer.

Markens luftfyllda porositet är den markfysikaliska faktor som främst påverkar gasutbytet med

atmosfären. Syre diffunderar tiotusen gånger snabbare i gasfas jämfört med i en vattenlösning (Russell, 1977). Vattenmättnad av jorden är sålunda den mest vanliga orsaken till syrebrist. En luftfylld porositet av 10 vol-% betraktas nu allmänt som ett ungefärligt lägre gränsvärde för en tillfredsställande plantutveckling. Om däremot markens hydrauliska konduktivitet är tillräckligt hög och dräneringen tillfredsställande, kan rörelsen av syremättat ytvatten i marken förse organismerna med tillräckliga mängder syre, vilket t ex uppträder hos vattenöversilade ängsmarker, framförallt under kyliga klimatförhållanden, då relativt sett mindre mängder syre utnyttjas i de biologiska processerna (Russell, 1977).

Något direkt samband föreligger ej mellan den luftfyllda porvolymen i marken och graden av anaerobi (Grable, 1966). Skillnader i fördelningen av luftfyllda porer och deras kontinuitet kan förändra syretransporten, både i gas- och marklösningssfasen, till olika zoner i marken. Därutöver kan variationer i utnyttjandegrad av syret ha stor effekt. Tab.1 visar att syrekonsumtionen i en väl-dränerad jord kan förändras med en faktor större än 10 beroende på temperaturen. Tab.1 illustrerar också påverkan av rötterna; den klart högre respirationen på den bevuxna jorden reflekterar respirationen hos både rötter och mikroorganismer, vilka utnyttjar rotexudat och döda rötter som näringssubstrat. Russell (1973) har beräknat att om en jord, som innehåller 20 vol-% luft, förbrukar syre med en hastighet av 6 g per m² markyta per dag, kommer den totala syremängden i markluften att vara förbrukad inom ca 2 dagar, förutsatt att markytan inte står i förbindelse med atmosfären. Om syre skulle förbrukas motsvarande den högsta graden i Tab.1, skulle ett upphörande av gasutbytet under mindre än en dag leda till en betydande minskning av syreförrådet.

Tab. 1. Syrekonsumtionen under vinter och sommar hos en jord, dels utan gröda, dels med kål (*Brassica oleracea*). (Efter Currie, 1970).

	Juli	Januari
Marktemperatur, 30 cm djup	17° C	3° C
O ₂ -konsumtion m ² markyta (g d ⁻¹)		
Bar markyta	11.6	0.7
Bevuxen med kål	23.7	2.0

Anaeroba zoner

Då mängden syre som diffunderar genom markytan tenderar att bli lägre än den mängd som konsumeras, kan väsentliga skillnader uppstå i syrekonscentrationen på platser i marken som ligger helt nära varandra. Om markens finare porer är fyllda med vatten och de grövre med luft, kan man lite förenklat betrakta marksystemet som bestående av vattenfyllda aggregat åtskilda av luftfyllda porer (Currie, 1961). Han drog slutsatsen att den maximala radien (r) av ett aggregat, till vilket centrum syre kan nå, kunde uttryckas med ekvationen:

$$r^2 = 6 DC/M$$

där D utgör syrets diffusionskoefficient i aggregatet, C är konscentrationen av syre i det vatten som finns på ytan av aggregatet och M är den hastighet med vilken syre förbrukas inne i aggregatet. Han noterade, att syrekonscentrationen vid full vattenmättnad kunde falla till ett nollvärde i centrum av vattenfyllda aggregat, vilka hade en radie av ca 0.1-1.0 cm.

Den oenhetliga fördelningen av organiskt substrat i marken är ytterligare en orsak till variationen

av syrekonzentrationen, då störst mängd syre kommer att förbrukas på platser där rikligt med substrat finns, som befrämjar uppförökningen av mikrofloran (Russell, 1977). Fig.9 försöker på ett enkelt sätt att illustrera hur anaeroba zoner kan utvecklas då vatteninnehållet i marken ökar.

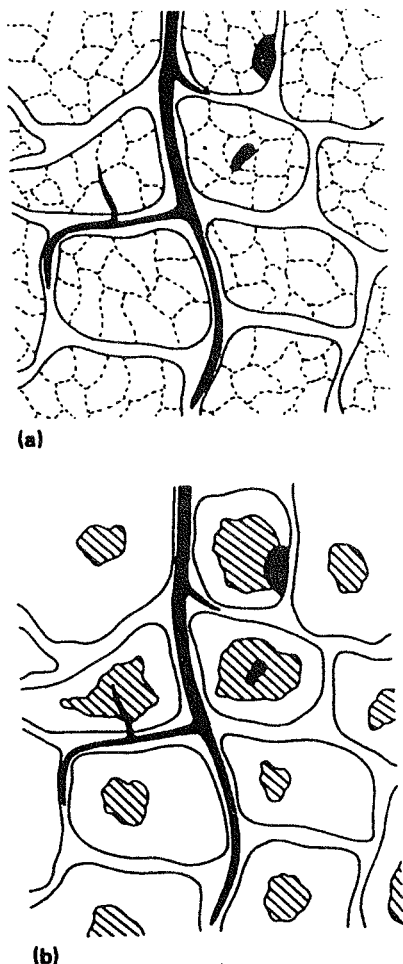


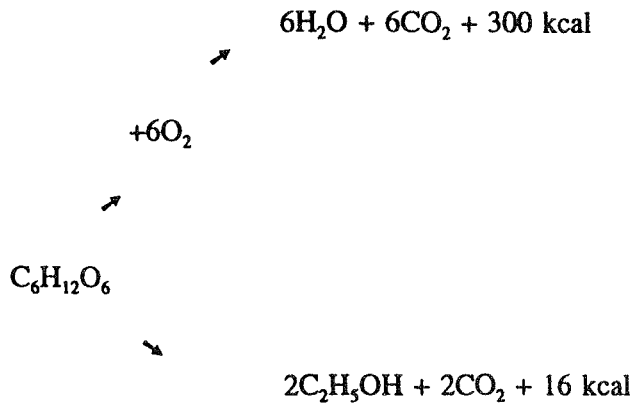
Fig. 9. Schematisk beskrivning av begynnande anaerobi i marken. (a) Jord välförsedd med syre: Porer mellan aggregaten är luftfyllda och mindre luftfyllda porer existerar också i aggregaten (streckat). En tillväxande rot och 2 zoner med organiskt substrat visas (skuggat). (b): Ökande mängd markvatten har förträngt luften i de finare porerna inom aggregaten. Anaeroba zoner (lätt skuggade) har utvecklats inom aggregaten, speciellt där rikligt med organiskt substrat existerar. (Efter Russell, 1977).

En minskning av syreförrådet i marken i förhållande till rötternas behov är inte den enda potentiella orsaken till plantskador när anaeroba förhållanden uppstår i marken. Ett stort antal komplexa biologiska, kemiska och fysikaliska förändringar uppträder, som behandlats av bl a Allison (1973), Russell (1973) och Skinner (1975). I detta sammanhang kommer uppmärksamheten att huvudsakligen riktas på aspekter beträffande metaboliska reaktioner under anaeroba förhållanden, bildade toxiska substanser samt kväveförluster.

Metaboliska processer under anaeroba förhållanden

Vid frånvaro av fritt syre i marken inträder betydande förändringar som kommer att påverka tillväxten hos grödan p g a de metaboliska produkter som bildas av obligata eller fakultativt anaeroba mikroorganismer (Russell, 1977). Huvuddelen av dessa är heterotrofa, då de kräver

energi från organiskt substrat. En jämförelse mellan aerob och anaerob respiration beskriver sålunda de väsentligare skillnaderna med hänsyn till de slutprodukter som bildas. Ett bra och enkelt exempel är att utgå från glukos ($C_6H_{12}O_6$) och sedan betrakta vilka slutprodukter som bildas vid aerob respektive anaerob respiration, vilken i detta fall utgöres av en fermentation, där elektronmottagaren är organisk (Conn & Stumpf, 1966):



De viktigaste likheterna och skillnaderna mellan aeroba och anaeroba processer är (Russell, 1977):

1. All respiration är beroende av transporten av elektroner från det substrat som oxideras, till en acceptor som reduceras. I den aeroba reaktionen utgör fritt syre elektronacceptor. Syret förenar sig med väte och bildar vatten.

Vid brist på syre uppstår en mängd olika reaktioner. Bundet syre i substratet kan t ex utnyttjas som i ovanstående exempel. Syret kan också härstamma från reduktionen av andra substrat, som nitrat och sulfat. Katjoner av hög valens, t ex trivalent järn (Fe^{3+}) eller tetravalent mangan (Mn^{4+}) har förmåga att mottaga elektroner och reduceras till ferro (Fe^{2+}) eller mangan (Mn^{2+}) joner. På vilket sätt elektronerna transfereras beror på redoxpotentialen som i sin tur påverkas av pH och andra faktorer.

Redoxpotentialen, vilken används då man studerar reducerande förhållanden i anaeroba jordar, regleras av koncentrationerna av reducerade och oxiderade substanser i marken enligt formeln (Mengel & Kirkby, 1987):

$$E = E_0 + R T/nF \ln (Ox)/(Red)$$

där

(Ox) = Koncentrationen av oxiderade substanser

(Red) = Koncentrationen av reducerade substanser

E_0 = Standard redoxpotential

R = Gaskonstant

T = Absolut temperatur

n = Valens

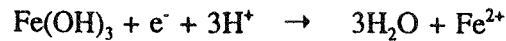
F = Faradays konstant

Ekvationen visar att redoxpotentialen minskar då koncentrationen av reducerade substanser ökar relativt till oxiderade substanser. En låg potential är alltså kännetecknande för hög reducerande förmåga eller ett överskott av elektroner, medan en hög potential indikerar brist på elektroner.

I närvaro av O_2 råder höga redoxpotentialer då syre är en kraftig oxidant, som driver oxidationen

av bl a kol, väte, kväve, svavel, järn och mangan till oxiderna CO_2 , H_2O , NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe_2O_3 och MnO_2 .

Under vattenmättade förhållanden i marken reduceras ovanstående oxider (Ponnamperuma, 1972). Dessa reaktioner är ofta förbundna med konsumtion av H^+ , vilket visas i följande exempel:



Detta orsakar en förhöjning av pH-värdet på sura jordar. Vid mycket låga redoxpotentialer (< ca - 300 mV), har vätejoner förmågan att bilda molekylärt väte.

2. Medan aerob respiration kan orsaka fullständig oxidation av kolhydrater till koldioxid och vatten, kan den anaeroba ej lyckas med detta. Den avger mycket mindre energi och en mångfald av partiellt reducerade föreningar bildas. Dessa inkluderar alkoholer och ett stort antal organiska syror likaväl som andra substanser. Vissa av dem kommer att bli nedbrutna och ge upphov till kolväten och koldioxid, andra som är flyktiga kommer att avgå till atmosfären, medan åter andra, som är mer persistenta, kvarligger till dess att de blir metaboliserade i aeroba processer när syretillförseln är återställd.

Toxiska substanser i marken

Många av de substanser som bildas vid anaerob metabolism kan vara skadliga för växterna. Produkterna kan nå toxiska koncentrationer framförallt då tillräckliga mängder lättomsättbart organiskt material finns närvarande. Deras effekter kan bli särskilt iögonfallande då stora mängder flytgödsel tillförs marken (Burford, 1976). En inarbetning av växtrester kan vara tillräckligt för att orsaka betydande effekter, särskilt när temperaturen är gynnsam för snabb anaerob nedbrytning.

Olika mikrobiella substanser man upptäckt i anaeroba jordar har på ett utförligt sätt granskats av bl a Russell (1973). Här begränsas kommentarerna till några av de större grupperna av substanser, som har ansetts ha stor betydelse för växterna.

Organiska syror. Ett stort antal organiska syror bildas under anaeroba förhållanden (Stevenson, 1967) och av dessa utgör de flyktiga fettsyrorerna de viktigaste. Speciellt ättiksyra men även myrsyra, propionsyra, smör- och valerinsyra kan nå koncentrationer av 2×10^{-3} M per 100 g jord, när stora mängder organiskt material omsättes i en vattenmättad jord. Utöver dessa syror kan aromatiska syror typ p-hydroxybensoe-, p-kumarin- och valerinsyra vara närvarande (Wang et al., 1967). Ett flertal andra syror har upptäckts, men i jämförelse med de flyktiga fett och aromatiska syrorerna betraktas dessa som mindre betydelsefulla som fytotoxiner. Trots produktionen av organiska syror under anaeroba betingelser faller inte pH-värdet speciellt, då många andra faktorer i marken har förmåga att stabilisera pH-värdet vid ett ungefärligt neutralt värde (Russell, 1973).

Kolväten. Dessa utgörs av organiska kolföreningar som enbart innehåller kol och väte och som dessutom är synnerligen svårslösliga i vatten. Vissa kolväten är alifatiska, en grupp av kolföreningar som kännetecknas av att kolatomerna är förenade i öppna kedjor, medan andra innehåller en aromatisk ring och kan betraktas som derivat av bensen (Brock & Madigan, 1991).

Uppträdandet av metan (CH_4) i anaeroba jordar har länge varit känt och mer nyligen har etylen och ett antal andra kolväten identifierats (Smith & Restall, 1971). Produktionen av etylen i anaeroba jordar har fått stor uppmärksamhet eftersom denna förening också tjänstgör som endogen tillväxtregulator och kan inducera biologiska effekter vid mycket låga koncentrationer (Smith & Dowdell, 1974). En syremängd i markluften som understiger 0.1 vol-% samt ymnig tillförsel av organiskt substrat anses normalt vara nödvändigt för produktion av större mängder etylen (Lynch

& Harper, 1974).

Brock & Madigan (1991) drar slutsatsen att "vissa omättade alifatiska likaväl som aromatiska kolväten kan brytas ner anaerobt av olika mikroorganismer, t ex denitrifierande, fototrofiska och sulfatreducerande bakterier. Det har visat sig att dessa bakterier har förmågan att spjälka benzoat och andra substituerade fenoliska substanser under bildning av CH₄ och CO₂ som slutprodukter. Den anaeroba katabolismen av aromatiska föreningar fortgår främst genom reduktiv ringklyvning (Fig.10). Den anaeroba katabolismen involverar reduktion av ringstrukturen följt av ringklyvning och därmed bildning av fettsyror och dikarboxylgrupper".

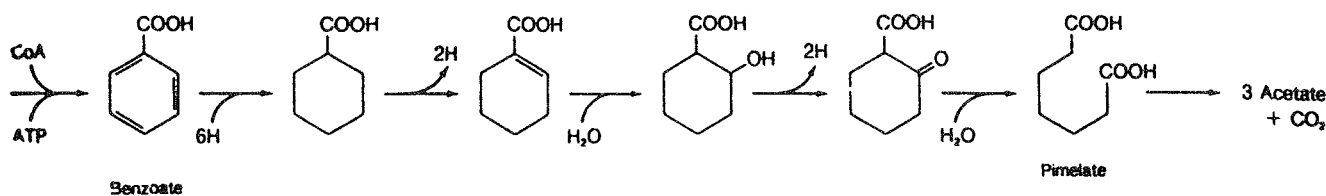
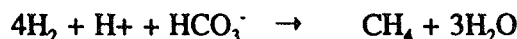


Fig. 10. Anaerob nedbrytning av benzoat genom reduktiv ringklyvning. (Efter Brock & Madigan, 1991).

Koldioxid. Karbonat (CO₃²⁻) är enligt Brock & Madigan (1991) en av de mest vanliga oorganiska anjonerna i naturen och är en huvudprodukt i samband med energimetabolismen hos heterotrofer. Åtskilliga bakteriegrupper har förmåga att utnyttja CO₂ som elektronmottagare vid anaerob respiration. De mest betydelsefulla CO₂reducerande bakterierna utgörs av metanogenerna, en huvudgrupp inom archaebakteria. Vissa av dessa organismer utnyttjar H₂ som elektrondonator (energikälla) enligt reaktionen:



En annan grupp av CO₂ reducerande bakterier är homoacetogenerna, vilka producerar acetat snarare än CH₄ från CO₂ och H₂ enligt:



Exempel på homoacetogena bakterier är *Clostridium aceticum* och *Acetobacterium woodii* (Brock & Madigan, 1991).

När gasutbytet i marken blir begränsat och anaeroba förhållanden börjar uppstå ökar koncentrationen av koldioxid (Russell, 1977). Dess högre vattenlöslighet jämfört med syre, ca 30 gånger mer vattenlösligt, gör att CO₂ diffunderar mycket snabbare i marklösningen (Greenwood, 1970). Koncentrationer överstigande 5 vol-% och mera exceptionellt ca 10 vol-% har rapporterats i matjorden (Russell, 1973). Höga koncentrationer av CO₂ kan vara toxiska, med effekter som är snarlika syrebrist. Arbeten utförda av Kramer (1969) visar dock att koldioxid under anaeroba betingelser har förhållandevis liten skadeverkan jämfört med syrebrist.

Tab.2 listar exempel på olika mikrobiella jäsningsprocesser samt involverade mikroorganismer. Två fermentationsprodukter angivna i tabellen har ej förmågan att vidare fermenteras, nämligen CO₂ och CH₄, varav den ena, CO₂ är den mest oxiderade och den andra, CH₄, den mest reducerade formen av kol. Sålunda utgörs alltid de slutliga nedbrytningsprodukterna vid anaerob nedbrytning av just metan och koldioxid.

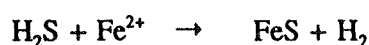
Svavelföreningar. Flera olika svavelföreningar utgör viktiga elektronmottagare vid anaerob

Tab.2. Exempel på olika mikrobiella fermentationsreaktioner samt involverade organismer. (Modifierad efter Brock & Madigan, 1991)

Typ	Bildade produkter	Organismer
Alkoholfermentation	Hexoser → Etanol+CO ₂	Jäst <i>Zymomonas</i>
Homolaktisk fermentation	Hexos → mjölksyra	<i>Streptococcus</i> , vissa <i>Lactobacillus</i>
Heterolaktisk fermentation	Hexos → mjölksyra Etanol CO ₂	<i>Leuconostoc</i> , <i>Lactobacillus</i>
Propionsyra	Laktat → Propionat	<i>Propionibakterium</i> <i>Clostridium propionicum</i>
Smörsyra	Hexoser → Butyrat Acetat H ₂ +CO ₂	<i>Clostridium butyricum</i>
Butanol	Hexoser → Butanol Acetat Aceton Etanol H ₂ +CO ₂	<i>C. butyricum</i>
Metanogenisk	Acetat → CH ₄ +CO ₂	<i>Metanotrix</i> , <i>Metanosarcina</i>
Oxalat	Oxalat+H ⁺ → Format+CO ₂	<i>Oxalobacter</i>

respiration. En sammanfattning av oxidationsstadier för viktigare svavelföreningar anges i Tab.3. Sulfat (SO₄²⁻) utnyttjas av sulfatreducerande bakterier och slutprodukten vid sulfatreduktion är H₂S, som deltar i många viktiga biokemiska processer i naturen (Brock & Madigan, 1991). Organiska sulfider typ metyl- och butylsulfider bildas också, vilka liksom H₂S båda karakteriseras av obehaglig odör (Mengel & Kirkby, 1987).

Under vattenmättade betingelser uppträder oorganiskt S i reducerade former som FeS, FeS₂ (pyrit) och H₂S och av dessa är H₂S den mest betydelsefulla slutprodukten vid den anaeroba respirationen (Mengel & Kirkby, 1987). Fotosyntetiska bakterier har förmåga att oxidera H₂S till S genom att utnyttja vätet i H₂S för fotosyntetisk elektrontransport. Då denna process är begränsad, kan H₂S ackumuleras till toxiska nivåer och sålunda försämra plantornas tillväxt (Mengel & Kirkby, 1991). Om ferrojärn (Fe²⁺) å andra sidan är närvarande, bildas en svårlöslig sulfid enligt reaktionen:



Sulfider kan därför betraktas som icke varande toxiska, under förutsättning att tillräckliga mängder lösligt järn finns i marken (Vamos, 1964).

Tab. 3. Svavelföreningar samt deras oxidationsstadier. (Efter Brock & Madigan, 1991)

Förening	Oxidationsstadium
A. Oxidationsstadier för viktiga svavelföreningar	
Organiskt S (R-SH)	-2
Sulfid (H_2S)	-2
Elementärt S(⁰)	0
Tiosulfat ($S_2O_3^{2-}$)	+2
Tetrationat ($S_4O_6^{2-}$)	+2
Svaveldioxid (SO_2)	+4
Sulfit (SO_3^{2-})	+4
Svaveltrioxid (SO_3^{2-})	+6
Sulfat (SO_4^{2-})	+6
B. Några elektronmottagare, vilka används vid sulfatreduktion	
H_2	Propionat
Laktat	Acetat
Pyrovat	Butyrat
Etanol	Fettsyror
Fumarat	Benzoat
Malat	Indol

Sulfatreduktion under anaeroba betingelser ombesörjs huvudsakligen av bakterier tillhörande släktet *Desulfovibrio* (Ponnamperuma, 1972) och dessa bakterier utnyttjar syret i SO_4^{2-} som slutlig elektronmottagare.

Svavlets kretslopp i naturen beskrivs i Fig.11. Under reducerande betingelser produceras H_2S . Delar av svavelvätet kan frigöras till atmosfären och går då förlorat från marksystemet. Aeroba betingelser skiftar processen till förmån för SO_4^{2-} bildning.

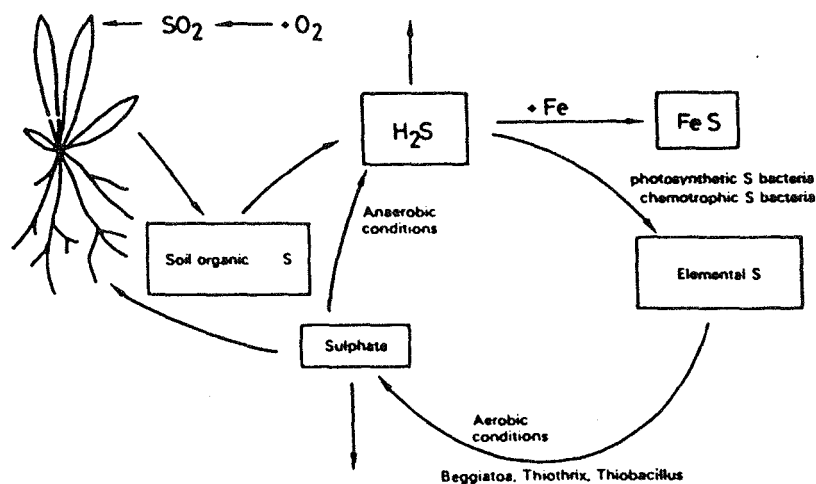


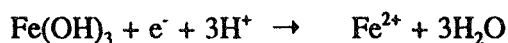
Fig. 11. Svavlets kretslopp i naturen. (Efter Mengel & Kirkby, 1987).

Järn och mangan. Järn (Fe) och mangan (Mn) är besläktade metaller som båda reduceras av flera olika bakterier under anaeroba förhållanden. Helt klarlagt är att dessa metaller tjänstgör som funktionella elektronmottagare i samband med generering av energi (Brock & Madigan, 1991).

Under vattenmättade markbetingelser reduceras ferrijoner (Fe^{3+}) till ferrojoner (Fe^{2+}). Denna reaktion utförs av många olika mikrober, varav vissa också har förmågan att reducera nitrat. I några fall kan dessutom samma enzym, nitratreduktas, delta i reduktionen av både nitrat och Fe^{3+} (Brock & Madigan, 1991). Reduktionen genomförs av anaeroba bakterier, vilka använder Fe-oxider som e^- acceptorer i respirationen (Munch & Ottow, 1983). En nära kontakt mellan bakterierna och Fe oxiderna krävs för att genomföra processen. Amorft järn företräds men även goetit, hämatit och lepidokrosit kan reduceras med hjälp av mikroorganismer (Ponnamperuma, 1972). Denna typ av Fe-reduktion är av speciellt intresse i risfält, där tämligen höga koncentrationer av Fe^{2+} kan uppträda med åtföljande toxiska symptom på risplantorna som följd. I jordar utsatta för anaeroba förhållanden utgör förhållandet mellan Fe^{3+} och Fe^{2+} en viktig parameter med hänsyn till grödans tillväxt. Denna kvot kan uppskattas genom beräkning av redoxpotentialen enligt ekvationen (Mengel & Kirkby, 1987):

$$E = 0.77 + 0.059 \log \text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$$

Under anaeroba betingelser reduceras trevärt järn till tvåvärt med en minskning av redoxpotentialen som följd enligt ovanstående ekvation. Järnhydroxid $\text{Fe}(\text{OH})_3$, ger upphov till Fe^{2+} enligt följande kemiska reaktion (Ponnamperuma, 1972):



Med hänvisning till ovanstående reaktion framgår det att reduktionen av Fe^{3+} till Fe^{2+} är förbunden med konsumtion av H^+ -joner och därmed en förhöjning av pH-värdet. Den motsatta situationen uppträder när syretillförseln ökar i marken - en pH-sänkning sker p g a oxidationen av Fe^{2+} till Fe^{3+} .

Skillnader i redoxpotential kan ofta observeras i samma markprofil. I djupare liggande jordlager, vilka normalt är mindre syresatta, är ofta Fe^{2+} fraktionen högre jämfört med den övre markhorisonten. Observationer av Wiklander & Hallgren (1949) visade att på ett djup av 2 m, mer än 90 % av lösligt järn fanns tillgängligt som Fe^{2+} . Sålunda faller redoxpotentialen vanligtvis räknat från de övre till de lägre horisonterna.

Mangan kan uppträda i många olika oxidationsstadier, av vilka Mn^{4+} och Mn^{2+} är mest stabila. Manganets kretslopp beskrivs i Fig.12. Manganets kretslopp i marken (Dion & Mann, 1946) visar att jämviktsläget mellan de olika Mn-formerna i hög grad påverkas av oxidations-reduktionsprocesser. Den viktigaste fraktionen med hänsyn till växternas manganförsörjning är Mn^{2+} .

Då Mn^{2+} -koncentrationen i marklösningen är avhängig av oxidations-reduktionsreaktioner, har alla faktorer som påverkar dessa processer inflytande på Mn-tillgängligheten (Mengel & Kirkby, 1987). Dessa faktorer inkluderar pH, humushalt, mikrobiell aktivitet, markfuktighet samt packningsgrad. Under vattenmättade betingelser, som t ex föreligger i risfält, dominerar reducerande förhållanden. Dessa mynnar i höga halter av Mn^{2+} , som t o m kan orsaka toxiska effekter på risplantorna (Tanaka & Yoshida, 1970). Efter det att risfälten blivit översvämmade sker en drastisk reduktion av marksyrenehållet och parallellt med detta ökar Mn^{2+} -halten kraftigt. I jordar med låga pH-värden och hög halt av aktivt mangan kan koncentrationen av Mn^{2+} lätt nå toxiska nivåer. I basiska jordar rika på kalcium eller natrium, sker ingen större förändring i Mn^{2+} -koncentrationen vid översvämning och på sådana jordar kan Mn-brist uppstå även under anaeroba betingelser (Randhava et al., 1978). Reduktionen av Mn^{4+} påverkas dock av både redoxpotentialen och pH.

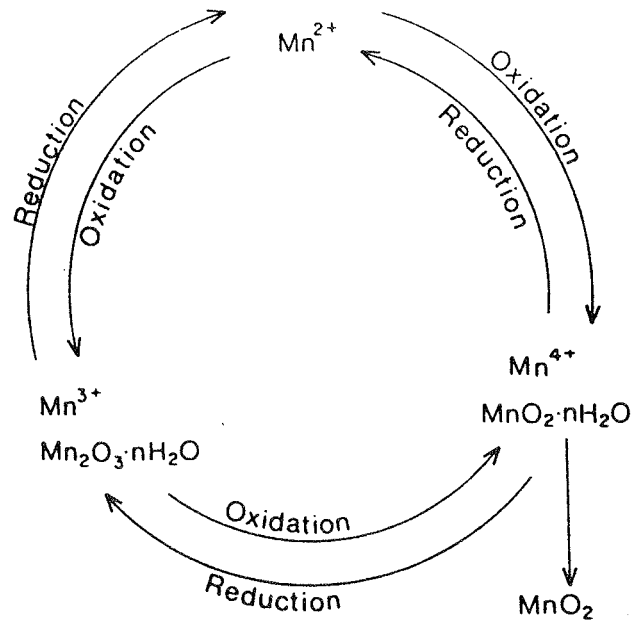


Fig. 12. Mangans kretslopp i marken. (Efter Dion & Mann, 1946).

Det betyder att Mn^{4+} kan reduceras även vid högt pH om redoxpotentialen är tillräckligt låg (G. Siman, pers. medd.)

KVÄVEFÖRLUSTER UNDER ANAEROBA FÖRHÅLLANDEN

Under anaeroba betingelser kan avsevärda mängder nitrat gå förlorat från marken både genom denitrifikation och urlakning. Den senare processen är oberoende av det partiella syretrycket i marken men då anaeroba jordar i praktiken oftast är vattenmättade, är det relevant att betrakta de två processerna förenat. En övergripande bild av kvävetransporten i naturen beskrivs i Fig.13.

Urlakning. Den mängd nitrat som urlakas är i viss mån beroende av markstrukturen (Russell, 1977). Nitrat är ju som bekant mycket lösligt i marklösningen och adsorberas inte till lerkolloiderna som t ex ammonium. Då vatten perkolerar fritt i större porer och sprickor medtransporteras nitrat, men nitrat som är löst i det vatten som finns i finare porer kan kvarhållas längre, vilket är viktigt för vissa jordar (Cunningham & Cooke, 1958). Sålunda är den mängd som urlakas inte bara beroende av nitratmängd i profilen och nederbördsmängd/intensitet utan också texturen. Förluster p g a urlakning har, beroende på jordart, beräknats till mellan 5 och 50 kg ha⁻¹ under engelska förhållanden (Cooke, 1976). Urlakningsproblematiken är nu föremål för intensiv forskning inte bara i Sverige utan även utomlands.

Denitrifikation. Oorganiska kväveföreningar är några av de mest vanliga elektronmottagarna vid anaerob respiration. En sammanfattning av viktigare sådana med deras oxidationsstadier kan ses i Tab.4. Av dessa utgör ammoniak och nitrat de viktigaste, även om kvävgas är den mest stabila kväveföreningen i naturen (Brock & Madigan, 1991).

Under anaeroba betingelser reduceras nitrat till flyktiga kväveföreningar som t ex N_2O och N_2 . Denna process som sker med hjälp av mikrobiell aktivitet benämns denitrifikation (Mengel & Kirkby, 1987). Denitrifikation definieras som mikrobiell reduktion av NO_3^- eller NO_2^- till kvävgas och kväveoxider. Processen äger rum under anaeroba förhållanden och kan beskrivas med följande ekvationer (Mengel & Kirkby, 1987):

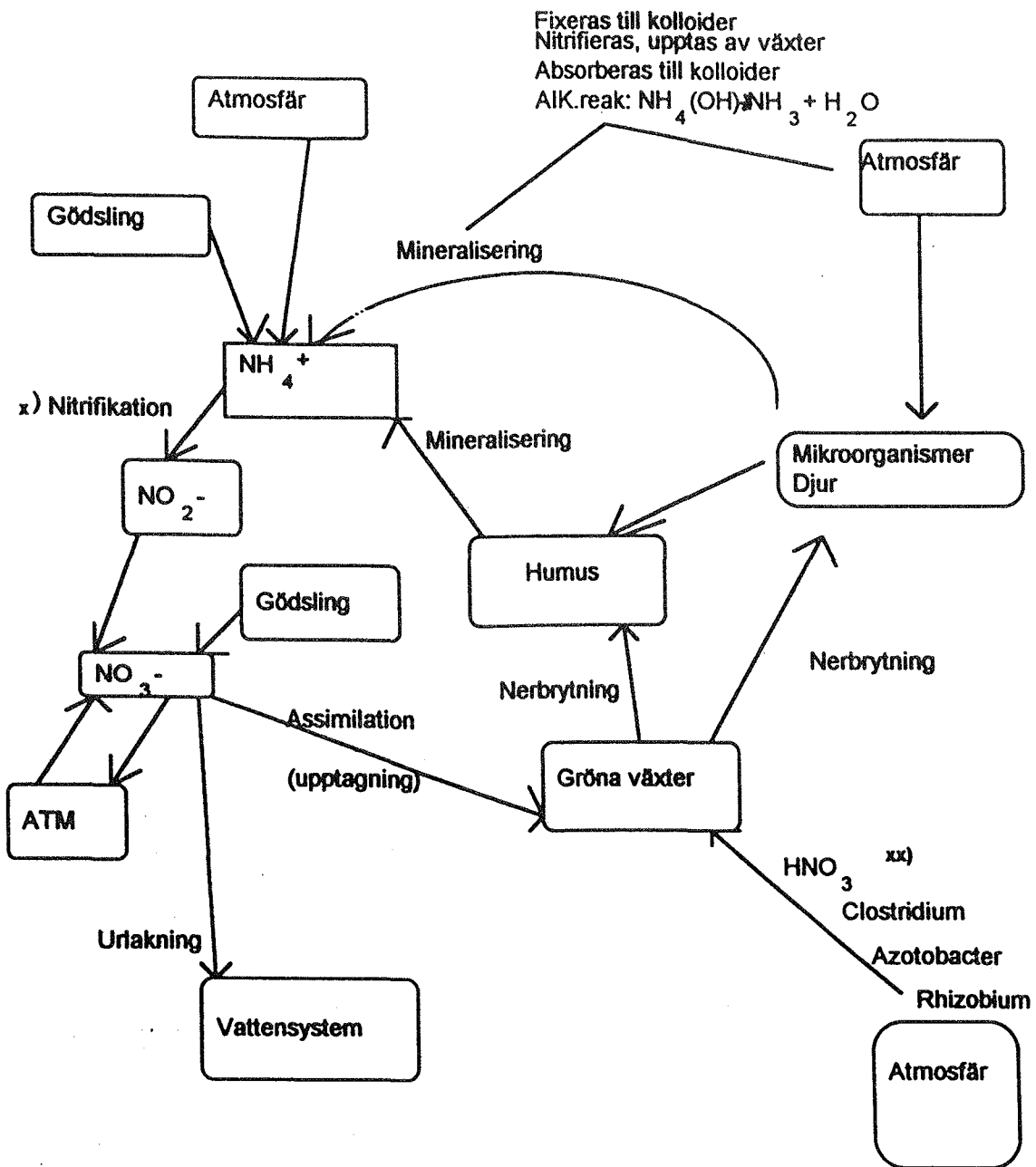
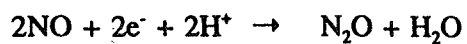
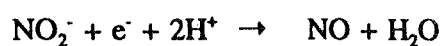
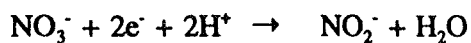


Fig.13. Kvävetts kretslopp i marken. * Nitrifikation: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$. ** HNO_3 : 10-15 kg N ha^{-1} (bilavgaser); Clostridium/Azotobacter: 10-15 kg N ha^{-1} ; Rhizobium: 150-400 kg ha^{-1} . (Efter Grath, 1994).



Reduktionen av NO_3^- till NO_2^- är också benämnd dissimilativ reduktion, vilken genomförs endast av bakterier till skillnad från assimilativ reduktion, som orsakas av växter, svampar och vissa bakterier (Fig.14) (Brock & Madigan, 1991). 23 bakteriesläkten är nu kända som har förmåga att denitrifiera NO_3^- och NO_2^- och viktigast av dessa är *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Azospirillum*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Thiobacillus* och *Rhizobium* (Firestone, 1982). Denitrifierande bakterier

Tab. 4. Oxidationsstadier av viktiga kväveföreningar (Efter Brock & Madigan, 1991).

Förening	Oxidationsstadium
Organiskt N (R-NH ₂)	-3
Ammoniak (NH ₃)	-3
Kvävgas (N ₂)	0
Dikväveoxid (N ₂ O)	+1
Kväveoxid (NO)	+2
Nitrit (NO ₂ ⁻)	+3
Kvävedioxid (NO ₂)	+4
Nitrat (NO ₃ ⁻)	+5

utnyttjar syret hos NO_3^- , NO_2^- och kväveoxider som e⁻ acceptorer i respiration istället för molekylärt O₂ som synes i ovanstående ekvationer. Det kväve som frigjorts under denna reduktionsprocess består huvudsakligen av N₂ och endast mindre än 5 % utgöres av N₂O (Rolston et al., 1976). Andelen N₂O kan dock vara relativt hög om stora mängder NO_3^- och NO_2^- är tillgängliga. Endast mycket små kvantiteter NO frigörs dock normalt. Denitrifikationen fortlöper speciellt snabbt under anaeroba förhållanden, framförallt då kolhydrater (halm, rötter mm) är tillgängligt för de denitrifierande bakteriernas energibehov. Processen gynnas också av hög temperatur och neutralt pH.

Vid den dissimilativa reduktionen bildas som slutprodukter N₂ eller N₂O. Detta är det huvudsakliga sättet på vilket N₂ bildas på biologisk väg och eftersom N₂ är mycket mindre tillgängligt för organismerna jämfört med nitrat, orsakar denitrifikationen N-förluster.

Nitratreduktas, d v s det enzym som är involverat vid det första steget av nitratreduktionen, är ett molybdeninnehållande enzym. Eftersom O₂ inhiberar syntesen av dissimilativt nitratreduktas utgör denitrifikationsprocessen en strikt anaerob process (Brock & Madigan, 1991), emedan assimilativ nitratreduktion däremot kan genomföras under aeroba betingelser. Assimilativ nitratreduktion sker i alla växter och i de flesta svampar, liksom hos en del bakterier, medan dissimilativ nitratreduktion är begränsat till enbart bakterier (Brock & Madigan, 1991).

Den första produkten vid nitratreduktion utgöres av nitrit, NO₂⁻, och ett annat enzym, nitritreduktas, ansvarar för nästa steg. I den dissimilativa processen finns två vägar tillgängliga, en som ger upphov till ammoniak och en till N₂. Produktionen av kvävgas går via två intermediära gasformer av N, NO och N₂O. Flera organismer är kända, vilka bara producerar N₂O under denitrifikationsprocessen, medan andra organismer enbart producerar N₂ (Brock & Madigan, 1991).

Stora mängder N kan förloras från marken p g a denitrifikation. Woldendorp (1968) anger att 10-40 % av tillfört gödselkväve på vallar på så sätt kan denitrifieras. Enligt Allison (1966) kan mellan 5 och 50 % av tillfört gödselkväve avdunsta genom denitrifikation. Russell (1977) anger motsvarande mängder från obetydliga till approx. 20-45 %. Även under aeroba markbetingelser kan förluster ske p g a att syret normalt ej är jämnt fördelat i marken- vissa delar av profilen kan

innehålla anaeroba zoner (Woldendorp, 1968). Greenland (1962) visade i sina undersökningar, att denitrifikation och nitrifikation kan uppträda samtidigt i vattenmättade jordar, då dessa kan innehålla både anaeroba och aeroba zoner.

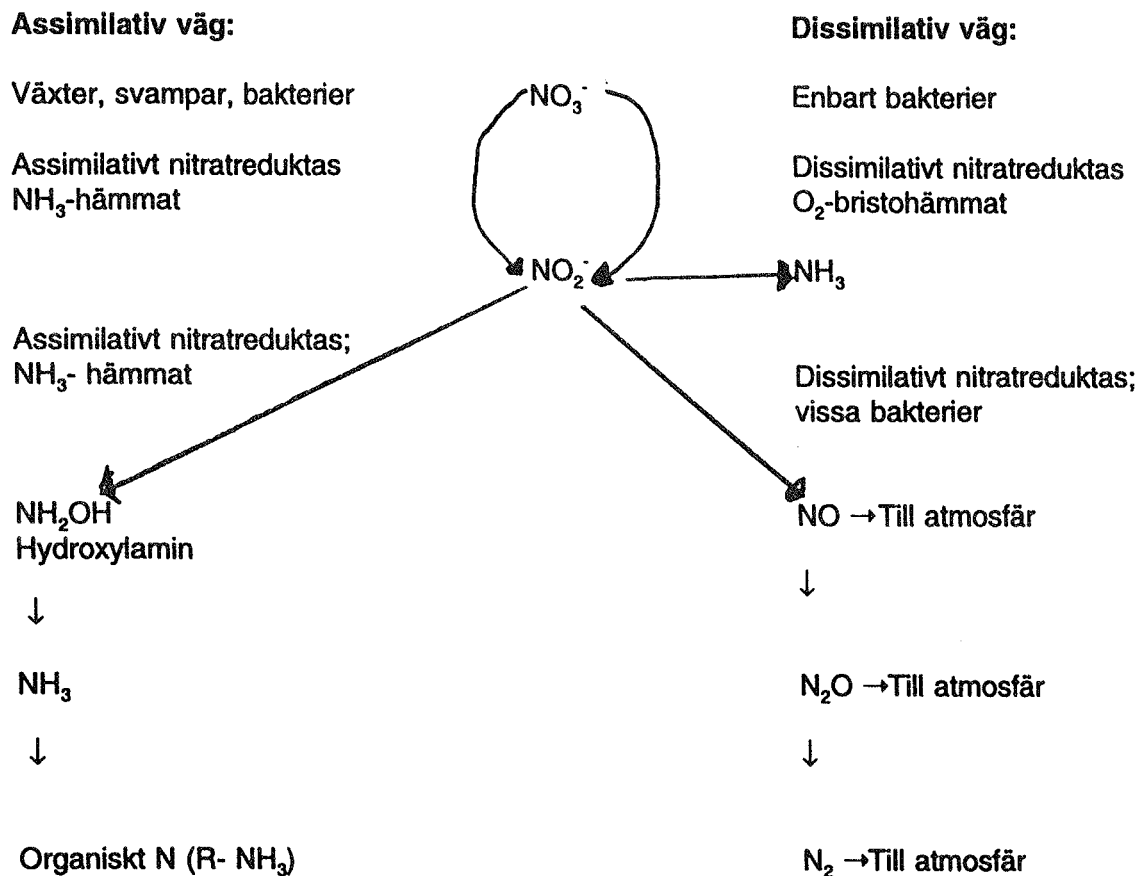


Fig.14 Jämförelse mellan assimilativa och dissimilativa processer vid reduktion av nitrat. (Modifierad efter Brock & Madigan, 1991).

Denitrifikationen kan bli särskilt hög om regn faller strax efter tillförseln av kvävegödsel (Webster & Dowdell, 1982). I översvämmade risfält kan ammonium oxideras till NO_3^- i det oxiderade övre skiktet och i den aeroba rhizosfären som omger risrötterna (Reddy et al., 1976). I översvämmade jordar diffunderar en del ammonium till de aeroba zonerna (Reddy & Rao, 1983). Mot bakgrund av detta skall dessa jordar ej förses med nitrat, utan endast med $\text{NH}_4\text{-N}$. Vid låga pH-värden ($\text{pH} < 4.5$) är denitrifikation i princip totalt inhiberad.

Temporära fluktuationer i denitrifikationsintensitet i marken är huvudsakligen avhängigt av marktemperaturen och vattenhalten (Ryden, 1983), men även av växternas tillväxt (Stefanson, 1972), inblandning av växtrester och jordbearbetning (Aulakh, et al., 1984). Nitratkoncentrationen kan vara begränsande, dock enbart vid mycket låga koncentrationer (Yoshinari et al., 1977). Skillnader mellan jordarter med hänsyn till potentiell denitrifikation beror på mullhalt (organiskt C) (Reddy et al., 1982), textur (Sextone et al., 1985) och dräneringskapacitet (Groffman et al., 1984). Aggregat- och porstorleksfördelning utgör förmodligen avgörande faktorer då dessa bestämmer volymen av anaeroba zoner i marken (Smith, 1977).

Flera av dessa parametrar påverkas av växtodlingens inriktning och en bättre förståelse av hur olika växtodlingsåtgärder påverkar denitrifikationen är nödvändig för att minimera förluster av

gödselkväve via denitrifikation. Bearbetning med tunga maskiner på våta jordar har visat sig öka aggregatstorleken och jordens skrymdensitet med en åtföljande skördereduktion samt kärnor med låg 1000-kornvikt (Njøs, 1978). Det har också visat sig att packning av marken resulterar i reducerad redoxpotential (Horn, 1985). Sålunda kommer packning av marken att resultera i ökad denitrifikation.

Undersökningar visar att denitrifikationen generellt är lägre på sandjordar jämfört med lerjordar (Tab.5). Dilz & Woldendorp (1960) fann att denitrifikationsförluster var särskilt höga vid stor rotvolym i marken. Man har antagit att rotexudat stimulerar tillväxten av denitrifierande bakterier och på så vis följaktligen ökar denitrifikationsprocesserna. Detta stöds av arbeten av Trolldenier (1973), som med experiment i näringslösningar med ris fann förhöjd mikrobiell aktivitet i rhizosfären, vilket resulterade i minskat syreinhåll i rotmediet och följaktligen förbättrade möjligheter för denitrifikation.

Av ovanstående diskussion framgår att denitrifikationen och därmed förlusterna av kväve är av stor betydelse under anaeroba betingelser. Enligt Werner (1980) spelar denitrifikationen en betydande roll i kväveomsättningen, sett ur ett globalt perspektiv, vilket illustreras i Tab.6, som anger data angående N- cirkulationen mellan atmosfären och marken.

Generellt måste man betrakta kväveavgången från marken till atmosfären som en förlust av ett mycket viktigt växtnäringsämne. Å andra sidan denitrifieras betydande mängder NO_3^- i samband med perkolationen i djupare profillager, vilket decimerar kväveläcket till grundvattnet (Kolenbrander, 1972). Denitrifikation kan således vara en gynnsam process för att förhindra miljöstörningar p g a NO_3^- -utlakning.

Ett risfält - ett extremt exempel på anaeroba betingelser

Ett utmärkt exempel på hur kemiska och mikrobiologiska interaktioner uppträder under extremt anaeroba förhållanden utgör ett risfält översvämmat med vatten. Vid risodling är markytan täckt

Tab. 5. Kväveförluster p g a denitrifikation från olika jordarter beväxna med permanenta vallar. (Efter Dilz & Woldendorp, 1960).

Jordart	N-förlust i % av tillfört N
Sand	11-25
Lera	16-31
Mulljord	19-40

Tab. 6. Global kväveomsättning mellan mark och atmosfär (10^6 t år^{-1}). Efter Werner (1980).

	Vinst		Förlust
Industriell produktion	46	Denitrifikation	200-300
Biologisk N-fixering	100-200	NH_3 -avdunstning	165
$\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ -nedfall	60		
NH_3 -nedfall	140		
Primärproduktion på land (netto)	2000		
Primärproduktion i hav (netto)	2000		

med vatten till ett djup av ca 2-3 cm. Strax efter översvämningen inträder anaeroba förhållanden och en specifik sekvens av reaktionssteg kan observeras. Dessa kan generellt indelas i två stadier. Dessa två stadier samt de individuella stegen visas i Tab.7. Anaerobi börjar med avlägsnandet av O_2 och den mikrobiella reduktionen av NO_3^- till N_2O och N_2 . Mn^{3+} och Fe^{3+} reduceras därefter till Mn^{2+} och Fe^{2+} som följd av en mindre minskning av redoxpotentialen. Fe^{3+} -reduktionen är till största delen en biologisk process, som ombesörjes av mikroorganismer vilka använder ferrioxider som e^- -acceptorer för sin respiration (Munch & Ottow, 1983). Fe^{3+} -reduktionen utgör en analog process till nitratreduktionen i vilken NO_3^- utnyttjas som e^- -mottagare i den bakteriella respirationen. Detta första reduktionsstadium är inte skadligt för risplantorna under förutsättning att Fe^{2+} - och Mn^{2+} -koncentrationerna inte når toxiska nivåer. Det andra reduktionsstadiet är förenat med en kraftig sänkning av redoxpotentialen, vilket indikerar att reducerande substanser har producerats. Under detta stadium reduceras sulfat till sulfid och vid ännu lägre redoxpotentialer bildas vätgas och metan. Ackumulering av andra toxiska substanser sker också, bl a av smörsyra och fettsyror. Russell (1973) anger att koncentrationer av 10^{-2} M ättiksyra och 10^{-4} M smörsyra kan vara skadligt för risplantorna och då samtidigt rikligt med organiskt substrat tillförts jorden, kan dessa koncentrationer överträffas till den grad att risodling ej är genomförbar innan dessa syror har avlägsnats genom urlakning eller nedbrytning.

Det andra stadiet (Tab.7) bör undvikas vid risodling. Jordar som tillförts organisk substans eller som naturligt har hög mullhalt är utsatta för låg redoxpotential p g a att hög humushalt befrämjar tillväxten och metabolismen av anaeroba mikroorganismer (Ponnamperuma, 1965). Låga redoxpotentialer kan leda till mycket höga Fe^{2+} koncentrationer vilka är skadliga för

Tab. 7. Olika steg beskrivande den mikrobiella metabolismen i en vattenmättad risjord. (Efter Takai et al., 1957).

Steg	Huvudreaktion	Initial redoxpotential
Första stadiet		
1	O_2 försvinner	+0.6 - +0.5
2	Nitratreduktion	+0.6 - +0.5
3	Mn^{2+} -bildning	+0.6 - +0.5
4	Fe^{2+} -bildning	+0.5 - +0.3
Andra stadiet		
5	Sulfidbildning	
	Sulfatreduktion	0 - -0.19
6	H_2	-0.15 - -0.22
7	CH_4 -bildning	-0.15 - -0.19

risplantorna. Enligt Trollenier (1973) karaktäriseras en risgröda som lider av för höga Fe^{2+} koncentrationer (290-1000 mikrogram g^{-1} TS), likaväl som höga Mn koncentrationer (1000 mikrogram g^{-1} TS) av en sjukdom benämnd "suffocation disease". Omfattningen av denna sjukdom beror av risrötternas förmåga att gynna oxidationen, som är ett resultat av utsöndring av O_2 via kärlsystemet, vilket inducerar en förhöjning av redoxpotentialen i rhizosfären och sålunda en minskning av Fe^{2+} koncentrationen (Trollenier, 1973). Fe^{3+} utsöndras delvis som oxider på rotytan vilket ger upphov till rödbruna rötter. Denna färg indikerar friska rötter. Under anaeroba förhållanden utfälls FeS på rotytan och rötterna antar då en mörk färg, vilket åskådliggörs i Fig.15. Fig.16 visar en karakteristisk markprofil i en jord odlad med ris. Det översta markskiktet består av en tunn zon med ett maximalt djup av 1 cm. Detta ytskikt benämns det oxiderade lagret

eftersom aeroba betingelser råder p g a det syre som härstammar från atmosfären. Lagret har en rödaktig färg, eftersom Fe huvusakligen är närvarande som Fe^{3+} . Även redoxpotentialen ($> + 0.4$ V) samt det faktum att kväve är närvarande som NO_3^- antyder att oxiderande betingelser råder. Underliggande lager är djupare och är p g a anaerobi blågrått till färgen då Fe här föreligger som Fe^{2+} . Det är inom detta lager som NO_3^- , vilket härstammar från det oxiderade skiktet, reduceras till N_2 eller kväveoxider. Då dessa föreningar är flyktiga kan de gå förlorade från systemet. P g a detta rekommenderas ej nitratgödselmedel till ris (Matsubayashi et al., 1963). Även ammoniumkväve kan förloras p g a nitrifikation och denitrifikation (Patric & Reddy, 1977). De visade att NH_4^+ kan diffundera från det djupare lagret till ytskiktet, där det kan oxideras till NO_3^- . Om detta NO_3^- transporteras tillbaka till det reducerade djupare skiktet kan det denitrifieras och sålunda gå förlorat.

Översvämning av risjordar påverkar också tillgängligheten av andra växtnärsämnen än kväve



Fig. 15. Övre delen, normala risrötter som växer under optimal redoxpotential; nedre delen, risrötter påverkade av alltför låg redoxpotential. Notera att laterala rötter är täckta med en svart yta av FeS . (Efter Mengel & Kirkby, 1987).

(Ponnamperuna, 1978). Fosfattillgängligheten ökar, vilket delvis beror på sönderdelningen av ockluderade fosfater i samband med reduktionen av Fe^{3+} till Fe^{2+} på järnoxidens yta och delvis på hydrolys av $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Koncentrationen av lösliga kationer stiger som ett resultat av kationutbyte, inducerat av Fe^{2+} och Mn^{2+} . Svavelväte som produceras under reducerande förhållanden bildar utfällningar (sulfider) med Fe, Cu, Zn och Mn och påverkar på så sätt tillgängligheten hos dessa växtnäringsämnen. Genom bildningen av FeS skyddas plantorna från toxiska nivåer av Fe^{2+} . Bildningen av sulfider har dock ingen större inverkan på svaveltillgängligheten eftersom sulfiderna kan oxideras i rhizosfären av bakterier (Ponnamperuma, 1972). Som nämnts tidigare, resulterar översvämning i en pH-förhöjning. Kalk- och natriumrika jordar reagerar dock tvärtom, vilket beror på koldioxidens benägenhet att gå i lösning (Mengel et al., 1987). Höga ackumulationer av CO_2 kan vara toxiska för risplantorna (Cho et al., 1971). Enligt Mikkelsen et al. (1978) ändras pH i marken på ett dygnsrytmiskt sätt. Höga pH-värden, upp till pH 10, kan avläsas under dagen, medan under natten pH normalt sjunker med ca 2 enheter. Förklaringen till det höga pH värdet under dagen anses ligga i CO_2 upptagning vid fotosyntes hos alger. Sådana höga pH-värden under dagen kan leda till stora förluster av NH_3 , speciellt vid kraftig vind och hög temperatur (Savant & DeDatta, 1982).

MORFOLOGISKA OCH FYSIOLOGISKA EFFEKTER AV ANAEROBI

Olika grödor varierar vitt i sin känslighet med hänsyn till skador som uppkommer under anaeroba betingelser. Även utvecklingsstadiet hos plantan har betydelse för skadans utbredning (Russell, 1973). Hos känsliga arter kan skadesymtom uppstå redan hos

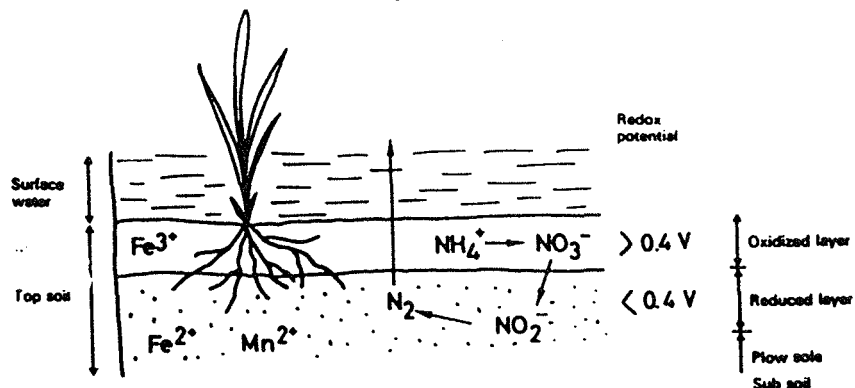


Fig. 16. Markprofil, översvämmad risjord. (Efter Matsubayashi et al., 1963).

ungplantorna, vilka kan uppvisa skador både på rötter och skott. Inom endast några timmar kan bladen vissna och uppvisa epinasti (nedåtgående krökning av bladskaften) (Fig.17). Bladen



Fig. 17. Utveckling av epinasti hos tomatskott (*Lycopersicum esculentum*). (Efter Russell, 1977).

uppvisar kloros och för tidig naturlig vissning samt reducerad skottsträckning och rottillväxt (Erickson & van Doren, 1961). Kortare exponering, ca ett dygn, kan ibland leda till permanent reduktion av planttillväxten och längre sådan kan orsaka plantans död. Under förutsättning att plantan överlever anaerobi, kan morfologiska förändringar uppträda, t ex utveckling av aerenkym i rötterna (Briant, 1934).

Övergången från aerob till anaerob metabolism mynnar ofta i produktion av etanol enligt Crawford (1967). Han fann också att etanolkoncentrationen var högre i känsliga plantor, detta p g a förhöjd aktivitet av alkoholdehydrogenas.

Allteftersom forskningen framskridit har ökad uppmärksamhet riktats åt hormonella mekanismer i samband med anaerobi. Koncentrationsminskning av gibberiliner i xylemsaften och i rötter och skott hos tomatplantor har beskrivits av Reid & Crozier (1971). Burrows & Carr (1969) visade att transporten av cytokininer till skotten kunde begränsas under anaeroba förhållanden. Det finns också belägg för medverkan av auxin (Phillips, 1964b). Dess koncentration i skotten ökar vid utvecklingen av epinasti. Också produktionen av abskicinsyra ökar i skotten, vilket man anser beror på begynnande vissning (Wright & Hiron, 1972).

Frånsett ovannämnda växthormoner, anses etylen vara den endogena tillväxsubstant, vilken har störst betydelse under anaeroba betingelser. En markant koncentrationsökning sker av denna substans hos känsliga plantor (Jackson & Campbell, 1976a) (Tab.8). Vid lågt syreförråd i marken ökar koncentrationen av etylen i bladen, liksom omfattningen av epinasti.

Tab. 8. Effekter av vattenmättnad under 4-5 dygn på koncentrationen av etylen i plantskott av olika arter (ppm i gasfasen). (Efter Jackson & Campbell, 1976b)

	Tomat	Ärt	Åkerböna	Trädgårdsböna
Vattenmättad	1.17	0.93	0.50	1.36
Kontroll	0.34	0.25	0.37	1.08



Fig. 18. Ärtor (*Pisum sativum*) vilka odlats i väl luftad jord (C) eller utsatts för vattenmättnad under 5 dagar vid följande utvecklingsstadium: (T1)- tidig vegetativ tillväxt (47), T2- strax före blomning (7), T3- blomning (24), T4- baljfullnad (30). Siffrorna inom parentes anger skörd av ärtorna uttryckt som procent av (C). T1 plantorna var friska medan T2-T4 plantorna avdog innan mognad. (Efter Cannell et al., 1976).

Tillfällig vattenmättnad

Förutom under exceptionella omständigheter, t ex vid risodling, är problem orsakade av anaeroba markbetingelser huvudsakligen av övergående natur. Marken kan således vara mer eller mindre vattenmättad under kortare eller längre perioder, då nederbörden är hög och evapotranspirationen låg; under andra perioder kan vattenbrist föreligga.

De skador som tillfällig vattenmättnad av marken kan orsaka på grödan, beror till stor del på under vilket utvecklingsstadium plantan utsätts för anaerobi (Fig.18). Groende frön betraktas allmänt som särskilt känsliga, eftersom dessa är totalt beroende av omgivande syre. Skador på groddplantor i vattenmättade jordar intensifieras vid närvaro av organiskt substrat som är mättat med vatten (McCalla & Norstadt, 1974). Olika grödor är också känsliga vid olika utvecklingsstadier, t ex visar det sig att skörden av spannmål särskilt reduceras om vattenmättnad föreligger under plantans reproduktionsfas. Erickson & van Doren (1961) gjorde liknande konklusioner för ärter. Å andra sidan uppvisar majs särskild känslighet tidigt under vegetationsperioden (Lal & Taylor, 1967).

EFFEKTER AV MARKPACKNING PÅ ROTTILLVÄXT, PLANTUTVECKLING, VÄXTNÄRINGSUPPTAGNING OCH SKÖRD

Monokotyledoner och dikotyledoner förutom ärter

Effekter av packning på växtnäringssupptagningen hos olika grödor har undersökts i betydligt mindre grad än tillväxt och skörd. Medan packningen som sådan skulle kunna tänkas öka jonupptagningen genom ökad diffusion (Kemper et al., 1971), visar det sig istället att rottillväxten vanligtvis begränsas som följd av att mindre mängder växtnäringssämnen tages upp från en starkt packad än från en ur tillväxtskympunkt optimalt packad matjord (Boone & Veen, 1982). Det har dock visat sig att då delar av rotsystemet (t ex huvudrötter) utsätts för ogynnsamma förhållanden, kan tillväxten av andra delar (t ex sidorötter) förbättras (Crosset et al., 1975). Således behöver en överoptimal packning inte nödvändigtvis resultera i en minskning av den totalt upptagna mängden växtnäring.

Undersökningar som genomförts med hänsyn till samspel mellan packning - växtnäringssupptagning - skörd hos mono- och dikotyledoner under de senaste 20 åren har nyligen behandlats i en litteratustudie (Grath, 1993) samt i (I), (II) och (III), varför här enbart hänvisas till dessa publikationer.

ÄRTER

Klimatkrav

Trots det faktum att ärter härstammar från Mindre Asien kräver de ej speciellt höga sommartemperaturer. Detta beror på att deras gencentrum är lokaliserat till tämligen höga altituder. Normalt kräver ärterna en julimedeltemperatur av ca 20° C för att ge maximal skörd. Alltför låga somarmedeltemperaturer medför förlängd vegetationsperiod och sämre blomsättning samt ojämn mognad. Ärter är under groningen relativt toleranta mot låga temperaturer och har förmåga att motstå frost under groddplantstadiet (Askerblad et al., 1984). De besitter sålunda en hög köldhärdighet och kan gro redan vid + 1° C, vilket gör tidig sådd möjlig.

Beträffande ärternas behov av nederbörd, är situationen något mer komplicerad. Ärter kräver tillförsel av måttliga mängder regn. Under torra år blir rotdjupet den begränsande faktorn och följaktligen blir grödan sämre utvecklad med lägre skörd som följd. Tvärtom under nederbördsintensiva år, kommer ärtgrödan att lida av kvävningsskador p g a syrebrist i marken och

speciellt i samband med överoptimal packning och infektion av ärtrotörta inhiberas N-fixeringen drastiskt med låga skördenivåer som följd (I, II, III). Enligt Berglund (1957) avkastar ärter i Sverige optimalt då nederbörds mängden under de två första månaderna efter sådd uppgår till ca 100 mm i kombination med normal fördelning (Fig.19). Ärter är mycket känsliga för höga regnmängder, inte bara under blomningen, utan även under mognadsförloppet. Skördarbetet kompliceras på vissa sorters krypande växtsätt med baljor nära markytan, baljor spricker upp med drösning som följd och frön attackeras av svampar eller förtärs av framförallt duvor (Pers. observation).

Krav på jordart och pH

Ärter trivs i allmänhet bäst på väl-dränerade, genomsläppliga jordar, som dessutom inte är alltför styva. Försök med ärter på olika jordarter (Bingefors et al., 1979) visar en högre genomsnittsskörd av ärter odlade på lättlera, mo- och sandjordar än på styvare jordar. Den främsta orsaken till detta är enl. Kristenson (1987), att ärterna är känsligare än stråsäd för

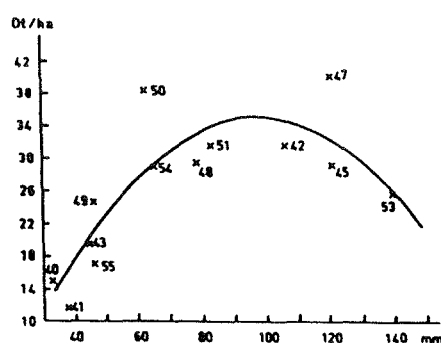


Fig. 19. Samband mellan skörd och nederbörd 60 dagar efter sådden för Parvus foderärt (Efter Berglund, 1957).

packningsskador och syrebrist, särskilt under år då vårbruket genomföres under våta förhållanden med packningsskador som följd. Egentliga mulljordar, där bestånden får en mycket frodig utveckling och sen mognad, är liksom torra sandjordar mindre lämpliga för ärtodling. Av erfarenhet vet man att ärter trivs tämligen väl på jordar med pH värden ner till ca 5.5-6.0 (Bingefors et al., 1979).

Som tidigare nämnts, visade en litteraturstudie (Grath, 1993), att endast tämligen få undersökningar har publicerats med hänsyn till upptagning av växtnäring i packade jordar. Detta var särskilt utmärkande för leguminosor och då framförallt ärter. Publikationer med inriktning på kombinationseffekter av markpackning, växtnäringupptagning och rotörter hos baljväxter var sällsynta. Några sådana publikationer hittades dock (Grath, 1993); (I), (II), (III).

ROTSJUKDOMAR PÅ ÄRTER

Inledning

Enligt Bödker & Larsson (1993) har rotsjukdomar fått allt större betydelse där inslag av ärter har blivit mera vanligt i växtföljden. Ärter är mycket känsliga för angrepp av rotpatogena svampar och även små öknningar i sjukdomsangreppet kan medföra stora skördeminskningar. När ärtplantornas rötter är angripna, men växer i fuktig jord ser man ofta inte några ovanjordiska symptom förutom en aning sämre tillväxt. Blir det sedan torrare i marken börjar plantorna snabbt gulna och vissna.

Gulfärgning av ärterna anses därför ofta felaktigt bero på ogynnsam väderlek.

Rot- och stjälbassjukdomar på ärter orsakas av ett komplex av flera jordbundna svampar. Ofta förekommer flera av dessa svampar samtidigt på rötterna.

ÄRTROTTRÖTA

Ärtrottröta (eng. *Aphanomyces* root rot eller common root rot), utgör globalt en av de mest destruktiva sjukdomarna på ärter (Hagedorn, 1984). Den uppträder bl a i ärtodlingsområdena i Nordamerika, Nordeuropa, Australien, Nya Zeeland och Japan. I USA är sjukdomen mest skadegörande i Great Lakes- området och i de nordöstra staterna, där medelförluster p g a sjukdomen årligen uppskattas till 10 %, men där sjukdomen på lokala fält ej sällan orsakar totalförlust (Hagedorn, 1984).

Aphanomyces identifierades som orsak till "common root rot" år 1925, fastän sjukdomen med all säkerhet fanns redan tidigare. Sedan 1925 har stora forskningsresurser lagts ner för att bemästra sjukdomen, men metoderna, vare sig kemisk bekämpning, olika växtodlingsåtgärder eller resistensförädling, har härvidlag ej varit speciellt framgångsrika (Hagedorn, 1984).

Ärtrottröta orsakad av *Aphanomyces euteiches* är den allvarligaste sjukdomen på ärter i Norden (Bödker & Larsson, 1993). I Sverige påvisades *Aphanomyces euteiches* som orsak till ärtrottröta först inom konserv- och frysärtodlingsområdet i Skåne (Olofsson, 1967). I mitten av 1970-talet gjordes en orienterande undersökning i Mellansverige. Ärtrottrötan befanns då vara av betydelse i flera områden med intensiv ärtodling (Olofsson, 1967). I samband med en större inventering 1984 i södra och mellersta Sverige påträffades svampen i 35-75 % av proven. På kartan i Fig.20 har områden med känd förekomst av svampen markerats.

I vissa starkt smittade ärtfält kan svampen orsaka svåra skörde förluster och då överoptimal

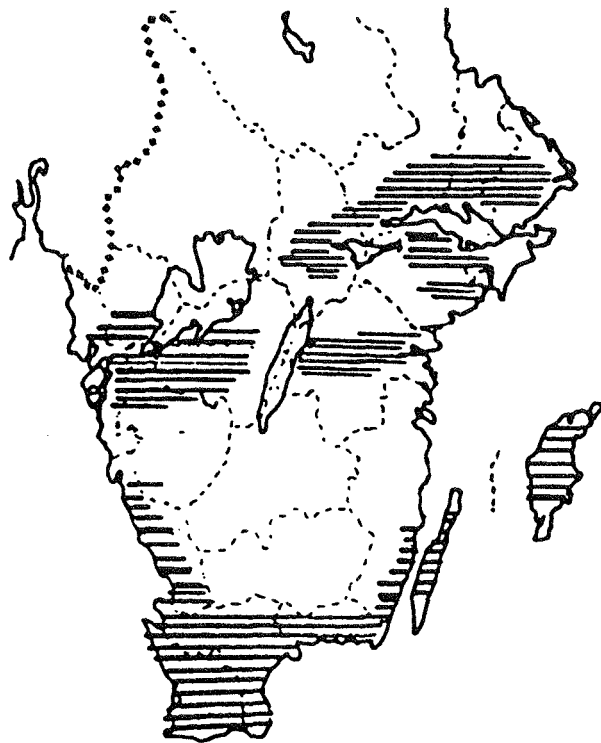


Fig. 20 Känd förekomst av svampen *Aphanomyces euteiches*. (Efter Engqvist, 1985).

packning samt hög markfuktighet samtidigt föreligger kan totalförlust av grödan förekomma. Detta var vanligt i Halland under de nederbördsrika somrarna 1990 och 1991 (I; II). Eckerbom (1985) anger skördeförstär på 50 % eller mer i kraftigt infekterade fält i Sverige. Han noterar också att strukturskador och syrebrist i de flesta fall rapporterats som orsaker men att svampens närvaro oftast negligerats.

A. euteiches är en oomycet eller algsvamp, som är beroende av vatten för sin spridning. Två typer av sporer bildas; tjockväggiga vilsporer (oosporer) och svärmosporer (zoosporer). Oosporerna kan leva kvar i jorden upp till 15 år. När ärter odlas gror oosporerna antingen genom att bilda mycel som angriper roten, eller genom att utveckla svärmosporer, som har förmåga att aktivt simma mot ärtplantans rötter och angripa växten (Bödker & Larsson, 1993).

Hög markvattenhalt är viktig för utvecklingen av *Aphanomyces* och detta i kombination med packning förstärker skadebilden (Burke et al., 1969). Indikationer tyder på att omfattningen av rotrotan ökar i packade jordar, därför att rötterna är oförmögna att penetrera det infekterade övre markskiktet och på så sätt får svårt att tränga ner i djupare lager i profilen (Miller & Burke, 1974). Det har visat sig att plantorna vid höga infektionstryck uppvisar mindre skadesymptom under gynnsamma strukturförhållanden än under förhållanden med packade marklager (Burke & Kraft, 1974). Detta kan tillskrivas två omständigheter; antingen att infektionsgraden är mycket lägre djupare ner i profilen eller att plantorna har förmåga att kompensera svampskadan p g a att deras rotyta ökar under opackade förhållanden (Miller & Burke, 1974) eller kanske det är en kombination av båda omständigheterna (pers. komm.).

Initialt efter angreppet missfärgas rotsystemet svagt gulaktigt till halmfärgat, men mörknar sedan p g a angrepp av sekundära svampar. Rötan kan nå ett par centimeter över markytan. Svampens mycel bryter ner kortax och när man drar upp en kraftigt infekterad planta ur jorden finns oftast endast kärsträngarna och stelen kvar (Bödker & Larsson, 1993). Det skadade rotsystemet har svårt att tillgodose plantans behov av vatten och näringsämnen, varför de nedre bladen gulnar först och vid starka angrepp gulnar hela plantan och vissnar i förtid. Symptomen uppträder först fläckvis men kan senare spridas till stora delar av fältet (Bödker & Larsson, 1993). Rotrotan ger upphov till torkkänslighet hos ärtplantan och svampen hämmar också etableringen av baljväxtbakterierna och vid höga infektionstryck förstörs även knölnarna, vilket bl a leder till lägre proteinhalt i fröet (Engqvist, 1985).

Andra typer av svampsjukdomar på ärter behandlas ej här, då de har mindre relevans under anaeroba betingelser.

ÅTGÄRDER FÖR ATT BEKÄMPA JORDBURNA SVAMPAR (Modifierat efter Engqvist, 1986 samt Bödker & Larsson, 1993).

Som tidigare nämnts finns det ingen effektiv metod för att bekämpa jordburna svampar i ärter. Man får inrikta sig på att försöka undvika sjukdomarna och integrera olika förebyggande odlingsmetoder.

Motåtgärder

Ärter är känsliga för strukturskador, vilket man brukar kunna se på vändtegen, där en sammanpackning av jorden ofta leder till synlig missväxt. Om tunga maskiner har använts är det också risk för att en plogsula har bildats. Svampen främjas av hög markfuktighet varför det är viktigt med väldränerade fält i god struktur. Sorter med höggradig resistens mot ärtrotta finns ännu inte, varken av foder-, kok-, konserv- eller frysärter. Vissa sortskillnader i mottaglighet förekommer dock. En viss grad av resistens finns i amerikanskt sortmaterial, men ännu har inga

höggradigt resistent sorter förädlats fram.

En viktig motåtgärd i odlingsjorden är att låta bestämma smittograden av ärtrotörta och sedan anpassa växtföljden härefter. En metod som gör det möjligt att uppskatta fältets infektionsgrad har därför utarbetats. Metoden går i stort ut på att jordprover tages från det aktuella fältet året innan ärter skall odlas. Provodling sker i växthus under reglerade klimatiska betingelser varefter angreppsgraden avläses. Plantorna klassas i olika sjukdomsklasser och med hänsyn till hur många plantor som kommer i varje klass räknas ett sjukdomsindex ut. Enligt tillgängliga erfarenheter kan fält vars jordprover uppvisar ett index enligt Svalöf Weibull-modellen mellan:

0-30 relativt säkert odlas med ärter

31-50 med tveksamhet odlas med ärter

51-100 anses som definitivt farliga. Dessa fält skall inte odlas med ärter

Om ärter odlats de senaste 5-6 åren på fält med index 31-50, bör ärtodling undvikas.

Att hålla en växtföljd om 6-8 år mellan ärtgrödorna är i sig ingen tillräckligt säker åtgärd. Vid kraftiga infektioner kan man förmodligen inte framgångsrikt odla ärter de närmaste 12-15 åren.

Gröngödsling med vissa korsblomstriga växter har i utländska försök resulterat i minskat angrepp av ärtrotörta. Vid nedbrytning av korsblomstriga växter bildas lättflyktiga svavelhaltiga ämnen, som tjänstgör som fytotoxiner. Nedbrytningsprodukterna omfattar bl a dimetylsulfid och metylisotiocyanat. Den senare är också en nedbrytningsprodukt av fungiciden dazomet, som är aktiv mot ärtrotörta, men som inte kan användas av kostnadsskäl.

I nyare amerikansk forskning har betning av fröet med bakterier av släktet *Pseudomonas* gett goda effekter mot ärtrotörta och i kombination med resistent sorter kommer denna form av bekämpning sannolikt att få större betydelse i framtiden.

SAMMANFATTNING AV FÄLTSTUDIER UTFÖRDA I HALLAND I ÄRTER 1990-1991 (I, II, III) SAMT PERSONLIGA KOMMENTARER

Vid avdelningen för jordbearbetning har sedan länge en omfattande försöksverksamhet med jordpackning bedrivits, men hittills har orsakerna till packningens verkningar kunnat studeras endast i otillräcklig omfattning. Orsakssammanhangen är synnerligen komplexa p g a att packningen påverkar i princip alla markfysikaliska, markkemiska och markbiologiska faktorer och processer.

Vid avdelningen har sedan några år tillbaka inletts ett nytt skede vad gäller forskningen på jordpackningsområdet. Vi söker dels syntetisera hittills erhållna resultat och kunskaper i form av en modell för att beräkna skördebortfallet genom jordpackning, dels påbörja detaljstudier över jordpackningens verkningar på olika markegenskaper och -processer.

I stort sett hela den svenska jordbruksmarken utsätts för packning genom tunga maskiner flera gånger årligen och detta får allvarliga konsekvenser ur såväl avkastnings- som naturresurs- och miljösynpunkt. Packning av alven har bedömts vara det största fysikaliska hotet mot den svenska odlingsmarkens långsiktiga produktionsförmåga, främst p g a dess permanenta verkningar, omöjliga att helt upphäva genom luckring (Håkansson, 1994). Jordpackningen har vidare betydelsefulla kortsiktiga konsekvenser. Sålunda försämras växternas rotutveckling och rötternas funktion, bl a bristande näringsupptagning. Vidare påverkas livsbetingelserna för markorganismerna och därmed bl a omsättningen av organisk substans, denitrifikationen och bindningen eller frigörelsen av växthusgaser. Packningens effekter på markens flora och fauna är ett mycket viktigt framtida

forskningsområde, liksom dess inverkan på växtnäringsupptagningen hos våra grödor. Studier av jordpackningens verkningar är därför betydelsefulla såväl med tanke på markvärden som på den externa miljön.

Ärter är en gröda, som allmänt anses känsligare än stråsäd för packningstillståndet i marken, vilket antagligen beror på att marken inte bara skall utgöra en bra miljö för rötterna, utan den skall också vara en lämplig miljö för baljväxtbakterierna, så att dessa på ett optimalt sätt kan utvecklas och fixera kväve, vilket gör baljväxterna så unika. Vidare är baljväxterna generellt mer utsatta för rotpatogener än stråsåden- detta framförallt under packade och vattenmättade betingelser.

Ärter har därför ofta dålig odlings säkerhet. Särskilt under våta år och då framförallt i låglänt terräng eller i packade spår från tunga maskiner eller där dräneringen inte fungerat normalt, ser man hur ärtorna gulnar i förtid eller t o m vissnar och ruttnar och ger dålig avkastning. Så var exempelvis fallet i flertalet ärtodlingar i Halland åren 1990 och 1991. Under den extremt nederbördsrika sommaren 1991 plöjdes många ärtfält upp utan att sköras. Avkastningsförlusterna var så stora att många odlare upphör med ärtodling, om inte odlings säkerheten kan förbättras. Efter en ganska stor ärtareal i landet omkring mitten av 1980-talet har denna nu sjunkit drastiskt. Enligt uppgifter erhållna från Statistiska Centralbyrån var arealen trindsäd (till trindsäd har räknats kokärter, foderärter och vicker samt åkerbönor) 1989 37 225 ha, 1990 32 725 ha, 1991 23 327 ha, 1992 14 059 ha samt 1993 endast 8 720 ha. Man kan förmoda att kok- och foderärter utgör största andelen av arealerna. Arealen konservärter utgjorde 1993 9 126 ha. Flera faktorer orsakar minskningen, bl. a. borttagandet av arealstödet, men även de våta växtodlingsåren 1990 och 1991 har nog haft sin betydelse.

Både ur odlings- och nationalekonomisk synpunkt vore det attraktivt med större arealer ärter i landet. Fröets höga proteininnehåll, i genomsnitt ca 26 % av TS, gör det möjligt att minska importen av sojamjöl. Dessutom är ärtgrödans värde som förfrukt speciellt i spannmålsdominerade områden väldokumenterad p g a dess förmåga att fixera kväve, som delvis kan utnyttjas av efterföljande gröda. Grödans förhållandevis grova rötter och djupa rotsystem påverkar också markstrukturen på ett gynnsamt sätt.

Mer forskning av tvärvetenskaplig natur inriktad på interaktionseffekter mellan markpackning, rotsjukdomar och växtnäringsupptagning vore av stort värde för att försöka överkomma nuvarande problem vid ärtodlingen. Ett förädlingsprogram med målsättning att finna högresistenta sorter mot ärtrotträta borde också prioriteras. Sådan forskning har påbörjats med viss framgång i utlandet, vilket tidigare nämnts. Helt nyligen har vi blivit informerade om framtagandet av en naturligt förekommande bakterie, *Pseudomonas*, som visat sig ha fytotoxisk verkan mot jordbundna svampar. Om denna bakterie visar sig ha god effekt mot *Aphanomyces* vore det ett mycket stort framsteg. Ett samarbete mellan forskare specialiserade inom markvetenskap, växtnäring, växtpatologi, genetik, mikrobiologi och växtfysiologi skulle med all förmodan ge upphov till fruktbar resultat, som sedan kunde användas i den praktiska rådgivningen till lantbruket.

Under åren 1990-1991 genomfördes i Halland 3 undersökningar i ärter, varav 2 st (I och II) utfördes som fallstudier 1990 resp. 1991, medan en (III), 1991, utlades som ett traditionellt fältförsök med stigande packningsgrader.

Både åren 1990 och 1991 kännetecknades av perioder med ovanligt höga regnmängder under försommaren och början av juli. Under båda åren föll 200-230 mm nederbörd under månaderna maj-juli (I), (II), (III), alltså ungefär lika stora mängder. Skillnaden mellan de båda åren var att under 1991 inföll de intensiva regnen tidigare än under 1990, vilket också bidrog till kraftigare skador i ärtfälten 1991. Kännetecknande för skadebilden på halländska ärtfält 1990 var ett successivt tilltagande av fläckighet på flertalet fält, vilket kunde observeras under första hälften

av juli månad. Symptomatiskt var fält med spridda gröna ytor omväxlande med gulnande ytor. Fläckigheten varade fram till skörd. Under 1991 däremot, kunde man tydligt observera tilltagande fläckighet redan i mitten av juni, som därefter hela tiden tilltog i styrka. Under andra hälften av juli var fälten svårt skadade med gröna mindre fläckar omväxlande med gula, vissnande ärter och bruna partier med döende plantor. Som tidigare nämnts blev skadorna på vissa lokaler så svåra att lantbrukarna fann det för gott att köra upp fälten, med totalförlust av grödan som följd.

År 1990 (I) gjordes en studie på 11 fläckiga ärtfält i mellersta och södra Halland. På varje undersökt ärtfält jämfördes markens fysikaliska egenskaper i två intilliggande fläckar, en med gröna och friska ärter och en med gulnande ärter. En enkel metodik användes härvidlag helt enkelt p g a tidsbrist. I 9 av de 11 undersökta fälten var matjorden mera packad i fläckar med gulnande än i fläckar med friska ärter och i de flesta fall var luftinnehållet i marken vid fältkapacitet så lågt att syrebrist måste ha rått under den nederbördsrika perioden. Därmed påverkades bildningen av rotknölar negativt med påföljd att kvävefixeringen reducerades kraftigt. Eftersom kväve utgör det växtnäringssämne som primärt styr tillväxten, fick denna reduktion sekundära negativa effekter på upptagningen av de flesta andra växtnäringssämnena. Någon analys av jorden med hänsyn till rotröta gjordes inte 1990, men med tanke på resultaten från 1991 kan man anta att åtminstone i många av fallen 1990 sådan infektion förelåg.

År 1991 genomfördes en kompletterande undersökning på ett enskilt ärtfält (37 ha), beläget på Vapnö Gods, ca 4 km utanför Halmstad (II). Efter intensiva regn redan under juni månad började fältet anta ett fläckigt utseende redan i början av juli. Effekterna förstärktes under juli månad och under andra hälften av juli var fältet indelat i mindre, gröna partier omväxlande med större områden med gula eller bruna, döende ärter.

Undersökningen påbörjades i början av augusti och genomfördes med tanke på att försöka förklara interaktionseffekter mellan jordpackning, syrebrist och rotröta. 6 provplatser, tämligen jämnt fördelade på fältet undersöktes. Varje provplats omfattade en yta med gröna, friska plantor, en yta med gulnande ärter samt en yta med bruna, döende ärter.

Resultaten följer i princip samma trend som vid 1990 års undersökning men effekterna var mer accentuerade 1991. För de flesta parametrarna erhöles statistiskt signifikanta skillnader. Den långa perioden av anaerobi i marken i kombination med högre packningsgrad i gula och bruna områden samt det faktum att infektionstrycket av rotröta var mycket högre i gula och bruna ytor fick katastrofala följder för grödan. N-fixeringen kollapsade på ett tidigt stadium, vilket orsakade lägre upptag av de flesta makronäringssämnena. Förhöjd upptagning av Fe och Mn antyder starkt reducerande betingelser i marken. Förhöjningen av Al-halten i framförallt områden med bruna, döende ärter har troligtvis en växtfysiologisk förklaring (S. Petersson, pers. medd.). Al diffunderar passivt in i roten från markvätskan p g a en koncentrationsgradient (koncentrationen av Al är normalt högre i markvätskan jämfört med i rotcellerna). Indikationer tyder på att Al under normala förhållanden kan pumpas ut, så att dess koncentration i växten bibehålles på en låg nivå (Al är fyttotoxiskt). Under anaeroba betingelser inhiberas rotandningen och uttransporten av Al reduceras, varför en förhöjning sker inne i växten.

För andra joner, typ K^+ och NO_3^- , sker däremot en upptagning med hjälp av energi (ATP). Vid inhiberad rotandning försämras ämnesomsättningen och därmed bildningen av ATP, varför upptagningen av t ex K^+ och NO_3^- också minskar.

Även i 1991 års fältförsök (III), kunde en motsvarande koncentrationsökning av Al noteras i det starkast packade försöksledet.

Dessa störningar i rotmiljön orsakade negativa effekter på andra plantegenskaper, t ex planthöjd,

antal baljor per planta, antal noder på huvud- och sidorötter samt torrsubstansmängd (II).

1991 genomfördes i Halland också ett fältförsök i ärter med olika packningsgrader, beläget på Lilla Böslid, ca 12 km söder om Halmstad (III). Jordarten var en lerig mo, alltså en jord med hög mättad hydraulisk konduktivitet. Packningarna orsakade en ökning av packningsgraden från ca 79 i led A (opackat) till ca 96 i led E (9 överfarer med tung traktor och högt ringtryck). Detta påverkade också torra skrymdensiteten i matjordslagret, som ökade från ca 1.17 kg dm^{-3} i led A till ca 1.42 kg dm^{-3} i led E. På motsvarande sätt sjönk den luftfyllda porositeten från ca 35 vol-% i led A till ca 21 vol-% i led E.

P g a jordens höga vattengenomsläpplighet och luftinnehåll samt det faktum att marken ej var smittad med ärtrotträta, blev de slutliga effekterna av packningarna aldrig så markerade som i (I) och (II). Packningsoptimum befann sig någonstans mellan 80 och 90, inom vilket område också leden A-D befann sig. Endast i led E sjönk fröskörden mera drastiskt. Analyser av växtnäringssupptagningen gjordes vid 3 utvecklingsstadiet (begynnande blomning, baljfyllnad samt moget frö). Några större skillnader i upptag av makro- resp. mikronäringsämnen förelåg inte mellan leden A-D. Däremot var upptaget betydligt lägre i led E. En tendens till förhöjt upptag av Fe, Mn och Al kunde noteras i led E, dock icke genomgående vid alla provtagningstidpunkterna. Man kan dock förmoda att måttlig syrebrist p g a överoptimal packning temporärt förekom i led E, men inte under någon längre tid. Stående ytvatten noterades aldrig på fältet, vilket däremot var vanligt på Vapnöfältet (II).

Beträffande effekter på planthöjd, antalet Rhizobiumknölar på huvud- resp. sidorötter och maximalt knöldjup kan generellt noteras mest negativ påverkan i led E, men för maximalt knöldjup och antalet knölar på huvudrötter noterades en reduktion redan i leden C och D.

Vid en jämförelse mellan fallstudien (II) och fältförsöket (III), 1991, kan man fastslå stora skillnader. Lerinslaget på Vapnöfältet var betydligt högre jämfört med Lilla Böslid, infektionstrycket av rotträta var likaledes mycket högre i (II) än (III), där det var obefintligt. Sämre hydraulisk konduktivitet, i vissa fall dålig dränering, högt infektionstryck m m lade grunden till de svåra skador som uppkom i (II). Den bl a lägre skördenivån i led E (III) måste betraktas med utgångspunkt från rent fysikaliska effekter av överoptimal packning.

Resultaten från framförallt (I) och (II) visade sig så intressanta, att vi beslöt oss vid avdelningen för jordbearbetning att följa upp dessa studier med ytterligare ett fältförsök, vilket genomfördes 1993 på samma fält som (II). Detta försök lades ut som ett trefaktoriellt fältförsök (split-split plot), med stigande packningsgrader i enlighet med (III), olika bevattningar under den känsliga utvecklingsfasen hos ärterna och behandlingar med Dazomet, en fungicid, som kontrollerar ärtrotträta. Resultaten från detta försök kommer att presenteras senare.

För att i stora drag sammanfatta denna avhandling, vill jag bl a peka på ett diagram (Fig.21), som beskriver hur markmiljön kan påverka grödans utveckling (Håkansson, 1992). Diagrammet försöker förklara hur ett markluftinnehåll av 10 vol-%, vilket allmänt anses utgöra det lägre gränsvärdet för tillfredsställande luftväxling, och ett penetrationsmotstånd av 2.5 MPa, vilket likaledes anses som ett kritiskt gränsvärde för rotutvecklingen är relaterade till packningsgrad och vattentension i markjorden.

Vid en vattentension av 10 kPa (fältkapacitet) innehåller jorden mer än 10 vol-% luft om packningsgraden (D) är mindre än 87, och mindre än 10 % om D är högre. Ju högre D-värde desto högre vattentension och följaktligen desto lägre vattenhalt erfordras för att syrebrist inte skall uppkomma. Vid 1500 kPa (vissningsgränsen) överskrider penetrationsmotståndet det kritiska gränsvärdet 2.5 MPa då D överskrider ungefär 85, och ju högre D-värdet är desto högre blir det

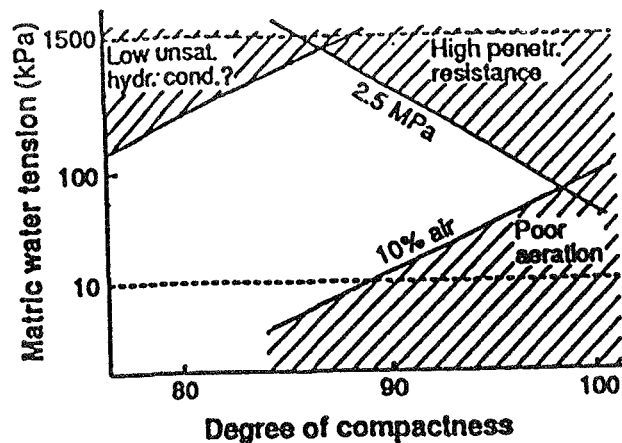


Fig. 21. Schematiskt diagram, vilket visar hur ett markluftinnehåll av 10 (vol-%) och ett penetrationsmotstånd av 2.5 MPa (2 parametrar som normalt betraktas som kritiska gränsvärden med hänsyn till normal plantutveckling) normalt är relaterade till packningsgrad och vattentensionen i det plöjda lagret. (Efter Håkansson, 1992).

vatteninnehåll (desto lägre den vattentension) vid vilket penetrationsmotståndet blir kritiskt. Bara under förutsättning att D är < ca 85 inom hela tensionsområdet 10-1500 kPa, undslipper man problem med luftväxling och rotpenetration. Viktiga konkusioner av detta är:

1. Vid en fuktighetssituation i marken, representerat av det oskuggade området i diagrammet, är normal tillväxt möjlig även om D är högt.
2. Vid en låg vattentension i kombination med ökande D-värde kommer grödan att lida av anaerobi (skuggat område i nedre högra hörnet). För baljväxter, t ex ärter, uppkommer nu ett annat problem, nämligen uppförökningen av rotrötesvampar, som försvårar och komplicerar situationen.

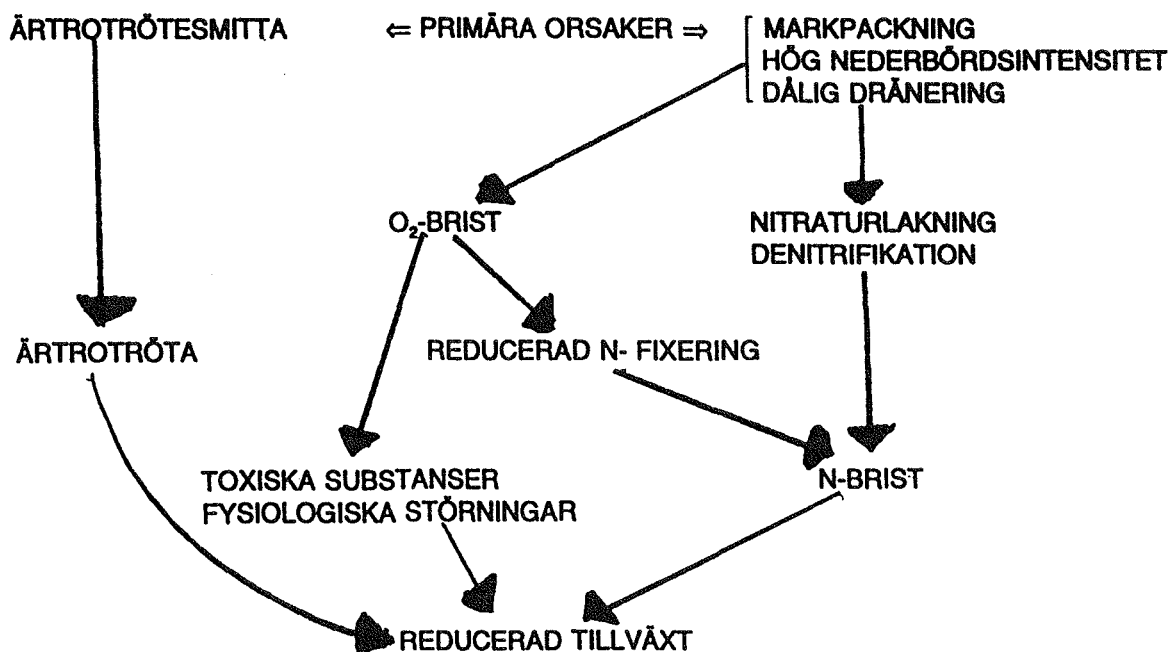


Fig.22 Faktorer som kan orsaka skador på en ärtgröda.

3. Vid höga D-värden i kombination med höga vattentensioner, begränsas rottillväxten p g a högt penetrationsmotstånd (övre högra hörnet). Penetrationsdjupet för rötterna blir här avhängigt av grödans möjlighet att forcera kompakta marklager, vilket skiljer sig mellan olika grödor.

4. Vid låga D-värden och om växtsäsongen är torr kommer grödan att påverkas av alltför låg omättad hydraulisk konduktivitet och/eller dålig rot-markkontakt, vilket orsakar alltför långsamt upptag av vatten och växtnäringsämnen. Denna situation kan noteras i övre vänstra hörnet.

Som slutvinjett beskrivs i Fig.22 hur man skulle kunna tänka sig hur olika faktorer tillsammans samverkar för skadebilden hos ärtgrödan.

REFERENSER

- Allison, F. E. 1966. The fate of nitrogen applied to soils. *Adv. Agron.* 18, 219-258.
- Askerblad, H., Bengtsson, A. & Hammar, O. 1984. Ärtodling. *Praktiskt lantbruk* 45. LTs förlag, Stockholm, 5 pp.
- Aulakh, M. S., Rennie, D. A. & Paul, E. A. 1983. Field studies of gaseous nitrogen losses from soils under continuous wheat versus a wheat fallow rotation. *Plant & Soil* 75, 15-27.
- Barley, K. P. 1962. The effects of mechanical stress on the growth of roots. *J. exp. Bot.* 13, 95-110.
- Bengtsson, I. 1985. Jordpackning i fältmässig köksväxtodling. SLU, Alnarp. Konsulentavd. rapporter. *Trädgård* 286, 6-42.
- Berglund, O. 1957. Ärtår - ett ekologiskt begrepp. *Grundförbättring* 4, 221-226.
- Bingefors, S. 1979. Ärtor till mogen skörd. LTs förlag.
- Boone, F. R. & Veen, B. W. 1982. The influence of mechanical resistance and phosphate supply on morphology and function of maize roots. *Neth. J. Agric. Sci.* 30, 179-192.
- Boström, U. 1986. The effect of soil compaction on earthworms (*Lumbricidae*) in a heavy clay soil. *Swed. J. Agric. Res.*, 16, 137-141.
- Brock, T. D. & Madigan, M. T. 1991. *Biology of microorganisms*. 6th ed. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 587-604.
- Bryant, A. E. 1934. Comparison of anatomical and histological differences between barley grown in aerated and non-aerated culture solutions. *Plant Physiol.* 9, 389-391.
- Burke, D. W., Hagedorn, D. J. & Mitchell, J. E. 1969a. *Aphanomyces* and *Fusarium* root rot of peas with partial vs total exposure to infested soil. *Phytopathology* 59, 1261-1266.
- Burke, D. W. & Kraft, J. M. 1974. Responses of beans and peas to root pathogens accumulated during monoculture of each crop species. *Phytopathology* 64, 546-548.
- Burrows, W. J. & Carr, D. J. 1969. Effects of flooding the root system of sunflower plants on the cytokinin content of the xylem sap. *Physiol. Plant.* 22, 1105-1112.
- Bödker, L. & Larsson, M. 1993. Rotsjukdomar på ärtor. *Faktablad om växtskydd*. 68 J, SLU, 4 pp.
- Cannel, R. Q., Subhail, B. A. & Snaydon, R. W. 1966. Effect of waterlogging on growth of peas. In: *Agric. Res. Council. Letcombe Lab. A. Report*, 1975, 37-38.
- Cho, D. Y. & Ponnamperna, F. N. 1971. Influence of soil temperature on the chemical kinetics of flooded soils and the growth of rice. *Soil Sci.* 112, 184-194.
- Conn, E. E. & Stumpf, P. K. 1966. *Outlines of biochemistry*. 2nd ed., John Wiley, New York, London, 322-344.
- Cooke, G. W. 1976. A review of the effects of agriculture on the chemical composition and quality of surface and underground waters. *Agriculture and water quality*, U. K. Min. Agric. Fish & Food. *Tech. Bull.* 32, London, 5-57.
- Crawford, R. M. M. 1967. Alcohol dehydrogenase activity in relation to flooding tolerance in roots. *J. exp. Bot.* 18, 458-646.

- Crosset, R. N., Campbell, D. J. & Stewart, H. E. 1975. Compensatory growth in cereal root systems. *Plant and Soil* 42, 673-683.
- Cunningham, R. K. & Cooke, G. W. 1958. Soil nitrogen II. Changes in levels of inorganic nitrogen in a clay loam soil caused by fertilizer additions, by leaching and uptake by grass. *J. Sci. Food Agric.*, 317-324.
- Currie, J. A. 1961. Gaseous diffusion in the aerarion of aggregated soils. *Soil Sci.* 92, 40-45.
- Currie, J. A. 1970. Movement of gases in soil respiration. *Soil Chem. Ind. Monogr.* 37, 152.
- Dilz, K. & Woldendoep, J. W. 1960. Distribution and nitrogen balance of ¹⁵N labelled nitrate applied on grass sods. *Proc. 8th Intern. Grassl Congr.*, Reading, 150-152.
- Dion, H. G. & Mann, P. J. G. 1946. Trivalent manganese in soils. *J. Agric. Sci.* 36, 239-245.
- Eavis, B. W. 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth III. *Plant & Soil* 37, 151-158.
- Eckerbom, C. 1985. Svampsjukdomar, speciellt jordbundna. SLU, Alnarp. Rapport från Södra Jordbruksförsöksdistriktets regionala växtskyddskonferens i Växjö 11 Dec. 10, 1-6.
- Engqvist, G. 1985. Ärtrotträta, vissnesjuka, syrebrist, midsommarsjuka- vad drabbas egentligen ärtarna av? *Aktuellt från Svalöv* 1, 5 pp.
- Engqvist, G. 1986. Ärtrotträta. Faktablad om växtskydd 42 J. SLU Info, Uppsala. 6 pp.
- Erickson, A. E. & van Doren, D. M. 1961. The relation of plant growth and yield to soil oxygen availability. *Trans. 7th Intern. Congr. Soil Sci.*, 428-434.
- Eriksson, J., Håkansson, I. & Danfors, B. 1974. Jordpackning-markstruktur-gröda. Jordbrukstekniska institutet. Uppsala, Medd. 354.
- Firestone, M. K. 1982. Biological denitrification. In: *Nitrogen in Agricultural Soils* (F. J. Stevenson, Ed.). Am. Soc. Agronomy, Madison USA, 289-326.
- Goss, M. J. 1977. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.)x Effects on elongation and branching of seminal roots. *J. exp. Bot.* 28, 96-111.
- Grable, A. R. 1966. Soil aeration and plant growth. *Adv. Agron.* 18, 57-106.
- Grable, A. R. 1971. Effects of compaction on content and transmission of air in soils. In: *Am. Soc. Agric. Eng. St. Joseph, MI*, 154-164.
- Grath, T. 1993. Effects of soil compaction on physical, chemical and biological soil properties and crop production. SLU, Uppsala. *Medd. från Jordbearbetningsavd.* 5, 101 pp.
- Grath, T. 1994. *Kompendium i ekologi.* 150 pp.
- Greenland, D. J. 1962. Denitrification in some tropical soils. *J. Agric. Sci.* 58, 227-233.
- Greenwood, D. J. 1970. Soil aeration and plant growth. *Rep. Prog. App. Chem.* 55, 423-431.
- Groffman, P. M., Box, J. E. & Todd, R. L. 1984. Effect of artificial drainage on soil mineral nitrogen dynamics in winter wheat on the southern Piedmont. *Commun. in Soil Sci. and Plant Analysis* 15(9), 1051-1063.
- Hagedorn, D. J. 1984. *Compendium of pea diseases.* The American Phytopathological Society, Minnesota. 57 pp.
- Hopkins, H. T., Specht, A. W. & Hendricks, S. B. 1950. Growth and nutrient accumulation as controlled by oxygen supply to plant roots. *Plant Physiol.* 25, 193-208.
- Horn, R. 1985. Auswirkung mechanischer Belastungen auf die redoxpotentiale von 3 Bodenmonolithen- ein laborversuch. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 148, 47-53.
- Håkansson, I., Voorhees, W. B. & Riley, H. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Tillage Res.* 11, 239-282.
- Håkansson, I. 1989. Packning av matjordslagret. Vilken packningsgrad är bäst? SLU, Uppsala. *Fakta, mark-växter.* 1.
- Håkansson, I. 1992. The degree of compactness as a link between technical, physical and biological aspects of soil compaction. *Proc. Int. Soil Compaction Conf. in Tallin, Estonia, June 8-12*, 754-758.
- Håkansson, I. 1994. Yttrande över ansökan om stipendium för forskarutbildning.
- Jackson, M. B. & Campbell, D. J. 1976b. Waterlogging and petiole epinasty in tomato: The role of ethylene and low oxygen. *New Phytol.* 76, 21-29.

- Kemper, W. D., Stewart, B. A. & Porter, L. K.** 1971. Effects of compaction on soil nutrient status. In: Eds. *Compaction of Agricultural Soils*. Am. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph, Michigan, 178-179.
- Kramer, P. J.** 1969. *Plant and water relationships: A modern synthesis*. McGraw-Hill, New York, 156-161.
- Kristenson, K.** 1987. Ärtodling. Lantbruksinformation nr 3. Lantbruksstyrelsen.
- Lai, R. & Taylor, G. S.** 1969. Drainage and nutrient effects in a field lysimeter study. I. Corn yield and soil conditions. *Proc. Soc. Soil Sci. Am.* 33, 937-941.
- Lipiec, J., Håkansson, I., Tarkiewicz, S & Kossowski, J.** 1991. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Tillage Res.* 19, 307-313.
- Lynch, J. M. & Harper, S. H. T.** 1974. Formation of ethylene by a soil fungus. *J. Gen. Microbiol.* 80, 187-195.
- Matsubayashi, M., Ito, R., Nomoto, T., Takase, I. & Yamada, N.** 1963. Some properties of paddy field soils. In: *Theory and practice of fertilizer application*, 183-227.
- McCalla, T. M. & Norstadt, F. A.** 1974. Toxicity problems in tillage. *Agric. Environ.* 1, 153-174.
- Mengel, K. & Kirkby, E. A.** 1987. *Principles of plant nutrition*. Int. Potash Inst., Bern, Switzerland. Lang Druck, AG, Liebefeld/Bern, 358-514.
- Mikkelsen, D. S., DeDatta, S. K. & Obcemea, W. N.** 1978. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 725-730.
- Miller, D. E. & Burke, D. W.** 1974. Influence of soil bulk density and water potential on Fusarium root rot of beans. *Phytopathology* 64, 526-529.
- Munch, J. C. & Ottow, J. C. G.** 1983. Bacterial reduction of amorphous and crystalline iron oxides. *Sci. du Sol - Bull. de l'A. F. E. S*, No 3-4, 205-215.
- Njøs, A.** 1978. Effect of tractor traffic and liming on yields and soil physical properties of a silty clay loam soil. *Sci. Rep. Agric. Univ. Norway* 57(24), 1-26.
- Olofsson, J.** 1967. Root rot of canning and freezing peas in Sweden. *Acta agriculturae Scandinavica* 17, 101-107.
- Patrick, W. H. Jr & Reddy, K. R.** 1977. Fertilizer nitrogen reactions in flooded soils. *Proc. Intern. Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture.*, Tokyo 275-281.
- Pfeffer, W.** 1893. Druck und arbeitsleistung durch vachsende pflanzten. *Abh. Sächs. Ges (Akad) Wiss.* 33, 235-474.
- Phillips, I. D. J.** 1964b. Root.shoot hormone relations. II. Changes in endogenous auxin concentration produced by flooding of the root system in *Helianthus annuus*. *Ann. Bot.* 28, 37-45.
- Ponnamperuma, F. N.** 1965. Dynamic aspects of flooded soils and the nutrient of the rice plant. In: *The Mineral Nutrition of the Rice Plant*. Proc. of a Symposium at The Intern. Rice Res. Inst., Feb. 1964, 295-328. The Johns Hopkins Press, Baltimore, Maryland.
- Ponnamperuma, F. N.** 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24, 29-96.
- Ponnamperuma, F. N.** 1978. Electrochemical changes in submerged soils and the growth of rice. *Soils and Rice*. The Intern. Rice Res. Inst., Los Banos, Phillipines, 421-441.
- Randhava, N. S., Sinha, M. K. & Takkar, P. N.** 1978. Micronutrients. In: *Soils and Rice*. Los Banos, Phillipines (Intern. Rice Res. Inst., ed.), 581-603.
- Reddy, K. R., Patrick, W. H. & Phillips, R. E.** 1976. Ammonium diffusion as a factor in nitrogen loss from flooded soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 528-533.
- Reddy, K. R., Rao, P. S. C. & Jessup, R. E.** 1982. The effects of carbon mineralization on nitrogen denitrification kinetics in mineral and organic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 62-67.
- Reddy, K. R. & Rao, P. S. C.** 1983. Nitrogen and phosphorus fluxes from a flooded organic soil. *Soil Sci.* 136, 300-307.
- Reid, D. M. & Crozier, A.** 1971. Effects of waterlogging on the gibberellin content and growth of tomato plants. *J. exp. Bot.* 22, 39-48.

- Riley, H. 1983. Relations between soil density and cereal yield. *Forskning og forsök i lantbruket*. 34, 1-11 (in Norwegian, with English summary).
- Rolston, D. E., Fried, M. & Goldhamer, D. A. 1976. Denitrification measured directly from nitrogen and nitrous oxid gas fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 259-266.
- Russell, E. W. 1971. Soil structure: its maintenance and improvement. *J. Soil Sci.* 22, 137-151.
- Russell, E. W. 1973. Soil conditions and plant growth. (10th ed.). Longman, London.
- Russel, R. S. & Goss, M. J. 1974. Physical aspects of soil fertility - The response of roots to mechanical impedance. *Neth. J. Agric. Sci.* 22, 305-318.
- Russell, R. S. 1977. Plant root systems: Their functions and interactions with the soil. Mc Graw-Hill Book Company. London.
- Ryden, J. C. 1983. Denitrification loss from a grassland soil in the field receiving different rates of nitrogen as ammonium nitrate. *J. Soil Sci.* 34, 355-365.
- Savant, N. K. & DeDatta, S. K. 1982. Nitrogen transformations in wetland rice soils. *Adv. Agron.* 35, 241-302.
- Sextone, A. J., Parkins, T. B. & Tiedje, J. M. 1985. Temporal response of soil denitrification rates to rainfall and irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 99-103.
- Smith, K. A. & Dowdell, R. J. 1974. Field studies on soil atmosphere. I. Relationships between ethylene, oxygen, soil moisture content and temperature. *J. Soil Sci.* 25, 217-230.
- Smith, K. A. 1977. Soil aeration. *Soil Sci.* 123, 284-290.
- Stefanson, R. C. 1972. Soil denitrification in sealed soil-plant systems. *Plant & Soil* 37, 113-149.
- Stevenson, F. J. 1967. Organic acids in soil. *Soil Bioc.* McLaren, A. D. & Peterson, G. H. Arnold ed. London, 119-146.
- Swartz, G. L. 1966. Flood tolerance of winter crops in Southern Queensland. *Agron. J.* 23, 271-277.
- Takai, Y., Koyama, T. & Kamura, R. 1957. Microbial metabolism of paddy soils. *J. Agric. Chem. Soc. Japan* 31, 211-220.
- Tamm, O. & Wiklander, L. 1970. Kompendium i marklära. 4:e uppl. Lantbrukshögskolans kompendienämnd.
- Tanaka, A. & Yoshida, S. 1970. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. *Intern. Rice Res. Inst., Tech. Bull.* 10.
- Taylor, H. M. & Gardner, H. R. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Sci.* 96, 153-156.
- Taylor, H. M. & Ratliff, L. F. 1969. Root elongation rates of cotton, peas and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci.* 102, 18-22.
- Trolldenier, G. 1971. Secondary effects of potassium and nitrogen nutrition of rice: Change in microbial activity and iron reduction in the rhizosphere. *Plant & Soil* 38, 267-279.
- Trolldenier, G. 1973. Secondary effects of potassium and nitrogen nutrition of rice: Change in microbial activity and iron reduction in the rhizosphere. *Plant & Soil* 38, 267-279.
- Vamos, R. 1964. The release of hydrogen sulphide from mud. *J. Soil Sci.* 15, 103-109.
- Wang, T. S. C., Cheng, S. Y. & Tung, H. 1967. Dynamic of soil organic acids. *Soil Sci.* 102, 138-144.
- Webster, C. P. & Dowdell, R. J. 1982. Nitrous oxide emission from permanent grass swards. *J. Sci. Food Agric.* 33, 227-230.
- Werner, D. 1980. Dinitrogen fixation and primary production. *Angew. Botanik* 54, 67-75.
- Wiklander, L & Hallgren, G. 1949. Studies on gytta soils. *Kungl. Lantbrukshögsk. Ann.* 16, 811-827.
- Wierserum, L. K. 1957. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. *Plant & Soil* 9, 9, 75-85.
- Woldendorp, J. W. 1968. Losses of soil nitrogen. *Stikstof, Dutch Nitrogenous Fertilizer Review* 12, 32-46.

Wright, S. T. C. & Hiron, R. W. P. 1972. The accumulation of abscisic acid in plants during wilting and under other stress conditions. In: Plant Growth Substances 1970. Carr, D. J., Spr. Senger-Verlag ed. Berlin, 291-298.

Yoshinari, T., Hynes, R. & Knowles, R. 1977. Acetylen inhibition of nitrous oxide reduction and measurements of denitrification and nitrogen fixation in soil. Soil Biol. Biochem. 9, 177-183.

Åberg, E., Lindblom, H. & Johansson, D. 1972. Biologi för jordbruk, skogsbruk och trädgård. LTs förlag, Stockholm, 6-7.

Effects of Soil Compaction on Development and Nutrient Uptake of Peas

THOMAS GRATH and INGE HÅKANSSON

Department of Soil Sciences

Abstract. During a rainy period in 1990, most pea fields in an area in southwestern Sweden developed a patchy, premature yellowing and wilting in a pattern pointing out machinery-induced soil compaction as a major reason. A sampling investigation was conducted in 11 fields, and in each of these a plot with green peas (G) was compared with an adjacent plot with yellowing peas (Y).

In Y the soil was much harder than in G. The air-filled porosity in the plough layer at a matric water tension of 100 hPa was reduced from 13.1 to 8.6% (v/v), which led to insufficient soil aeration, to poorer *Rhizobium*-nodulation and reduced N content in the shoots, and to reduced uptake of other plant nutrients.

Key words: soil compaction, *Pisum sativum* L., *Rhizobium*-nodulation, plant nutrients.

INTRODUCTION

Many of the current mechanized farm management practices, such as continuous row cropping and traffic with heavy machines in wet soils, tend to add to the soil compaction problems. To a greater or lesser extent, compaction influences nearly all physical, chemical and biological soil properties and processes.

Several investigations concerning the effects of soil compaction on legumes have been carried out. Borges et al. (1988) carried out laboratory studies with soyabeans in a clay soil with different bulk densities. Root and shoot dry weight decreased with increasing bulk density. At bulk densities of 1.15 and 1.25 g cm⁻³, 48 and 98% of the roots were in the upper 0–5 cm layer of the soil. At a bulk density of 1.35 g cm⁻³ no roots grew below this top layer. Shoot P, K and Mg concentrations increased up to a bulk density of 1 g cm⁻³ but decreased thereafter.

In a greenhouse, Kahnt et al. (1986) grew field bean and soyabean plants in a silt loam

soil compacted to 1.25, 1.45 and 1.65 g cm⁻³. Compaction to 1.65 g cm⁻³ reduced shoot and root dry matter and root length of field beans by 10, 21 and 27% and of soyabeans by 6, 25 and 47% of that obtained with 1.25 g cm⁻³. In pot experiments with soyabean, Katoch et al. (1983) observed the number and weight of nodules per plant for different compaction levels. Soil compaction significantly decreased nodulation and reduced straw yield and protein content of the seed.

In field trials in Minnesota, Lindemann et al. (1982) compacted a clay loam by 0, 1, 2 or 3 tractor passes two weeks before sowing of soyabeans. The effect on the yield depended on the precipitation during the growing season. In the dry year of 1976, seed yield was increased from 1.98 Mg ha⁻¹ to 2.16 and 2.28 mg ha⁻¹ by 1 and 3 tractor passes, respectively. Nodulation of tap roots and N fixation were also significantly increased. In the wet year of 1977, compaction significantly reduced growth and nodulation, but N fixation was not affected. Seed yield was decreased from 4.12 Mg ha⁻¹ to 3.85 Mg ha⁻¹ when increasing the number of tractor passes from 0 to 3.

In July 1990, after a period of high rainfall, most pea fields in the province of Halland in southwestern Sweden became very patchy. In the early pod-filling stage the peas (*Pisum sativum* L.), showed premature yellowing and wilting in different-sized areas. The highest frequency of yellow patches was observed on headlands, in wheel tracks of heavy machines or in small depressions where the soil had been relatively wet during seedbed preparation and sowing, which indicated that soil compaction was a primary reason. To examine this supposition, a pilot sampling investigation was conducted in several pea fields.

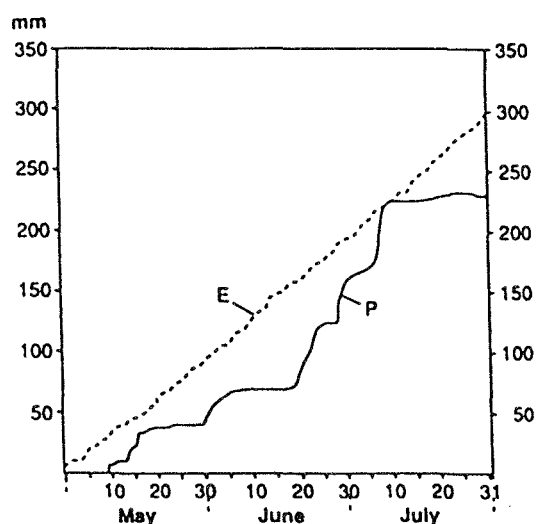


Fig. 1. Cumulative values of precipitation (P) at Halmstad and potential evaporation (E) at Torup for May, June and July, 1990.

METHODS

The investigation was carried out in 11 fields in an area with a radius of about 10 km. Most pea fields in the area were included. It was initiated as a case study after patchy yellowing was observed. Therefore, no investigations were carried out beforehand, and only simple and quick measurements and samplings were possible. All field operations had been carried out by the farmers using their normal field practice. This included mouldboard ploughing in the autumn and several spring tillage operations with tractors of various sizes. Fertilizing was done with P and K but not with N. Sowing was done in early-mid April.

The sampling was carried out on July 30–31, when the pea crop was in the middle of the pod-filling stage. In each sampled field one plot with healthy, green peas (G) and one with yellowing or wilting peas (Y), typical of areas with green and yellowing peas, respectively, were selected as close to each other as possible. The size of the sampling plots was about 2 m², and the spacing between the plots varied from 1 to 25 m.

Within each plot, core samples (diameter 70 mm, height 50 mm) were taken out in 4 replicates in the central part of the plough layer

(depth 10–15 cm) for determination of total porosity and of air filled porosity at matric water tensions of 25, 100, and 1 000 hPa. The root systems of 5 plants were dug up to a depth of 20 cm. After washing in water, the number of nodules on the main roots was counted, and the occurrence of nodules on the lateral roots was assessed subjectively on a scale with 0 = no occurrence, 1 = very small, 2 = small, 3 = moderate, 4 = abundant and 5 = very abundant occurrence.

In five of the sites, the above-ground part of the crop was harvested in an area of 0.25 m² and analysed for N content using a Dumas method and for other plant nutrients using an ICP-OES equipment after digestion in perchloric acid. The dry matter content of the same samples was determined, which gave a rough

Table 1. Soil texture, total porosity (*n*, % v/v) and air-filled porosity (*a*, % v/v) at various matric water tensions in G and Y plots at the individual sites

Site number, texture and crop appearance ¹	<i>n</i>	<i>a</i> at a tension of (hPa)		
		25	100	1 000
1. Sandy loam G	51.1	13.8	19.3	23.5
Y	39.9	4.4	6.1	12.1
2. Loam G	51.3	7.0	14.3	21.1
Y	50.6	7.3	11.6	20.4
3. Sandy loam G	52.6	11.9	18.9	25.8
Y	51.9	8.4	16.3	25.1
4. Sandy loam G	43.3	7.5	10.7	14.0
Y	40.4	6.1	7.1	10.3
5. Sa clay loam G	52.3	15.0	17.4	21.4
Y	43.8	4.9	6.6	10.5
6. Sa clay loam G	49.0	7.0	10.4	15.7
Y	42.3	3.9	5.7	11.7
7. Sandy loam G	57.4	7.3	10.9	17.5
Y	46.6	1.6	2.3	7.6
8. Sandy loam G	45.5	3.0	4.6	9.1
Y	46.1	4.8	7.0	10.7
9. Sandy loam G	43.4	4.7	6.2	10.3
Y	40.1	3.7	5.3	10.3
10. Loamy sand G	56.8	10.4	12.1	16.7
Y	52.0	11.1	14.3	18.5
11. Loamy sand G	40.7	7.2	19.8	25.1
Y	35.6	6.3	12.3	17.5
Mean values G	49.4	8.6	13.1	18.2
Y	44.5	5.7	8.6	14.1
LSD (<i>p</i> <0.05)	2.7	2.7	3.4	3.4

¹ G=green peas; Y=yellowing peas.

Table 2. Average number of *Rhizobium*-nodules on the main roots and subjectively assessed occurrence (scale 0–5) of nodules on the lateral roots in G and Y plots

	G ¹	Y ¹	Rel. ²	LSD ($p < 0.05$)
Main roots	7.86	3.05	39	2.14
Laterals	3.82	2.09	55	0.80

¹ G=green peas; Y=yellowing peas.

² Relative values in Y (G=100).

estimate of the above-ground biomass in the plots, but final crop yields were not determined.

RESULTS AND DISCUSSION

The rainfall in May through July at the Halmstad meteorological station, situated within the area of the investigation, and the calculated potential evaporation at the meteorological station of Torup, about 40 km from the centre of the area, are given in Fig. 1. It may be assumed that evapotranspiration from the pea fields from sowing time to mid May was lower than the potential evaporation shown in the figure,

and after that about the same. In spite of some variations in rainfall within the area, it may also be assumed that the plough layer in the investigated fields had a water content below field capacity (matric water tension of 100 hPa) during most of May and June. Due to high rainfall in late June and early July the soils became fully water-saturated for a period of about two weeks in early July. In compacted plots with a low saturated hydraulic conductivity, the plough layer probably had a water content above field capacity for some days, and surface water might have occurred.

The sampling was carried out about two weeks after the end of the rainy period. When digging for the sampling, it was observed that the soil in nearly all fields was considerably harder in Y than in G.

The subjectively assessed soil texture and the results of the analyses of the core samples are shown in Table 1. Sandy loam was the dominating soil. Total porosity was generally lower in Y than in G, and in most cases, air-filled porosity at all matric water tensions studied was also considerably lower. It is a common experience that an air-filled porosity in the plough layer around 10% is required for adequate aeration

Table 3. Dry matter (DM) and plant nutrient content in the aerial parts of plants from G and Y plots at sites 1, 4, 7, 8, and 11

	Concentration				Amount			
	G ¹	Y ¹	Rel. ²	LSD ($p < 0.05$)	G ¹	Y ¹	Rel. ²	LSD ($p < 0.05$)
	———— % of DM ————				———— kg ha ⁻¹ ————			
DM					8 780	5 240	60	n.s.
N	2.35	1.12	48	0.44	196	58	30	92
P	0.27	0.16	60	0.10	21.4	8.8	41	9.0
K	2.10	1.17	56	0.43	185	65	35	116
S	0.21	0.19	95	n.s.	17.5	11.1	63	n.s.
Ca	1.31	1.15	87	n.s.	126	63	49	n.s.
Mg	0.20	0.21	106	n.s.	17.1	11.2	66	n.s.
	———— ppm of DM ————				———— g ha ⁻¹ ————			
Fe	259	285	110	n.s.	2 200	1 460	66	n.s.
B	19.4	15.0	77	n.s.	176	81	46	n.s.
Mn	27.8	40.0	144	n.s.	250	205	82	n.s.
Zn	35.2	18.8	53	13.8	306	99	32	n.s.
Cu	7.3	5.2	71	1.9	63	28	44	n.s.

¹ G=green peas; Y=yellowing peas.

² Relative values in Y (G=100).

of soils of this type, and at a water tension of 100 hPa the air content was lower than that at 7 sites out of 11 in Y, but only at 2 sites in G.

It may be concluded that the soil in most Y-plots was poorly aerated during the wet period, and that aeration problems in most cases were more pronounced and lasted longer in Y than in G. This follows from the general relationships between the state of compactness and matric water tension of soils on one side and air-filled porosity and penetration resistance on the other, which are illustrated by Boone (1988), Lipiec et al. (1991) or Håkansson (1992). Considering these relationships and the weather in 1990, in the sites studied, mechanical resistance to root penetration did probably not severely restrain crop growth during any part of the growing season.

At some of the sites, the soil particle density was slightly higher in Y than in G, which indicates a somewhat lower content of organic matter. This might have increased the sensitivity of the soil to compaction.

Both the number of *Rhizobium*-nodules on main roots and occurrence of nodules on laterals (Table 2) was significantly lower in Y than in G, which reduced N fixation (Table 3). N-concentration was reduced by 52%, and total amount of N, P, K and S in aerial parts of the plants was reduced by 70, 59, 65 and 37%, respectively. On average, the amount of dry matter was 40% less in Y than in G, and this generally resulted in larger differences in amount than in concentration of plant nutrients.

Even differences in root diseases might have occurred, but was not investigated. *Aphanomyces* root rot, which causes yellowing of peas similar to that observed in the investigated fields, is known to be common in the area (Berndt Gerhardson, pers. comm., 1991). Attacks by this pathogen are favoured in wet and poorly aerated soils. Compaction has been shown to increase root rot severity (Raghavan et al., 1982; Tu & Tan, 1988), and therefore, this disease may have contributed considerably to the yellowing in the fields studied. At two sites (Nos. 8 and 10), soil physical data did not indicate poorer aeration in Y than in G, and here the patchy yellowing was probably caused by some other factor, e.g., a variation in initial

root rot infestation. At the other sites, the data indicated a stronger soil compaction in Y than in G, which confirmed the evidence provided by the pattern of yellowing that compaction was a major reason. However, this study indicates that it would be very interesting to carry out combined soil physical and plant pathological investigations in areas where aphanomyces root rot is established.

CONCLUSIONS

The premature yellowing of the pea fields showed a patchy pattern, which indicated that machinery-induced soil compaction was a major reason. The investigations revealed that the soil was usually more compact in areas with yellowing than in areas with green peas, which must have led to poor aeration during the wet period and caused problems with N-fixation by *Rhizobium*-nodules and with plant nutrient uptake.

REFERENCES

- Borges, N., Novais, R. F., Regazzi, A. J., Fernandes, B. & Barros, N. F. 1988. Soyabean cultivar response to compacted soil levels. *Revista Ceres* 35(202), 553-568.
- Boone, F. R. 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil Tillage Res.* 11, 283-324.
- Håkansson, I. 1992. The degree of compactness as a link between technical, physical and biological aspects of soil compaction. *Proceedings of International Soil Compaction Conference*. Estonian Research Inst. of Agriculture and Land Improvement, Saku, Estonia, June 8-12, 1992, 4 pp.
- Kahnt, G., Hijazi, L. A. & Rao, M. 1986. Effect of homogeneous and heterogeneous soil compaction on shoot and root growth of field bean and soybean. *Journal of Agronomy and Crop Science* 157, 105-113.
- Katoch, K. K., Aggarwal, G. C. & Garg, F. C. 1983. Effect of nitrogen, soil compaction and moisture stress on nodulation and yield of soyabean. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 31, 215-219.
- Lindemann, W. C., Ham, G. E. & Randall, G. W. 1982. Soil compaction effects on soybean nodulation, $N_2(C_2H_4)$ fixation and seed yield. *Agronomy Journal* 74, 307-311.
- Lipiec, J., Håkansson, I., Tarkiewicz, S. & Kosowski, J. 1991. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Tillage Res.* 19, 307-317.

- Raghavan, G. S. V., Taylor, F., Vigier, B., Gauthier, L. & McKyes, E. 1982. Effect of compaction and root rot disease on development and yield of peas. *Canadian Agricultural Engineering* 24, 31–34.
- Tu, J. C. & Tan, C. S. 1988. Soil compaction effect on photosynthesis, root rot severity and growth of white beans. *Canadian Journal of Soil Science* 68, 455–459.

Acknowledgements. This investigation was financially supported by The Royal Swedish Academy of Agriculture and Forestry. Chemical analyses were carried out by Biospectron AB, Tågarp, at a discount price.

Thomas Grath
Gullringsbolet, Ågarp
S-305 91 HALMSTAD, Sweden

Inge Håkansson
Swedish Univ. Agric. Sci.
Department of Soil Sciences
P.O. Box 7014
S-75007 UPPSALA, Sweden

A Case Study on Soil Compaction and *Aphanomyces* Root Rot as Causes of Uneven Pea Growth

THOMAS GRATH and INGE HÅKANSSON

Department of Soil Sciences

Abstract. During a rainy period in 1991, most pea fields in a region in southwestern Sweden became extremely patchy. Premature yellowing or dying of the peas developed in a pattern that suggested machinery-induced soil compaction to be an important reason. A case study was conducted in such a field. When compared with plots with healthy peas, plots with dying peas were found to have significantly higher soil penetration resistance and degree of compactness and significantly lower air-filled porosity, plant height, number of pods per plant, number of nodules on the roots, and content of macro nutrients in the plants. Increased concentrations of Fe and Mn in the dying plants indicated oxygen deficiency in the soil. In such plots there was also a heavy infestation of *Aphanomyces* root rot. In plots with severe root rot infestation, but with more favourable soil physical conditions the crop was less severely damaged. The combination of poor soil physical conditions and root rot infestation seemed to have completely inhibited the N-fixation.

Key words: soil compaction, *Pisum sativum* L., *Rhizobium*-nodulation, plant nutrients, *Aphanomyces* root rot.

INTRODUCTION

Soil compaction is a serious problem in modern agriculture due to the use of heavy machinery (Soane & van Ouwerkerk, 1994). Lindemann et al. (1982) stated that compaction directly affects soil physical conditions, and eventually influences soil chemical and biological properties as well. Any change in a system as complex as the soil produces changes in conditions that are interdependent on one another. Soil parameters most seriously affected by compaction are those that control the content and transmission of water, air, heat and nutrients, and those which change soil strength. A change in any one of these parameters could change the root and soil biological environment, resulting in altered plant growth.

Even though effects of soil compaction on plant growth have been widely investigated, they are not yet well understood. A better understanding is important, since modern techniques might offer new possibilities to develop methods and machinery for field operations that cause less compaction.

While many studies report on effects of soil compaction on plant root and shoot growth and yield, few investigations have concerned plant nutrient uptake in compacted soils. Especially for leguminous crops such as peas there is a lack of information on interaction effects between soil compactness, plant nutrient supply and root rots.

In a laboratory study, Castillo et al. (1982) investigated the effects of applied external pressures on dry matter production, rooting characteristics and nutrient uptake of peas. Shoot weight, root length, root weight, and concentration of K, Mg and Ca in the shoots were all decreased by applied pressures of 90, 179 and 269 kPa, but Cu concentration was increased.

Pea yield losses due to high root rot infestation levels in compact soils were observed by Burke et al. (1969). Batey & Davis (1971) reported possible additive effects of fungal infection and high bulk density on pea yield losses. Raghavan & Vigier (1980) reported a soil bulk density increase and higher root rot incidence in clay-textured soils as a result of tractor traffic. Raghavan et al. (1982) reported a 75% loss of pea yield in root-rot infested clay-loam plots having a bulk density range between 1.4 and 1.6 Mg m⁻³ in the top 0.10 m. Similar observations were made by Dawkins et al. (1980), who reported 65% loss of pea yield in compacted field plots.

In 1990, after a rainy period in early July, pea fields in the province of Halland in southwestern Sweden developed a patchy, premature

yellowing and wilting in a pattern that suggested machinery-induced soil compaction to be an important reason for the problem. In 11 fields, Grath & Håkansson (1992) compared plots having healthy, green peas with plots having yellowing peas, and found that total soil porosity, air-filled porosity, number of *Rhizobium* nodules on the roots, and amounts of N, P and K in the shoots were considerably reduced in plots with yellowing peas. Root disease infestation was not investigated.

In 1991, a similar situation occurred in the same area. The investigation from 1990 was followed up with a new case study, this year concentrated to a 37 ha field with clay loam soil.

After a long period of intensive rainfall in June and July the field became extremely patchy and there were areas with green (G), yellow (Y) and brown (dying) peas (B). The final yield in the field was 2 000 kg ha⁻¹ as compared with a 5-year average for the farm of 4 200 kg ha⁻¹. In lower parts of the field, poor drainage during the rainy period seemed to be the cause of the problems, but in other parts, the highest frequency of yellow and brown patches was observed on headlands and in wheel tracks of heavy machines, which indicated that soil compaction might be an important reason also in this year. Peas had been grown in the field twice during the preceding 10 years. Therefore, problems with root rot diseases were also suspected.

The investigation was initiated in early August after patchy yellowing and browning had arisen, and was carried out in order to examine the possible roles of soil compaction and root rot as causes of the problems. All previous field operations were undertaken by the farmer using his normal field practice. This included mouldboard ploughing in the autumn to a depth of about 20 cm, and several shallow spring harrowings, seeding and fertilizing (P and K) with heavy tractors, but not irrigation. Sowing was done on 19 April.

METHOD

The study comprised 6 sampling sites, distributed over the field, each consisting of one

G-, one Y- and one B-plot. The spacing between plots within sites varied from 15–50 m. Samplings were carried out in mid- to late August, when the pea crop was in the middle of the pod-filling stage.

In each plot, on 12–16 August, frame sampling of the plough layer according to Håkansson (1990) was carried out for determination of bulk density, porosity, water and air content and degree of compactness. Sampling was done in one layer from sowing depth (4–5 cm) to ploughing depth (about 20 cm). A technical failure made it necessary to exclude the results from one of the sites.

On 12 August, plant height and number of pods per plant were determined on 10 plants per plot. In an area of 0.25 m², the above-ground part of the crop was harvested, its dry matter content was determined, and analyses were made of its N content using a Dumas method, and of other plant nutrients using ICP-OES equipment after digestion in perchloric acid. Final crop yields were not determined.

On 12–14 August, the root systems from 10 plants in each plot were dug up, and after washing in water, the numbers of *Rhizobium* nodules on main and lateral roots were counted to a depth of 10 cm. Below that depth, sampling damaged the nodules too much. From three of the sites, soil samples were taken from the plough layer for determination of the infestation of the soil with the pea root rot complex according to Papavizas & Ayers (1974).

On 29 August, in G and B plots at 3 of the sampling sites, maximum root depth, root frequency and frequency of cracks and earthworm channels in the subsoil were investigated by digging to approximately 70 cm depth.

The General Linear Models Procedure (SAS Institute Inc., 1988) was used for statistical analyses of the data.

RESULTS AND DISCUSSION

Cumulative values of rainfall in May through July at the Halmstad meteorological station, situated about 2 km from the field, and the potential evaporation calculated for the Torup meteorological station, about 40 km from the

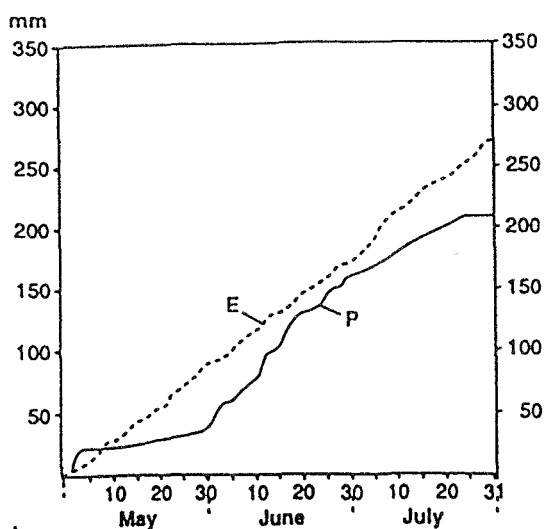


Fig. 1. Cumulative values of rainfall in May through July at Halmstad meteorological station (2 km from the field) and calculated potential evaporation at Torup meteorological station (40 km from the field).

field, are shown in Fig. 1. It may be assumed that evapotranspiration from the pea field from sowing time until mid-May was lower than the potential evaporation, but subsequently about the same. It may be concluded that the plough layer in the investigated field had a water content below field capacity (a matric water tension above 100 hPa) in May and early June, and in late May this layer was rather dry. During a period with high rainfall starting in early June, the soil became saturated, and the water content remained at or above field capacity from about 10 June until the first week of July. During the last two weeks of June, surface water was frequently observed in headlands and wheel tracks as well as in low parts of the field with inadequate drainage. This occurred during the pre-flowering to flowering stage, when the pea crop is considered most sensitive to waterlogging and anaerobiosis.

Soil texture analyses showed that clay loam and silt loam were the dominating soils (Table 1). Texture was similar in the plough layer and in the subsoil. In the plough layer, organic matter content varied between 3 and 10%, but was in most cases 4–6%. In the subsoil, organic matter content was usually considerably lower. As an average of 5 sites, dry bulk density was

3.5 and 5.6% higher in Y and B, respectively, than in G, and total porosity was 2.6 and 6.5% lower, respectively. At all sites, air-filled porosity at the time of sampling was markedly lower in Y and B than in G, as an average 28 and 41% lower, respectively. During the rainy period, the air-filled porosity must have been considerably lower than at time of sampling, which indicated that the soil in most Y and B plots during that period was poorly aerated.

On an average of 5 sites, the degree of compactness (D) was 85.2 in G, 86.5 in Y and 93.5 in B (Table 1). These data support the conclusion that aeration problems were more pronounced and lasted longer in B and to some extent in Y than in G. Furthermore, the yellowing or dying of the crop probably reduced the water transpiration rate and this is a likely reason for the higher mean soil water content in B and Y than in G. The soil water content also influenced the D-value, since this is a swelling/shrinking soil. If the water content in G had been as high as in Y or B, the D-value would have been 1–2 units lower, and the difference between G and the other plots correspondingly greater.

The high D-value in B plots indicates that root penetration was probably restrained by high mechanical resistance in the soil in late May and early June when soil water content was rather low. In G and Y, root growth was probably never restrained by mechanical resistance. These conclusions are based on works by Håkansson (1990, 1992) and Lipiec et al. (1991), which demonstrate that, at D-values over 85–87, increasing D leads to increasing aeration problems under wet conditions and to increasing root penetration problems under dry conditions. These works also show that the mean optimal D-value for barley in most soils is about 87. According to Håkansson (1973) the optimal D-value for peas is somewhat lower than for barley.

The root rot index was similar in Y and B (55 and 54, respectively, on average) and significantly higher than in G. At a root rot index exceeding 50, pea cultivation is generally not considered advisable under Swedish conditions.

At the three sites investigated on 29 August, maximum root depth varied between 15 and

Table 1. Soil texture, dry bulk density (ρ_d), total porosity (n), air-filled porosity (a), mass wetness (w), degree of compactness (D) and root rot index (RRI) in the plough layer in G, Y and B plots at 5 sites on 12–16 August

Parameter and crop appearance		Site					Mean
		1	2	3	4	5	
Texture	G ¹	sl ²	sl	sl	cl	cl	—
	Y	sl	cl	l	cl	cl	—
	B	sl	sc	cl	cl	cl	—
ρ_d (Mg m ⁻³)	G	1.209	1.145	1.397	1.284	1.230	1.253
	Y	1.296	1.274	1.367	1.247	1.299	1.297
	B	1.311	1.127	1.283	1.553	1.343	1.323
n (% v/v)	G	52.5	55.1	46.0	49.6	52.1	51.1
	Y	49.6	50.6	47.4	51.5	49.7	49.8
	B	49.0	53.8	49.7	38.6	47.7	47.8
a (% v/v)	G	26.9	31.5	22.0	21.3	28.1	26.0 a ⁴
	Y	22.8	20.5	18.1	13.5	18.1	18.6 b
	B	22.6	15.9	14.2	8.5	15.1	15.3 b
w (% w/w)	G	21.2	20.6	17.2	22.0	19.5	20.1 a
	Y	20.7	23.8	21.4	30.5	24.3	24.1 a
	B	20.1	33.6	27.7	19.4	24.3	25.0 a
D	G	83.9	80.4	85.2	91.0	85.3	85.2 b
	Y	85.3	83.7	86.0	88.6	89.1	86.5 b
	B	84.5	93.3	94.4	101.0	94.4	93.5 a
RRI ³	G	—	—	26	23	—	22 b
	Y	—	—	60	46	—	55 a
	B	—	—	67	44	—	54 a

¹ G = Green peas, Y = yellowing peas, B = brown, dying peas.

² l = Loam, sl = Silt loam, cl = Clay loam, sc = Silty clay.

³ At site 6, from which soil physical data were excluded, RRI was 18 in G, 58 in Y and 51 in B.

⁴ Mean values of the same parameter followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 probability level.

60 cm with an average of 56 cm in G and only 17 cm in B (Table 2). Root frequency in the subsoil was low even in the G plots. In all plots investigated, the subsoil was very compact, and cracks and earthworm channels were practically non-existent.

Crop appearance as well as contents of dry matter and plant nutrients are shown in Table 2. Plant height, number of pods per plant, root depth and dry matter content were significantly different. In B no *Rhizobium* nodules were found and in Y the number of nodules both on main roots and on laterals was lower than in G. N-concentration and total N-content in the plants were drastically reduced in Y and B. The total uptake of P and K and of most other plant nutrients was impaired. However, in the B-plots, the concentrations of Fe and Mn in the plants were substantially increased, which

indicates that oxygen deficiency had occurred.

It may be assumed that the pea roots, especially in B plots, and the *Rhizobium* nodules were severely damaged during the rainy period due to long-term anaerobiosis, which inhibited the N-fixation and resulted in problems with the uptake of other nutrients. This may partly be an effect of disturbed physiological root functions or of production of toxic substances in the soil.

Fig. 2 shows the mean relative yield as a function of the mean degree of compactness. Between Y and B there was a great difference in D-value, but not in root rot index. The difference in crop growth between these plots seems to be associated mainly with differences in the degree of compactness and in the anaerobiosis. Between G and Y there were great differences in root rot index, but not very great

Table 2. Mean plant height, number of pods per plant, maximum root depth, maximum nodulation depth, number of nodules on roots in the upper 10 cm soil layer and contents of dry matter and plant nutrients in the aerial parts of the plants in G, Y and B at 6 sites on 12–14 August

	G	Y	B	Y(rel) ¹	B(rel) ¹	LSD
Plant height (cm)	139	80	10	58	7	66
Number of pods per plant	6.3	2.1	0	33	0	0.9
Max. root depth (cm) ²	56	–	17	–	30	19
Max. nodulation depth (cm)	31	9	0	30	0	16
Number of nodules on main roots	15.8	15.1	0	96	0	4.9
Number of nodules on lateral roots	9.6	5.2	0	54	0	5.1
Dry matter (kg ha ⁻¹)	7 570	4 190	740	55	10	3 590
N (% of DM)	2.67	1.51	2.09	56	78	0.65
N (kg ha ⁻¹)	204	65	16	32	8	111
P (% of DM)	0.28	0.20	0.22	70	77	n.s.
P (kg ha ⁻¹)	21	9	2	40	8	12
K (% of DM)	1.84	1.21	1.05	66	57	0.22
K (kg ha ⁻¹)	141	51	8	36	5	73
S (% of DM)	0.16	0.18	0.25	113	163	0.04
Ca (% of DM)	1.05	0.77	1.05	73	100	n.s.
Mg (% of DM)	0.17	0.16	0.19	92	111	n.s.
Fe (ppm of DM)	156	161	709	103	454	183
B (ppm of DM)	16	13	14	80	91	1.8
Mn (ppm of DM)	18	15	49	83	276	21
Zn (ppm of DM)	24	23	19	95	78	n.s.
Cu (ppm of DM)	5.9	4.0	5.2	67	88	n.s.
Na (ppm of DM)	406	516	775	127	191	234
Si (ppm of DM)	117	117	287	100	245	75
Al (ppm of DM)	78	96	430	124	554	104

¹ Relative values, G = 100.

² Determined at 3 sites on 29 August.

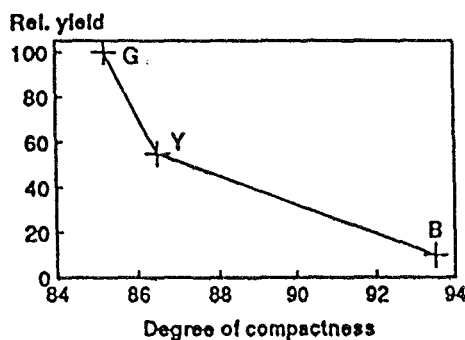


Fig. 2. Mean relative yield (G = 100) as a function of the degree of compactness of the plough layer.

differences in D-value. Therefore, the difference in crop growth between these plots may be largely caused by differences in root rot disease, possibly caused by pre-existing variations in the infestation level in the soil, or possibly by

differences in the development of the diseases during the summer. In any case, it is likely that the variations in crop growth in the field were largely caused by an interaction between the root rot infestation and the degree of compactness (anaerobiosis) in the soil. This gave rise to a subsequent experiment in the same field for studies of this interaction.

CONCLUSIONS

The growth pattern in a patchy pea field in southwestern Sweden during a rainy period suggested that soil compaction was an important reason for the poor crop development. The investigations supported this hypothesis and indicated that there were differences in root rot infestation, which interacted with the physical soil conditions.

REFERENCES

- Batey, T. & Davies, B. D. 1971. Soil structure and the production of arable crops. *J. R. Agric. Soc. England* 132, 106–122.
- Burke, D. W., Hagedorn, D. J. & Mitchell, J. E. 1969. *Aphanomyces* and *Fusarium* root rot of peas with partial vs. total exposure to infested soil. *Phytopathology* 59, 1261–1266.
- Castillo, S. R., Dowdy, R. H., Bradford, J. M. & Larson, W. E. 1982. Effects of applied mechanical stress on plant growth and nutrient uptake. *Agron. J.* 74, 526–530.
- Dawkins, C. K., Hebblethwaite, P. D., McGowan, M. & King, J. 1981. Soil physical conditions and the pea crop. *Soil and Water* 9, 19–21.
- Grath, T. & Håkansson, I. 1991. Effects of soil compaction on development and nutrient uptake of peas. *Swedish J. agric. Res.* 22, 13–17.
- Håkansson, I. 1973. The sensitivity of different crops to soil compaction. *Summaries, Sixth Int. Conf. on Soil Tillage*, September 24–29, Dept. of Soil Tillage, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, pp. 14:1–14:4.
- Håkansson, I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.* 16, 105–120.
- Håkansson, I. 1992. The degree of compactness as a link between technical, physical and biological aspects of soil compaction. *Proc. Int. Soil Compaction Conf.*, Tallin, June 8–12, Estonian Inst. of Agriculture and Land Improvement, Saku, Estonia, pp. 75–78.
- Lindemann, W. C., Ham, G. E. & Randall, G. W. 1982. Soil compaction effects on soybean nodulation, $N_2(C_2H_4)$ fixation and seed yield. *Arpn. J.* 74, 307–311.
- Lipiec, J., Håkansson, I., Tarkiewicz, S. & Kosowski, J. 1991. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Tillage Res.* 19, 307–317.
- Papavizas, G. C. & Ayers, W. A. 1974. *Aphanomyces* species and their root diseases in peas and sugarbeet. *U.S.D.A., Agric. Res. Serv., Tech. Bull.*, 1485, 158 pp.
- Raghavan, G. S. V. & Vigier, B. 1980. Soil compaction effect in clay soils on common root rot in canning peas. *Can. Plant Dis. Surv.* 60, 43–45.
- Raghavan, G. S. V., Taylor, F., Vigier, B., Gauthier, L. & McKyes, E. 1982. Effect of compaction and root rot disease on development and yield of peas. *Canadian Agricultural Engineering* 24, 31–34.
- SAS Institute Inc., 1988. SAS User's Guide, Release 6.03 Edition, Cary, N.C. 1028 pp.
- Soane, B. D. & van Ouwerkerk, C. (eds.) 1994. *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 662 pp.

Acknowledgements. This investigation was financially supported by The Royal Swedish Academy of Agriculture and Forestry. Chemical analyses were carried out by Biospectron AB, Tågarp, and determinations of root rot infestation levels by The Svalöf Plant Breeding Station, Svalöv at a discount price.

MS. received 11 July 1994

MS. accepted 12 September 1994

Thomas Grath
Gullringsbolet, Ågarp
S-305 91 HALMSTAD, Sweden

Inge Håkansson
Swedish Univ. Agric. Sci.
Department of Soil Sciences
P.O. Box 7014
S-750 07 UPPSALA, Sweden

EFFECTS OF SOIL COMPACTION ON PLANT NUTRIENT UPTAKE AND GROWTH OF PEAS ON A SANDY LOAM WITHOUT ROOT ROT INFESTATION

THOMAS GRATH

Department of Soil Sciences

Abstract. During a rainy period in 1990, many pea fields in a region in southwestern Sweden became extremely patchy. Premature yellowing or dieing of peas suggested machinery-induced soil compaction as a reason in combination with *Aphanomyces* root rot. A field experiment was conducted in order to find out effects of different soil compaction levels on growth and yield of peas in possible combination with *Aphanomyces* root rot. Dry bulk density, total porosity, air-filled porosity and degree of compactness all showed significant differences. Plant height, maximum nodule depth, number of nodules on main roots and laterals and dry matter content were also significantly different. The optimal degree of compactness was located between 79 and 90. For N, P and K, significant differences were in most cases obtained only in the most compacted treatment. Regarding micro nutrients, Mn and Al in this treatment displayed increased contents, which indicated a certain O₂ deficiency, especially during pod-filling stage, when rainfalls were intensive. In all treatments root rot index was 0.

Key words: soil compaction, *Pisum sativum* L., *Rhizobium*-nodulation, plant nutrients.

INTRODUCTION

The inherent mechanical strength of soils makes it possible for root systems to provide the necessary mechanical support for plants. It also protects the pore space housing the air, water and nutrient supply system from collapsing under the weight of the overlying soil, vegetation and animal or machinery traffic. When the soil matrix does yield under the applied forces, the pore space decreases, giving rise to increased mechanical resistance that may impede root and plant growth (Bennie, 1991).

Plant roots growing through structureless to weakly aggregated soil, without continuous large pores or cracks, elongate by exerting pressure on soil particles that obstruct the advancing root tip and by displacing them (Bennie, 1991). Mechanical impedance refers to the resistance offered by the soil matrix against deformation by a growing root, thus permitting root elongation only in accordance with the extent to which the root pressure exceeds the mechanical impedance. In strongly aggregated soils with cleavage planes between aggregates and in soils with continuous biopores of the same or larger diameter as the root tip, paths of lower mechanical impedance give rise to preferential root growth.

The effects of mechanical impedance on root growth have been reviewed extensively by Barley & Greacen (1967), Taylor et al. (1972), Russel (1977), Bennie & Krynauw (1985) and Greacen (1986).

The mechanisation of crop production is increasing in many parts of the world. In many countries this trend is viewed with concern because of the compaction which results when wheels pass over the soils, the growing medium for crops. To a greater or lesser extent, compaction influences nearly all physical, chemical and biological soil properties and processes as well as crop development and yield. These soil properties must be kept at an optimum level if maximum crop yields are to be maintained. Crop growth and yield will decline if the compactness of a soil lies either above or below an optimum value which will vary with different crops and weather conditions (Håkansson, 1989). Over-loosening cause problems in the early growth of crops in dry

weather, but farmers are generally aware of the methods to overcome these problems. In contrast, over-compaction problems tend to be experienced especially during wet weather and may occur on most soil types if vehicle traffic has been excessive. In recent years, there has been concern that over-compaction of soils is becoming more widespread as a result of the increasing traffic intensity and weight of agricultural implements and, in certain circumstances, it is thought to be restricting the profitability of crop production with accompanying risks for soil erosion (Soane, 1987). The incidence of such problems is likely to be influenced by the type and use of field vehicles, soil type, weather conditions and the type of crop. It is therefore important to establish the role of these factors and the methods to overcome these problems.

People concerned with soil management have long been aware of the close relations between tillage and traffic. Even when horses were primarily used for ploughing in Europe, it was observed that the passage of hooves in the furrow bottom was harmful to the soil, while the advent of mechanical traction was accompanied by forecasts of the impending ruin of soil structure as a result of the excessive weight of early machines (Soane & van Ouwerkerk, 1981). Adoption of the internal combustion engine in place of steam power and of high quality steel in place of wrought iron led to the evolution of comparatively light tractors, but, the steady increase in tractor power and weight over the last thirty years or so has brought into prominence again the problems of deterioration of soil structure by field traffic and the negative effects to be expected in soil workability, crop development and yield (Soane & van Ouwerkerk, 1981).

During the last 25 years, many studies have been undertaken on the direct effects of different compaction levels on crop growth and yield. Most studies have been concentrated on monocots. To a fewer extent investigations were made on dicots. Reports on combined effects of soil compaction, nutrient uptake and root rots in leguminous crops have been more or less nonexistent. Only a few studies have been found with peas being the investigated crop.

Effects of soil compaction on nutrient uptake, growth and root rot incidence have been studied by i. a. Raghavan et al. (1982), Castillo et al. (1981) and Bradford (1980). These studies were briefly reviewed by Grath & Håkansson (1994).

In a case study by Grath & Håkansson (1992), 11 pea fields in the province of Halland in southwestern Sweden were included. After a rainy period in early July, the pea fields developed a patchy, premature yellowing and wilting in a pattern pointing out machinery-induced soil compaction as a major reason. The highest frequency of yellow patches was observed on headlands, in wheel tracks of heavy machines or in small depressions where the soil had been relatively wet during seedbed preparation and sowing.

In each of the 11 fields, a plot with green peas was compared with an adjacent plot with yellowing peas.

In the latter plots the soil was much harder than in the former plots. The air-filled porosity in the plough layer at a matric water tension of 100 hPa was reduced to below 10 % (v/v), which led to insufficient soil aeration, poorer *Rhizobium*-nodulation and reduced N content in the shoots, and reduced uptake of other plant nutrients.

Differences in root diseases might have occurred, but this was not investigated.

In another case study in the same region by Grath & Håkansson (1994), the investigation was concentrated to a 37 ha field with a clay loam soil. In July, after a period with heavy rainfall, the field became extremely patchy with areas of green, yellow and brown (dieing) peas. During the last 2 weeks in June the soil must have been fully water-saturated. Surface water was observed,

especially in compacted areas and in lower parts of the field. The final grain yield in the field was only 2000 kg ha⁻¹ compared to a 5-year average for the farm of 4200 kg ha⁻¹. The study comprised 6 sampling sites, each consisting of one plot with green, one with yellow and one with brown peas.

In mid August, within each plot, determinations were made of plant height, number of pods per plant, root depth, max. nodulation depth and number of nodules on main and lateral roots. Frame sampling for determination of porosity and degree of compactness in the plough layer was also carried out.

Both the number of *Rhizobium*-nodules on main roots and laterals was significantly lower in Y and B, which severely reduced N-fixation.

Uptake of N in Y and B plots confirmed the collapse of N-fixation during and after the water saturated period. The uptake of many other nutrients was also significantly reduced. The increased uptake of Fe, Mn and Al in Y and especially in B indicated that poor aeration occurred.

Root rot index showed a noticeable increase in Y and B compared to G - 55 and 54 in Y and B compared to 22 in G. It is generally considered that a root rot index exceeding 50 makes it impossible to grow peas under Swedish conditions.

Soil bulk density increased with 3.5 and 5.6 % respectively in Y and B compared to G and air-filled porosity decreased with 28 and 41 % respectively and the degree of compactness increased with 2 and 10 % respectively.

Yield losses of 50 % or more are observed in pea fields heavily infested with *Aphanomyces* root rot in Sweden. Soil structure damages and oxygen deficiency are in most cases reported as causes, but the importance of the root rot fungus complex has often been neglected (Eckerbom, 1985).

In 1991, a field experiment was undertaken in peas in the province of Halland in the southwestern part of Sweden in order to investigate how different levels of compaction affected crop growth, plant nutrient uptake and possible root rot incidence.

METHODS

A field experiment was undertaken in a sandy loam field where peas had not been grown for several years. The experimental area was mouldboard ploughed in the preceding autumn to a depth of approx. 25 cm and harrowed once immediately before the compaction treatments were applied without causing tractor wheel tracks in the experimental plots.

Plots (3x20 m) were set up in a randomized complete block design with 4 replicates. The following treatments were applied on April 16, when soil moisture content was close to field capacity:

1. No compaction
2. 1 pass with a 4.25 Mg tractor having a tyre inflation pressure of 37 kPa
3. 1 pass with a 6.53 Mg tractor having a tyre inflation pressure of 90 kPa
4. 2 passes with a 6.53 Mg tractor having a tyre inflation pressure of 160 kPa

5. 9 passes with a 6.53 Mg tractor having a tyre inflation pressure of 160 kPa

After these treatments, the experimental plots were harrowed 1-3 times as required. No wheel tracks were formed in the net plots due to the use of a tractor with extended axels. Sowing was done the same day with peas (*Pisum sativum* var. Capella).

K fertilizer were applied 1991-05-31 with 50 kg K ha⁻¹. No application of N and P was done.

At time of compaction treatments, soil samples were taken from the plough layer for determination of textural composition of the soil, organic matter and water content.

On April 16-17, within each plot, frame sampling (frame area 0.5 m²) for determination of soil dry bulk density, porosity, air content and degree of compactness in the plough layer from harrowing depth (about 4 cm) to ploughing depth was carried out according to Håkansson (1990).

On May 9, emergence was ocularly inspected (scale 0-100) and on July 20, within each plot, vine length and deepest observed nodulation depth was measured. Coluor of nodules was observed. Vine strength was ocularly inspected on August 23 (scale 0-100).

Twice during the growing season, on June 03 (outset of flowering) and August 31 (in the mid of pod-filling stage) the above-ground part of the crop was harvested in an area of 0.25 m² and analyzed for N content using the Dumas method and for other plant nutrients using the ICP-OES equipment after digestion in perchloric acid. The dry matter content of the same samples was determined, which gave an approximate estimate of the above-ground biomass in the plots.

On July 25, the root system from 10 plants in each plot were dug up to a depth of 15 cm. Below that depth, sampling damaged the nodules too much. After washing in water, the number of nodules on main roots and laterals was counted. Soil samples were taken for determination of the infestation of the soil with the pea root rot complex.

On August 23 harvest was undertaken. In connection with harvest, seed samples were taken for plant nutrient analysis with the methods described above.

RESULTS AND DISCUSSION

The rainfall in May through July at the Halmstad meteorological station, situated about 15 km from the field experiment, and the calculated potential evaporation at the meteorological station of Torup, about 50 km from the experiment, are given in Fig. 1. It may be assumed that evapotranspiration from the pea experiment from sowing time to mid May was lower than the

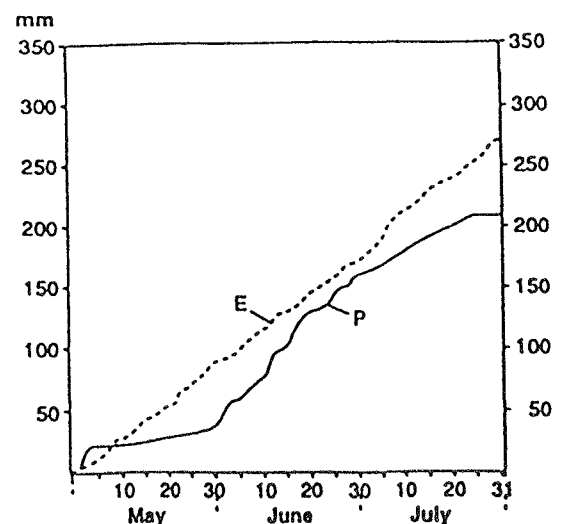


Fig.1. Cumulative values of rainfall (P) in May through July at Halmstad meteorological station (13 km from the experiment) and calculated potential evaporation (E) at Torup meteorological station (50 km from the experiment).

potential evaporation shown in the figure, and after that about the same. It may also be assumed that the plough layer in the investigated area had a water content below field capacity (a matric water tension over 100 hPa) during most of May and June. Due to high rainfall in late June and early July the soil became fully water-saturated for a period of two weeks in early July. The plough layer may have had a water content above field capacity for some days, but surface water never occurred.

The plough layer was a fine sandy loam with 5.6 % organic matter content (Tab.1). The subsoil consisted of a loamy fine sand. The soil profile had a good drainage capacity.

Dry bulk density of the plough layer from harrowing depth to ploughing depth increased from 1.166 g cm⁻³ in the uncompacted treatment to 1.417 g cm⁻³ in the most compacted treatment; total porosity decreased from 55.0 % to 45.3 %; air-filled porosity at time of sampling decreased correspondingly from 35.4 % to 21.4 % and degree of compactness increased from 79.4 to 96.4 (Tab.2).

Tab. 1. Particle size distribution and organic matter content (g kg⁻¹).

Layer	Particle size ranges (µm)				Organic matter
	200-2000	200-20	20-2	<2	
0-25 cm	60	780	50	110	56
25-40 cm	50	910	10	30	-

Tab. 2. Soil dry bulk density (ρ_d , g cm⁻³), total porosity (n , % v/v), air-filled porosity (a , % v/v), degree of compactness (D), water content (%) by weight (w) and by volume (θ) in experimental treatments A-E. Average of 4 replicates.

Treatment	ρ_d	n	a	D	w	θ
A	1.166	55.0	35.4	79.4	16.8	19.6
B	1.221	52.9	30.8	83.3	18.1	22.1
C	1.287	50.3	29.9	87.4	15.9	20.5
D	1.336	48.5	21.9	90.8	19.9	26.6
E	1.417	45.3	21.4	96.4	16.8	23.9
LSD (P<0.5)	0.024	0.909	5.547	1.649	-	-

Some data on crop development and *Rhizobium* nodulation as well as dry matter, yield and root rot index are shown in Table 3. Plant height, maximum nodule depth, number of nodules on main roots and laterals and dry matter content were significantly different. Number of nodules on main roots were more affected by the different treatments compared to laterals. Maximum nodulation depth was particularly low in E, which may be attributed to high soil strength. Ocularly inspected soil profiles in A and E also showed a considerably lower root depth in E compared to A. In all treatments root rot index was 0. Thus no infestation of root rot fungi occurred in the field.

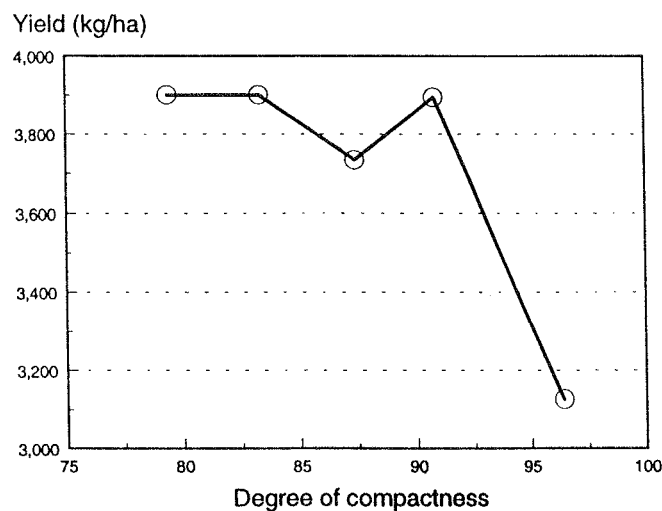
Due to a technical failure, yield data comprise only uncleaned seed with unknown water content. Fig.2 shows the yield for the different compaction treatments as a function of the mean degree of compactness. As can be seen, the optimal degree of compactness is located between 79 and 90. No significant differences existed between treatment A-D, only i E yield was significantly reduced. The high D-value in treatment E indicates that root penetration was probably restrained during the

Tab. 3. Emergence (scale 0-100), plant height (cm), vine strength (scale 0-100) maximum depth of *Rhizobium* nodulation (cm), nodule color, number of nodules in the upper 15 cm of the root system, contents of dry matter (kg ha⁻¹), yield and root rot index (RRI) in experimental treatments A-E. Average of 4 replicates.

	A	B	C	D	E	B(rel) ¹	C(rel) ¹	D(rel) ¹	E(rel) ¹	LSD
Emergence ²	28	50	41	45	55	179	146	161	196	-
Plant height (cm)	86.0	71.5	75.0	71.5	49.5	83	87	83	58	11.4
Vine strength ³	5	5	5	5	5	100	100	100	100	n.s.
Max. nodule depth (cm)	28.0	32.5	20.3	19.3	7.5	116	72	69	27	5.4
Nodule color	pink	pink	pink	pink	pink					
Number of nodules										
On main roots	7.6	6.5	5.1	4.2	2.9	86	67	55	38	2.4
On laterals	27.7	21.8	26.8	26.4	22.1	79	97	95	80	n.s.
Dry matter (kg ha ⁻¹) ⁴	187.8	187.8	195.0	185.3	149.8	100	104	99	80	36.9
Dry matter (kg ha ⁻¹) ⁵	8922	8702	8062	7287	5970	98	90	82	67	1413
Grain yield (kg ha ⁻¹) ⁶	3910	3910	3734	3894	3125	100	95	100	80	532
RRI	0	0	0	0	0					

¹ relative values in B-E (A=100), ² estimated % emergence, ³ % unlodged at harvest ⁴ outset of flowering (1991-06-30), ⁵ mid of pod-filling stage (1991-07-31), ⁶ grain (1991-08-23).

Fig.2. Yield of peas (kg ha⁻¹) as a function of the degree of compactness (D) of the plough layer for treatments A-E.



growing season. Based on works by i. e. Lipiec et al. (1991), it was demonstrated that, at D-values over 85-87, increasing D usually leads to increasing aeration problems under wet conditions and to increasing root penetration problems under dry conditions. In this case aeration problems probably occurred only in treatment E.

Tables 4 and 5 show the contents of macro-and micro nutrients at different development stages of the pea crop. For N, P and K, significant differences were in most cases obtained only in treatment E. This applies to both percentage of dry matter and uptake in kg ha⁻¹ at all different

Tab. 4. Contents of macro nutrients in the aerial parts of the plants in experimental treatments A-E. Average of 4 replicates.

	A	B	C	D	E	B ¹	C ¹	D ¹	E ¹	LSD (p<0.05)
N (%) ⁴	5.5	5.6	5.9	5.7	6.1	103	107	104	111	n.s.
N (%) ⁵	2.9	2.8	2.8	2.7	2.0	95	95	93	70	0.31
N (%) ⁶	4.3	4.4	4.4	4.3	4.0	101	102	100	94	0.22
N (kg ha ⁻¹) ⁴	10	10	11	10	9	102	111	102	88	2.3
N (kg ha ⁻¹) ⁵	257	240	220	196	121	93	86	76	47	144
N (kg ha ⁻¹) ⁶	170	173	165	169	128	102	97	100	76	7.8
P (%) ⁴	0.49	0.49	0.50	0.50	0.52	100	103	103	107	0.03
P (%) ⁵	0.25	0.24	0.24	0.24	0.20	96	96	100	79	0.04
P (%) ⁶	0.41	0.43	0.41	0.43	0.40	104	98	104	97	0.03
P (kg ha ⁻¹) ⁴	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	101	107	102	86	0.18
P (kg ha ⁻¹) ⁵	21	20	19	18	12	94	86	82	53	4.4
P (kg ha ⁻¹) ⁶	16	17	15	17	13	103	94	103	78	1.2
K (%) ⁴	3.3	3.2	3.2	3.5	2.8	96	97	105	83	0.27
K (%) ⁵	1.8	1.7	1.6	1.5	0.9	93	90	81	52	0.21
K (%) ⁶	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	102	101	102	100	n.s.
K (ha ⁻¹) ⁴	6	5	6	6	4	96	100	103	66	1.19
K (ha ⁻¹) ⁵	162	148	134	108	57	92	83	67	35	28
K (ha ⁻¹) ⁶	46	47	45	47	37	102	97	101	81	1.2
S (%) ⁴	0.41	0.44	0.42	0.43	0.43	106	102	105	105	0.03
S (%) ⁵	0.13	0.13	0.13	0.13	0.11	98	96	98	83	0.02
S (%) ⁶	0.17	0.17	0.16	0.17	0.17	102	98	102	100	n.s.
Ca (%) ⁴	2.1	2.2	2.1	2.3	2.4	104	100	105	113	0.25
Ca (%) ⁵	1.1	1.4	1.3	1.3	1.5	121	113	113	129	0.29
Ca (%) ⁶	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	89	100	100	100	0.01
Mg (%) ⁴	0.50	0.52	0.52	0.51	0.55	106	105	103	110	0.03
Mg (%) ⁵	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	108	112	110	120	0.03
Mg (%) ⁶	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	98	96	100	95	0.01
Na (ppm) ⁴	2335	2588	2504	2297	2858	111	107	98	122	300
Na (ppm) ⁵	320	415	439	395	520	130	137	123	162	169
Na (ppm) ⁶	20	19	21	25	59	98	104	127	296	14.7
Si (ppm) ⁴	315	324	390	271	339	103	124	86	108	87
Si (ppm) ⁵	82	89	91	84	106	109	111	102	128	n.s.
Si (ppm) ⁶	7.5	6.3	6.0	5.8	7.3	83	80	77	97	n.s.

¹ relative values in B-E (A=100), ⁴ outset of flowering (1991-06-30), ⁵ mid of pod-filling stage (1991-07-31), ⁶ seed (1991-08-23).

development stages except for N (%) at outset of flowering. The lower content of N in E reflects the higher soil compactness, which caused a reduced rooting depth, nodulation depth as well as a reduced number of nodules, especially on main roots. Due to the fact that N primarily controls plant growth and yield, this circumstance also negatively affected the contents of many other nutrients and endogenous phytohormones like cytokinins (Mengel & Kirlby, 1987). The very low percentage and uptake of K at mid of the pod-filling stage can probably also to a certain extent be explained by leaching of K from the above ground parts of the pea crop.

Regarding micro nutrients, Mn and Al in treatment E display increased contents, especially in mid of the pod-filling stage, which could indicate a certain O₂ deficiency at this stage of development.

Tab. 5. Contents of micro nutrients and Al in the aerial parts of the plants in experimental treatments A-E. Average of 4 replicates.

	A	B	C	D	E	B ¹	C ¹	D ¹	E ¹	LSD (p<0.05)
Fe (ppm) ⁴	301	331	348	282	340.9	110	116	94	113	n.s.
Fe (ppm) ⁵	78	84	85	83	80	108	108	105	102	n.s.
Fe (ppm) ⁶	60	61	59	61	60	102	98	101	99	1.7
Mn (ppm) ⁴	55	60	59	56	61	109	106	102	110	5.0
Mn (ppm) ⁵	27	30	29	28	40	107	105	147	4.4	
Mn (ppm) ⁶	12	12	12	12	12	102	101	101	97	0.55
Zn (ppm) ⁴	97	83	69	75	77	86	72	78	80	21.5
Zn (ppm) ⁵	35	38	36	37	33	107	102	104	92	n.s.
Zn (ppm) ⁶	45	45	42	46	43	101	95	103	95	1.7
Cu (ppm) ⁴	12	11	12	11	12	89	98	93	97	1.1
Cu (ppm) ⁵	4	4	4	4	103	98	99	82	0.6	
Cu (ppm) ⁶	8	8	8	8	7	103	99	107	94	0.6
B (ppm) ⁴	19.1	19.8	19.7	19.3	21.0	104	103	101	110	1.06
B (ppm) ⁵	18	19	19	20	19	107	107	110	106	n.s.
B (ppm) ⁶	7	7	7	7	8	98	99	100	107	0.39
Al (ppm) ⁴	227	259	295	219	274	114	130	97	121	n.s.
Al (ppm) ⁵	38	49	42	39	61	129	110	103	161	17.2

⁴ outset of flowering (1991-06-31), ⁵ mid of pod-filling stage (1991-07-30), ⁶ seed (1991-08-23).

CONCLUSIONS

The high D-value in treatment E indicated that root penetration was restrained during the growing season. The soil had a rather good hydraulic conductivity. Therefore, despite intensive rainfalls aeration problems giving rise to a significantly lower yield occurred only in treatment E since no root rot infestation occurred. The lower yield in E must be seen as a result of high soil strength in combination with temporary anaerobiosis.

REFERENCES

- Barley, K. P. & Greacen, E. L.** 1967. Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots. *Adv. Agron.* 19, 1-43.
- Bennie, A. T. P. & Krynauw, G. N.** 1985. Causes, adverse effects and control of soil compaction. *S. Afr. J. Plant Soil* 2, 109-114.

- Bennie, A. T. P.** 1991. Growth and mechanical impedance. Y. **Waisel, A. Eshel & U. Kafkafi**, eds. In: Plant roots- the hidden half. Marcel Dekker Inc. New York, 393-414.
- Bradford, J. M.** 1980. The penetration resistance in a soil with well-developed structural units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 601-606.
- Castillo, S. R., Dowdy, R. H., Bradford, J. M. & Larson, W. E.** 1981. Effects of applied mechanical stress on plant growth and nutrient uptake. *Agron. J.* 74, 526-530.
- Eckerbom, C.** 1985. Svampsjukdomar, speciellt jordbundna. SLU, Alnarp. Rapport från Södra Jordbruksförsöksdistriktets regionala växtskyddskonferens i Växjö 11 Dec. 10, 1-6.
- Grath, T. & Håkansson, I.** 1992. Effects of soil compaction on development and nutrient uptake of peas. *Swedish J. agric. Res.* 22, 13-17.
- Grath, t. & Håkansson, I.** 1994. A case study on soil compaction and *Aphanomyces* root rot as cauces of uneven pea growth. *Swedish J. agric. Res.* 24, 000-000.
- Greacen, E. L.** 1986. Root response to soil mechanical properties. Transactions of the 13th Congress of the I.S.S.S., Hamburg, Vol. 5, 20-47.
- Håkansson, I.** 1989. Packning av matjordslagret- vilken packningsgrad är bäst? Faktablad, Mark-Växter. SLU.
- Håkansson, I.** 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.* 16, 105-120.
- Lipiec, J., Håkansson, I., Tarkiewich, S. & Kossowski, J.** 1991. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Tillage Res.* 19, 307-317.
- Mengel, K & Kirkby, E. A.** 1987. Principles of plant nutrition. Int. Potash Inst., Bern, Switzerland. Lang Druck, AG, Liebefeld/Bern, 373.
- Raghavan, G. S. V., McKyes, E., Taylor, F., Richard, P. & Watson, A.** 1982. The relationship between machinery traffic and corn yields reductions in successive years. *Transactions of the Am. Soc. Agric. Eng.* 22, 1256-1259.
- Russel, R. S.** 1977. Plant root systems: Their function and interaction with the soil. McGraw-Hill, New York, 169-192.
- Soane, B. D. & Ouwerkerk, van C.** 1981. The role of field traffic studies in soil management research. *Soil Tillage Res.* 1, 205-206.
- Soane, B. D.** 1987. Over-compaction of soils on Scottish farms: A survey. Scottish Inst. Agric. Eng. Res. Summary No. 3.
- Taylor, H. M., Huck, M. G. & Klepper, B.** 1972. Root development in relation to soil physical conditions. In: Optimizing the soil physical environment toward greater crop yields. Ed. D. Hillel. Academic press, New York, 57-77.

Acknowledgements. Chemical analyses were carried out by Biospectron AB, Tågarp, and determinations of root rot infestation levels by The Svalöf Plant Breeding Station, Svalöv at a discount price.

RAPPORTER FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Nr År

- 56 1978 Åke Huhtapalo: Kombisådd av kväve och fosfor till vårsåd. 27 s.
Combi-drilling of nitrogen and phosphorus with spring cereals. 27 pp.
- 57 1979 Inge Håkansson: Försök med jordpackning vid hög axelbelastning. Markundersökningar 1-2 år efter försökens anläggande. 15 s.
Experiments with soil compaction at high axle load. Soil investigations 1-2 years after the experimental compaction. 15 pp.
- 58 1979 Inge Håkansson & József von Polgár: Modellförsök med såbäddens funktion. III. Försök med syrebrist i såbädden. 17 s.
Model experiments into the function of the seedbed. III. Experiments with oxygen deficiency in the seedbed. 17 pp.
- 59 1980 Tomas Rydberg: Storparcellförsök med plöjningsfri odling, 1976-78. 21 s.
Big-plot experiments with ploughless farming, 1976-78. 21 pp.
- 60 1980 Working group on soil compaction by vehicles with high axle load. Report of meeting in Uppsala 1980. 56 pp.
- 61 1981 Behovet av forskning och försök inom mark-teknikområdet. En inventering utförd av samarbetskommittén för mark-teknik vid Sveriges Lantbruksuniversitetets Lantbruksvetenskapliga fakultet. Sekreterare: Lennart Henriksson. 46 s.
- 62 1981 Skördevariationerna i växtodlingen - orsaker och motåtgärder. Seminarium anordnat av Samarbetskommittén för Mark-Teknik på Ultuna 1981-04-09. 64 s.
- 63 1981 Nils M. Nilsson: Plöjningsdjup och tiltbredder vid höstplöjning. 30 s.
Ploughing depths and widths of furrow slice in autumns ploughing. 30 pp.
- 64 1982 Jan Cederlund: Kombinerad bearbetning och sådd (harvsådd). Examensarbete. 54 s.
- 65 1983 Göran Kritz: Såbäddar för vårstråsåd. En stickprovsundersökning. 187 s.
Physical conditions in cereal seedbeds. A sampling investigation in Swedish spring-sown fields. 187 pp.
- 66 1983 N.M. Nilsson: Höst- eller vårplöjning till vårsådd på kapillära jordar. Resultat från 12 fältförsök åren 1971-75. 57 s.
Autumn- or spring ploughing before spring sowing on capillary soils. Results from 12 field trials during 1971-1975. 57 pp.
- 67 1984 Berth Mårtensson: Harvsådd - Preliminära försöksresultat 1979-83. 20 s.
Once-over sowing - Preliminary results of trials 1979-1983. 20 pp.
- 68 1984 Mats Edh: BANDSÅDD - en studie av olika billar för bandsådd. Examensarbete. 44 s.

- 69 1984 József von Polgár: Vältning efter vårsådd. 16 s.
Rolling after spring sowing. 16 pp.
- 70 1986 Tomas Rydberg: Markfysikaliska och markkemiska effekter av plöjningsfri odling i Sverige. 35 s.
Effects of ploughless tillage on soil physical and soil chemical properties in Sweden. 35 pp.
- 71 1986 Jordpackning: Skördepåverkan - Motåtgärder - Ekonomi. Rapport från NJF-seminarium i Sigtuna 28-30 oktober 1986. 187 s.
Soil compaction: Effects - Counter-measures - Economy. 187 pp.
- 72 1986 Bo Thunholm: Termiska egenskaper i åkermark skattade på grundval av den årliga temperaturvariationen. 18 s.
Thermal properties of the subsoil estimated from annual temperature variations. 18 pp.
- 73 1987 Lennart Henriksson: Försök med olika harvar 1977-1985. 32 s.
Field trials with different harrows 1977-1985. 32 pp.
- 74 1987 Tomas Rydberg & Torbjörn Öckerman: Plöjningsfri odling - Dess inverkan på rotutveckling och evaporation. 52 s.
The effects of ploughless tillage on root development and evaporation. 52 pp.
- 75 1987 Hans Svensson: Jordpackningens inverkan på sockerbetans rotutveckling och skördens storlek. 31 s.
Effects of soil compaction on root development and yield of sugarbeets. 31 pp.
- 76 1987 Tomas Rydberg: Studier i plöjningsfri odling i Sverige 1975-1986. 53 s.
Studies in ploughless tillage in Sweden 1975-1986. 53 pp.
- 77 1988 Reduceret jordbearbejdning. Rapport från NJF-seminarium i Horsens, Danmark 9-11 februari 1988. 240 s.
Reduced cultivation. 240 pp.
- 78 1990 Inge Håkansson, Mary McAfee, Sixten Gunnarsson: Verkan av körning med traktor och vagn vid vallskörd. Resultat från 24 försöksplatser. 41 s.
Effects of traffic during harvest on yield of grass leys. Results from field trials on 24 Swedish sites. 41 pp.
- 79 1990 Krister Nilsson: Packningsskador vid konservärtskörd - ekonomiska konsekvenser och åtgärder för att minska packningen. 16s.
Estimation of the economic consequences of soil compaction when harvesting canning peas. 16 pp.
- 80 1990 Tomas Rydberg, Mary McAfee, Börje Gillberg. Djupplöjning på lätta mineraljordar. 50 s.
Effects of subsoiling on crop yields on light mineral soils. 50 pp.
- 81 1992 Johan Arvidsson, Sixten Gunnarsson, Lena Hammarström, Inge Håkansson, Tomas Rydberg, Maria Stenberg: 1991 års jordbearbetningsförsök. 58 s.

- 82 1992 Johan Arvidsson, Inge Håkansson: En modell för att beräkna jordpackningens effekter på grödornas avkastning. 23 s.
An empirical model for estimating the crop yield losses caused by machinery induced soil compaction. 23 pp.
- 83 1992 Maria Stenberg, Reynaldo A. Comia, Tomas Rydberg, Inge Håkansson, Sixten Gunnarsson: Harvsådd i konventionella och plöjningsfria bearbetningssystem. 18 s.
Soil and crop responses to different tillage systems. 18 pp.
- 84 1992 Johan Arvidsson, Lena Hammarström, Maria Stenberg, Tomas Rydberg, Mats Tobiasson, Hans Pettersson, Sixten Gunnarsson, Ararso Etana, Inge Håkansson, Ingrid Karlsson, Karin Blombäck.
Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1992. 86 s.
- 85 1994 Johan Arvidsson, Inge Håkansson: Finns packningsskador kvar efter plöjning? Resultat från 21 långliggande fältförsök. 31 s.
Do effects of soil compaction persist after ploughing. Results from 21 Swedish long-term field experiments. 31 pp.
- 86 1994 Johan Arvidsson, Lena Hammarström, Tomas Rydberg, Maria Stenberg, Hans Pettersson, Jörgen Lidström, Lars Olsson, Barbro Beck-Friis, Sasa Ristic, Inge Håkansson, Ararso Etana, Eva Salomon.
Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1993. 88 s.
- 87 1994 Thomas Grath: Inverkan av jordpackning och anaeroba markförhållanden på grödornas näringsupptagning samt på rotträta och utveckling hos ärter. 61 s.
Influences of soil compaction and anaerobic soil conditions on crop nutrient uptake and on root rot and growth of peas. 61 pp.