



# **Alvpackning av tunga betupptagare Slutrapport från försök 1995-2000**

**SBU Sockernäringsens BetodlingsUtveckling AB är ett kunskapsföretag som bedriver försöks- och odlingsutveckling i sockerbetor för svensk sockernäring.**

**SBU ägs till lika delar av Danisco Sugar och Betodlarna.**

**Författare:**

Johan Arvidsson, Andreas Trautner & Erika Sjöberg  
Sveriges Lantbruksuniversitet, tel. 018-67 10 00

**Kontaktperson, SBU:**

Tommy Ingelsson, SBU, tel. 0709-53 72 64  
E-post: [sbutin@danisco.com](mailto:sbutin@danisco.com)

## Alvpackning av tunga betupptagare. Slutrapport från försök 1995-2000

Hösten 1995 startades ett projekt i samarbete mellan SLU och Danisco Sugar för att studera packningseffekter, framförallt i alven, av körning med tunga betupptagare. Projektet, som finansierades av Stiftelsen Sockerbetsforskning och Stiftelsen Lantbruksforskning, bestod av flera olika delar. Framförallt mättes effekter av körning vid betupptagning på markens fysikaliska egenskaper och skörd men det gjordes också noggranna mätningar av bl.a. vattenhaltens inverkan och riskbedömningar för körning vid olika tidpunkter på året. Denna rapport utgör en slutrapport för projektet, och innehåller följande delar:

- I. Förord – sammanfattning - litteraturlista
- I. Alvpackning - bakgrund
- II. Körning med tunga betupptagare - effekter på markens fysikaliska egenskaper och på skörd
- III. Tryck och markrörelser vid körning med tunga betupptagare – fältmätningar och modellberäkningar
- IV. Markens packningskänslighet under vegetationsperioden – mätningar och simuleringar på två skånska moränjordar

# Alvpackning av tunga betupptagare. Slutrapport från försök 1995-2000.

## I. Förord – sammanfattning - litteraturlista

### **Förord**

Inom sockerbetsodlingen används idag betydligt tyngre maskiner än tidigare, speciellt vid upptagning. Höga hjullaster ökar risken för alvpackning, vars skador riskerar att bli mycket långvariga. Därför startades 1995 ett projekt i samarbete mellan SLU och Danisco Sugar, finansierat av Stiftelsen Svensk Sockerbetsforskning och sedermera Stiftelsen Lantbruksforskning. Projektet bestod av flera olika delar, framförallt mättes effekter av körning vid betupptagning på markens fysikaliska egenskaper och skörd. Dessutom utvecklades under projekttiden en helt ny mätmetod för att mäta markrörelser med mycket hög precision, som bl.a. användes för att studera vattenhaltens inverkan vid körning. I en annan del av projektet gjordes riskbedömningar för körning vid olika tidpunkter på året. I del III, IV och V i denna rapport redovisas de viktigaste resultaten från projektets olika delar. Nedan ges en kort sammanfattning av de viktigaste resultaten från hela projektet. Resultat har också bl.a. publicerats i bl.a. fackpress, på svenska och internationella konferenser och i vetenskapliga tidskrifter. En förteckning över samtliga publikationer som härrör från projektet ges också nedan.

Ovanstående projekt har varit ett omfattande och stimulerande arbete. Vi vill passa på att tacka de många personer som på ett eller annat sätt varit inblandade i projektet. Ett tack först till Stiftelsen Sockerbetsforskning, Danisco Sugar och SLF som finansierat detta projekt, och visat stort förtroende för det sätt på vilket projektet drivits. Ett tack också till Robert Olsson och Thomas Nordström på Danisco Sugar, som haft stor medverkan i projektet och hjälpt till att fullfölja våra ibland till synes halvt vanvettiga mätningar. Ett tack till alla försöksvärdar och försöksutförare, speciellt Jörgen Mattson, Elvireborg och Bengt Hansson, St. Isie som fått en massa gropar och hjulspår i sina fält utan att klaga. Ett tack till Lennart Olsson och Patrik Persson som tog vattenhaltsprover till en meters djup under sommaren och hösten 1997 när marken var hård som betong. Ett tack till alla förare av sexradiga betupptagare som vågat köra sina maskiner bredvid våra gropar, speciellt Tomas Bengtsson som hjälpte oss med mätningarna vid Elvireborg 1997. Ett tack slutligen till den skånska himlen, som gett oss sol, regn och blåst under långa höstdagar på leriga betfält.

Uppsala augusti 2001

Johan Arvidsson

Andreas Trautner

Erika Sjöberg

## Sammanfattning

Syftet med det projekt som startades 1995 var primärt att studera effekten av körning vid betupptagning på packning i alven. Detta gjordes framförallt i tre olika studier: 1. Körning med tunga betupptagare i traditionella fältförsök - effekter på markens fysikaliska egenskaper och på skörd. 2. Mätning av tryck och markrörelser vid körning med tunga betupptagare, framförallt effekten av vattenhalt. 3. En beräkning av markens packningskänslighet under vegetationsperioden. Dessa redovisas i del III, IV och V i denna rapport.

I studie 1 startades under åren 1995-1997 sex fältförsök i Skåne för att studera effekter av körning med tunga betupptagare på markens fysikaliska egenskaper, främst i alven, och på skörd av efterföljande grödor. Försöksplanen innehöll följande led: A=ingen körning, B=fyra överfarter med normalstor upptagare (totalvikt ca 18 ton på 4 axlar), C=en överfart med 6-radig betupptagare (totalvikt ca 35 ton på två axlar), D=fyra överfarter med 6-radig betupptagare, samt E=fyra överfarter med 6-radig betupptagare under torra förhållanden.

Körning i framförallt led D orsakade statistiskt signifikanta försämringar av markens egenskaper på 30 och 50 cm djup i form av försämrad genomsläpplighet och ökat penetrationsmotstånd för rötter. Genomsläppligheten sjönk i vissa fall till en tiondel av det ursprungliga värdet. Förändringarna kvarstod och kunde påvisas flera år efter körning. Körningen i led D gav signifikanta skördesänkningar i ett par fall, men hittills har effekten på skörd i försöken varit liten. Försöken ligger fast och skördas även kommande år.

I studie 2 gjordes mätning av markrörelser vid körning, med en nyutvecklade teknik som ger betydligt högre precision än traditionella skrymdensitetsmätningar. Metoden användes framförallt för att studera vattenhaltens betydelse för den erhållna packningen vid körning med sexradiga betupptagare, men också effekten av boggiehjul och verkan av flera överfarter.

Vattenhalten hade mycket stor inverkan på packningen. Några tydliga skillnader i skillnad mellan olika jordtypers packningskänslighet gick ej att utläsa, vattenhalten vid körning var den viktigaste faktorn och hade större betydelse än om upptagaren kördes med eller utan last. Packningen föreföll öka i stort sett rätlinjigt med antalet överfarter, åtminstone upp till fyra överfarter. Markrörelsen var betydligt högre under en lastad sexradig upptagare jämfört med boggiehjulen på en lastad tereradig upptagare. Den uppmätta packningen stämde relativt bra överens med modellberäkningar baserade på markens hållfasthet. Mätningarna tyder på, att under år med normal nederbörd kommer betupptagning sent på hösten medföra stor risk för alvpackning, med de hjullaster på 5-8 ton och ringtryck kring 200 kPa som används idag.

Syftet med studie 3 var att uppskatta risken för packning vid körning under olika tidpunkter på året. Arbetet bygger på att vattenhalter i marken mättes på två jordar under en växtsäsong (1997), och användes för att kalibrera simuleringsmodellen SOIL. Därefter simulerades vattenhalter från väderdata för en 25-årsperiod, och sedan beräknades risken för packning under växtsäsongen. För de jordar som

användes beräknades också det maximala tryck som jorden kan utsättas för utan att packas, det s.k. förkonsolideringstrycket. Förkonsolideringstrycket bestämdes för fyra tensioner och ett logaritmiskt samband togs fram mellan tension och förkonsolideringstryck. Från detta samband och vattenhaltsberäkningarna gjordes en riskkalkyl över packningskänsligheten hos jordarna på hösten vid körning med en hjullast på åtta ton och 220 kPa ringtryck, tänkt att motsvara körning med en fullastad sexradig betupptagare. Risk för packning ansågs föreligga när trycket på ett visst djup var högre än markens hållfasthet vid den vattenhalten.

Enligt simuleringarna stiger risken för packning kraftigt under hösten. Som exempel beräknades risken för packning på 50 cm djup på den ena jorden stiga från kring 35 till 85 % under oktober månad, vilket är den period då största delen av betskörden äger rum.

Viktiga slutsatser från hela projektet är bl.a.

- Det står helt klart att de sexradiga betupptagare som användes i försöken orsakade packning till åtminstone 50 cm djup, vid en vattenhalt i marken som kan förväntas under sena höstar i Skåne. Packningen innebar en försämring i markens funktion i form av sänkt genomsläpplighet och ökat penetrationsmotstånd och kan bl.a. förväntas leda till försämrad dränering och större risk för vattenmättnad och syrebrist.
- Effekter på penetrationsmotstånd och genomsläpplighet fanns kvar flera år efter körning. Detta stämmer med tidigare observationer att alvpackning finns kvar under lång tid.
- Effekten på skörden har hittills varit liten, även om signifikanta skördesänkningar av packning uppmätts i ett par fall. Det är förvånande att skördeeffekterna är så pass små när effekten på marken är tydlig.
- Ökad hjullast ökar risken för alvpackning. Packning i alven av fullastade sexradiga upptagare var betydligt större än för bogserade teradiga upptagare, trots att totala körmängden (last multiplicerat med körsträcka) per ha var densamma.
- Mätning av markrörelser vid körning visar bl.a. att boggiehjul verkar som enskilda hjul ner till åtminstone 70 cm djup. Detta innebär betydligt mindre risk för alvpackning än körning med enkla hjul.
- Fyra överfarter med en sexradig upptagare orsakade mycket större packning än en överfart, vilket framgår både av traditionella markfysikaliska mätningar och mätningarna av markrörelser. Detta stämmer väl överens med resultat från tidigare försök, och visar att effekten av flera körningar är kumulativa till ett relativt stort antal överfarter. Detta gör att det är svårt att uttala sig om vilken överfart i ordningen som orsakar störst skada, eller huruvida det är bättre att koncentrera spår jämfört med att sprida ut dem över fältet.

- Inte i något fall uppmättes några signifikanta skillnader mellan kontrolleret och en överfart med upptagaren med avseende på skrymdensitet, genomsläpplighet, penetrationsmotstånd eller skörd. Resultatet visar att det var nödvändigt att genomföra led med en mycket kraftig packning för att få mätbara skillnader, bl.a. beroende på att de använda mätmetoderna är relativt grova och att den naturliga variationen i markegenskaper är stor.
- Ingenting i försöken tydde på att skånska moränjordar skulle vara mindre packningskänsliga än sedimentära åkerjordar i andra delar av landet, varken med avseende på den uppmätta packningen eller från bestämning av jordens hållfasthet.
- Det gick inte att utläsa några tydliga skillnader i packningskänslighet mellan de jordtyper som testades.
- Vattenhalten var en mycket viktig faktor för den uppmätta packningen. Under hösten sker normalt en påfyllnad av vatten i alven som ändrar packningsrisken från låg till hög. Påfyllnaden sker gradvis i underliggande lager, så att tidigt på hösten kan alven vara torr även då matjorden är fuktig eller blöt. Förhållandet är normalt det motsatta under upptorkningen på försommaren. Såväl de vattenhalter som uppmättes under hösten som beräkningar av vattenhalt visar att hela markprofilen oftast kommer nära vattenmättnad eller fältkapacitet sent på hösten.
- När alven blöts upp på hösten kommer den inte att torka ut igen, medan en viss upptorkning kan ske i matjorden. Det är därför svårt att uppskatta risken för alvpackning från matjordens bärighet. Alvpackning kan uppstå också vid relativt små spårdjup, om alven är fuktig vid körtillfället.
- Tidigare rekommendationer för att undvika alvpackning har varit att undvika axelbelastningar över 6 ton, motsvarande en hjullast på 3 ton. Detta kan fortfarande anses vara en god riktlinje. Är marken torr kan dock belastningen vara högre.
- Tidigarelagd skörd, så att skörden sker under torra förhållanden, har enligt ovanstående resonemang stor effekt för att minska packningen i alven. En viss del av upptagningen kan dock alltid förväntas ske då alven har en hög vattenhalt. I detta fall måste packning motverkas med tekniska lösningar. Detta skulle bl.a. kunna ske genom uppdelning av lasten på flera axlar eller användande av band. En tänkbar metod för att minska risken för alvpackning är också användande av låga ringtryck. För att använda låga rintryck (t.ex. 50-60 kPa) enligt däckstillverkarens rekommendationer krävs dock också en kraftig minskning av hjullasten jämfört med de högsta som används idag. För framtiden är det nödvändigt att använda brukningsmetoder som både är rationella och bevarar åkermarkens bördighet.

## Litteratur som härrör från projektet

### *I vetenskapliga tidskrifter*

- Arvidsson, J., 2000. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil Tillage Res.*, 60, 67-78.
- Arvidsson, J., Trautner, A., van den Akker, J.J.H., Shjønning, P., 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. II Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil Tillage Res.* 60, 79-89.
- Arvidsson, J.,. Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. III. Risk assessment using a soil water model. Accepterat för publicering i *Soil Tillage Res.*

### *Internationella konferenser*

- Arvidsson, J., Andersson, S., 1997. Determination of soil displacement by measuring the pressure of a column of liquid. Proceedings of 14th International Conference of ISTRO, Pulawy, Poland.
- Arvidsson, J., 1997. Soil compaction caused by heavy sugar beet harvesters - measurements with traditional and new techniques. Proceedings of IIRB (International Institute of Sugar Beet Research), Bergen op Zoom, the Netherlands, 3-5/9 1997.
- Arvidsson, J., Trautner, A., 1998. Subsoil displacement during sugarbeet harvest at different soil water contents. In: Van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. and Horn, R., (Eds.), Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community. Proceedings of the 1th workshop of the Concerted Action on Subsoil Compaction, 28-30 May 1998, Wageningen, The Netherlands. The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, The Netherlands.
- Arvidsson, J., 2000. Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters. I. Results from six long-term field experiments in southern Sweden. In: Arvidsson, J., Van den Akker, J.J.H., and Horn, R., (Eds.), Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community. Proceedings of the 3rd workshop of the Concerted Action on Subsoil Compaction, 14-16 June. Report 100, Division of Soil Management, SLU, Uppsala, Sweden.
- Arvidsson, J., Trautner, A., van den Akker, J.J.H., 2000. A model to prevent subsoil compaction. Proceedings of the 15th International Conference of ISTRO, Fort Worth, Texas, USA.
- Arvidsson, J., Trautner, A., Akker, J.J.H., 2000. Subsoil compaction - risk assessment and economic consequences. In: R. Horn, J.J.H. van den Akker, J. Arvidsson (Eds.), Subsoil compaction - distribution, processes and consequences. *Advances in GeoEcology*, 32, 2-10. Catena Verlag, Reiskirchen.

### *Svenska publikationer*

- Arvidsson, J., 1995. 38 ton järn och betor - håller jorden? Betodlaren, nr 4.
- Arvidsson, J., 1996. Jordpackning och markstruktur - vad kan man göra? HS medlemskontakt 1/96, Hushållningssällskapet i Stockholms och Uppsala län.
- Arvidsson, J., 1997. Packning av tunga betupptagare - resultat 1996. Betodlaren nr 1, 1997.
- Arvidsson, J. och Trautner, A., 1997. En modell för att undvika alvpackning, Medd. från Södra Jordbruksförsöks-distriktet, 1997.
- Arvidsson, J., 1998. Packning av tunga betupptagare. Resultat från fältförsök startade 1995 och 1996. Betodlaren, nr 1, 1998.
- Arvidsson, J., 1998. Ny teknik för att mäta packning och tryck i alven. Betodlaren, nr 1, 1998.
- Arvidsson, J., 1999. Packning av tunga betupptagare - resultat från fältförsök startade 1995, 1996 och 1997. Betodlaren nr 1, 1999.
- Arvidsson, J., 1999. Packning vid olika vattenhalter - mätningar 1998. Betodlaren nr 1, 1999.
- Arvidsson, J., 1999. Att undvika alvpackning - förfinade riktlinjer på väg. Fakta jordbruk nr 8, 1999, SLU, Uppsala.
- Arvidsson, J., Nordström, T., 1999. Fältförsök med tunga betupptagare. Medd. från Södra Jordbruksförsöks-distriktet, 1999.
- Arvidsson, J., 2000. Packning av tunga betupptagare - resultat från fältförsök startade 1995, 1996 och 1997. Betodlaren nr 2, 2000.
- Arvidsson, J., 2000. Packningsrisk vid olika vattenhalter. Betodlaren nr 2, 2000.
- Arvidsson, J., Trautner, A., 2000. Alvpackning - ett hot mot åkermarkens bördighet. Kungliga skogs och lantbruksakademiens tidskrift, 13, 31-40.
- Arvidsson, J., 2000. Hur ska man undvika alvpackning? Kungliga skogs och lantbruksakademiens tidskrift, 16, 19-24.
- Arvidsson, J., Trautner, A., Sjöberg, E., 2001. Alvpackning av tunga betupptagare. Slutrapport från försök 1995-2000.



## II. Alvpäckning - bakgrund

### **Innehållsförteckning**

Päckning – effekter på mark och gröda	1
Ringtryck - marktryck - tryck i alven	2
Tryck – päckning	5
En laboratoriebestämning av markens päckningskänslighet	5
Erfarenheter från fältförsök med päckning i alven	6
Referenser	8

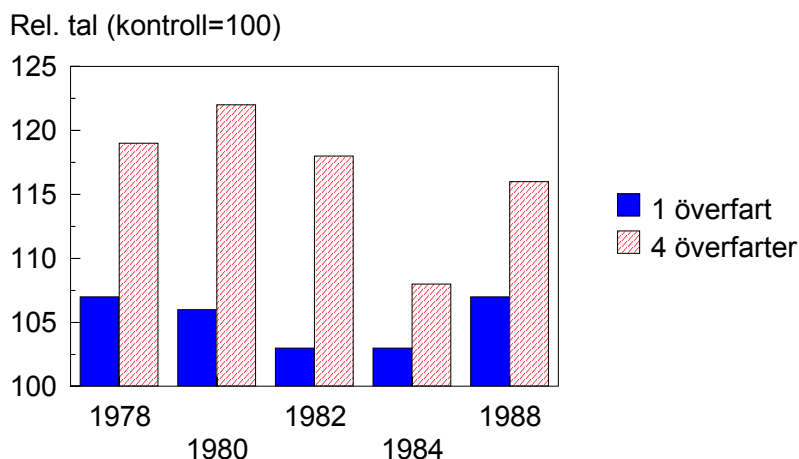
## II. Alvpäckning - bakgrund

Jordbruksmaskinerna, inte minst de som används i sockerbetsodlingen, har successivt blivit allt tyngre. Detta har lett till en berättigad oro för päckningsskador i alven. Päckningsskador i matjorden har visserligen oftast störst inverkan på skörden på kort sikt, men skador i alven finns kvar under betydligt längre tid, och blir kanske t.o.m. permanenta (figur 1). Försök med alvluckring har dessutom visat att det är svårt att reparera dessa skador. En naturlig utgångspunkt är därför att alvpäckning bör undvikas.

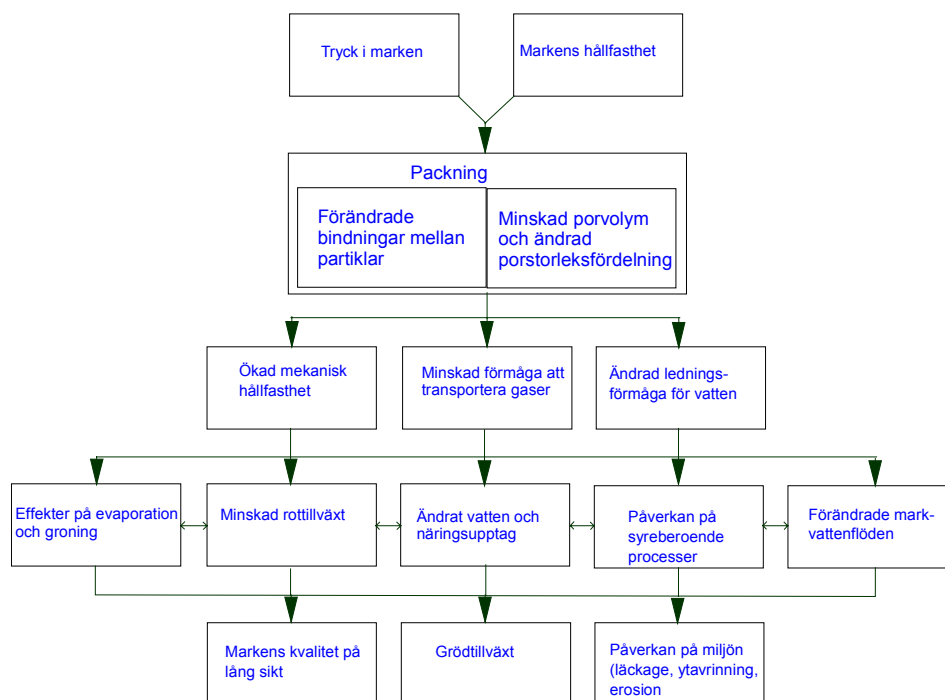
I den svenska sockerbetsodlingen används idag tvåaxlade betupptagare med en totalvikt över 35 ton. Dessa medför en uppenbar risk för skador av alvpäckning, vars kostnader skulle kunna överstiga värdet av en rationellare betupptagning. Med tanke på jordarnas framtida produktionsförmåga och de stora ekonomiska värden som står på spel är det av stor vikt att studera effekter av modern jordbruksdrift på päckning i alven. I detta avsnitt ges en bakgrund kring problematiken kring alvpäckning och en kort genomgång av tidigare gjorda försök.

### *Päckning – effekter på mark och gröda*

Päckning definieras som en ökning av markens torra skrymdensitet, eller en minskning av porositeten. De största porerna är de som påverkas mest av päckning, och dessa är av avgörande betydelse för markens funktion. Vatten transporteras lättast i stora porer, som därför är avgörande för markens genomsläpplighet eller dränering. De är också nödvändiga för syretransport, eftersom denna främst sker genom diffusion i luftfyllda porer. Slutligen sker rottillväxten lättast i grova porer. Päckning medför också att jordens hållfasthet ökar, vilket försvårar rottillväxt, ökar dragkraftbehov vid jordbearbetning och ger en grövre struktur i t.ex. såbädden. En schematisk bild av päckningseffekter ges i figur 2. Genom sin påverkan på syretransport, vattenflöden och rottillväxt inverkar jordpäckning på praktiskt taget alla markprocesser. I slutändan påverkas därmed skörd, miljö samt markens långsiktiga bördighet. Detta gäller päckning i matjord såväl som alv.



Figur 1. Markens hållfasthet mätt med vingborr på 35-45 cm djup efter körning med 10 tons axelbelastning (ingen körning=100). Körning gjordes 1977.



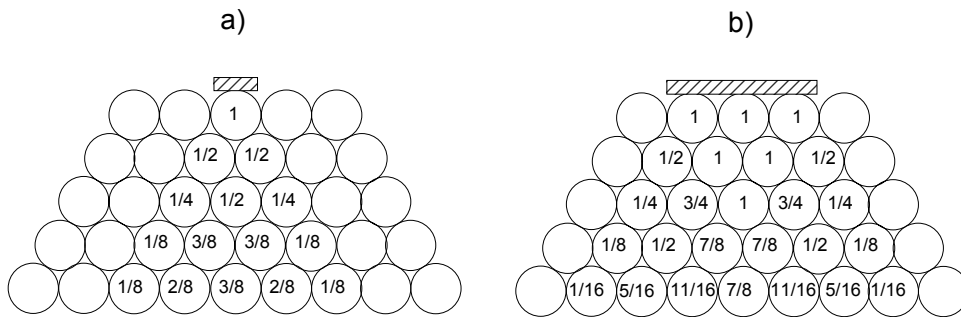
Figur 2. Schematisk bild över hur ett pålagt tryck förändrar egenskaper och processer i marken, och i slutändan grödan, markens kvalitet på lång sikt samt miljöeffekter (efter Arvidsson, 1997).

### *Ringtryck - marktryck - tryck i alven*

Man brukar säga att hjulets tryck mot marken är detsamma som däckets ringtryck. Även om detta inte är helt sant är det en ganska god beskrivning av verkligheten.

Traktorns vikt bärs upp av luften i däckets. Däcksytan kommer att påverkas av två tryck, dels av luftens påverkan på insidan av däckets, dels av marktrycket på utsidan av däckets. Om däckets vore fullständigt elastiskt, som en ballong, skulle trycket mot marken aldrig kunna bli högre än luftens tryck inne i däckets, och däckets skulle flyta ut tills anliggningsytan precis motsvarade ringtrycket. Däckets har dock i sig en viss styvhet som inte tillåter det att deformeras så mycket som ringtrycket medger. Detta gör att marktrycket normalt blir något högre än ringtrycket, speciellt uttalat blir detta vid låga ringtryck.

I figur 3 a visas en idealiserad bild av hur trycket fördelas i marken, där marken tänks bestå av ett antal likformiga klot. Ovanpå de översta av dessa klot anläggs sedan ett tryck, som sprids likformigt nedåt. Trycket är högst i markytan och sprids sedan i sidled.



Figur 3. Idealiserad bild över ett trycks fortplantning nedåt i marken a). Trycket sprider sig åt sidorna och avklingar efter hand nedåt. b) Samma tryck som (a), men anlagt över en större yta gör att trycket håller i sig till ett större djup.

Vad händer nu om vi låter samma tryck verka över en större yta? I praktiken motsvaras detta av att vi ökar vikten på en maskin, men använder större däck som medger samma ringtryck som tidigare.

Också i detta fall sprids trycket åt sidorna. Trycket som anläggs på de olika kloten kommer dock att samverka och trycket håller i sig till större djup än i första fallet, figur 3 b. Ett praktiskt exempel på detta ges i figur 4. Där visas trycket i marken ner till en meters djup för tre olika axelbelastningar, 10, 4 och 1 ton, men med samma ringtryck ( $100 \text{ kPa} = 1 \text{ kp/cm}^2$ ). Den högre belastningen har naturligt nog gjort att trycket hållit i sig till ett större djup. Detta faktum är utgångspunkt för tumregeln "Ringtrycket bestämmer trycket i matjorden, medan tyngden bestämmer trycket i alven". Beräkningen är gjord med ekvationer som presenterades av Söhne (1958).

I figur 5 visas trycktillskott i marken med en axelbelastning på 4 ton med tre olika ringtryck; 50, 100 och 150 kPa. Skillnaderna i tryck är inte utjämnade förrän vid ca 1 meters djup. En lämplig regel för ringtrycket resp. tyngdens betydelse för trycket i marken kan därför vara:

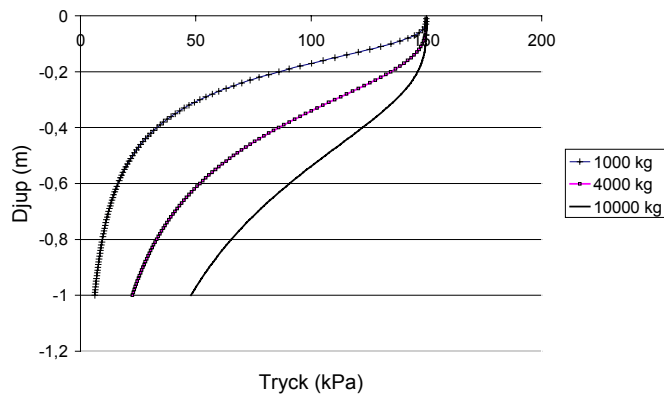
- 0-10 cm - Trycktillskottet bestäms i första hand av ringtrycket
- 10-100 cm - Trycktillskottet beror både på ringtryck och tyngd
- >100 cm - Trycktillskottet bestäms i första hand av tyngden

Vattenhalten påverkar också tryckfördelningen i marken. Det faktum att partiklarna kan röra sig i förhållande till varandra när marken är våt gör att trycket inte fördelas lika mycket i sidled utan koncentreras mera rakt under hjulet.

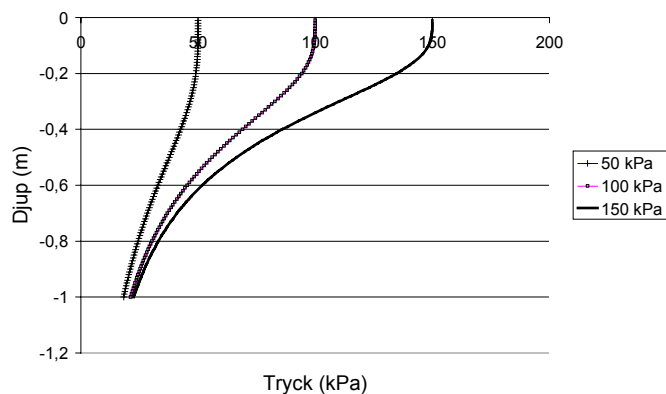
Hög vattenhalt har alltså en dubbel effekt när det gäller verkan av jordpackning:

1. Marken skadas mer av ett visst tryck ju högre vattenhalten är. (Detta gäller inom vissa gränser. Är marken helt vattenmättad kan den inte packas.)
2. En högre vattenhalt gör att trycket går mera rakt ned och ger därmed ett högre trycktillskott i alven.

De beräkningar av tryck som visas i figur 4 och 5 bygger på idealiserade antaganden om förhållanden i marken. Förutom beräkningar av tryck är det också möjligt att mäta detta direkt, med hjälp av trycksensorer installerade på olika djup. Båda metoderna har sina begränsningar. Vid en analytisk beräkning är det svårt att uppskatta den koncentrationsfaktor som anger hur mycket av trycket som sprids i sidled och hur mycket som transporteras nedåt. Trycksensorer är svåra att installera i naturligt lagrad mark, och det är svårt att exakt mäta det tryck som marken utsätts för eftersom sensorn och marken har olika egenskaper. I del IV i denna rapport redovisas mätningar av tryck i marken.



Figur 4. Tryck i marken rakt under ett hjul till 1 meters djup för tre olika hjullaster men med samma tryck i anliggningsytan.



Figur 5. Tryck i marken vid samma hjullast (4 ton) med tre olika tryck i anliggningsytan.

### *Tryck - packning*

Det är inte säkert att ett pålagt tryck innebär en förändring av marken. Jordpackning definieras som en minskning av porvolymen, d.v.s. markpartiklarna ändrar läge på ett sådant sätt att andelen hålrum i marken minskar. Även om marken trycks ihop när den överfars av ett hjul går en del av eller hela hoptryckningen tillbaka. Man skiljer därför på elastisk och plastisk deformation. Elastisk innebär att jorden går tillbaka till sin ursprungliga form medan plastisk deformation innebär en kvarstående formförändring.

Hur stor packningen (volymminskningen) av ett yttre tryck blir beror bl.a. på följande:

1. Vattenhalt.
2. Jordart.
3. Aggregatens hållfasthet. En jord med stabila aggregat (t.ex. en styv lera som använts som betesmark) har större förmåga att utstå tryck utan att skadas.
4. Tidigare packning. Jord som är kraftigt packad (t.ex. en plogsula) kräver höga tryck för att packas ytterligare. Jordens höga hållfasthet i plogsulan ger för övrigt en större tryckfördelning i sidled och minskar därför packningen djupare ned i alven.
5. Tryckets storlek. Jordens hållfasthet gör att formförändringen upp till ett visst tryck blir elastisk, däröver plastisk.
6. Den tid trycket verkar. Vid en överfart med t.ex. en traktor hinner marken normalt inte packas så mycket som om trycket fick verka under en längre tid.

### *En laboratoriebestämning av markens packningskänslighet*

Markens hållfasthet kan bestämmas på laboratorium, t.ex. genom sammantryckning i en s.k. ödometer (Fig. 6.). För lös jord har minskningen av porvolymen ett linjärt samband med logaritmen av det pålagda trycket (Horn, 1981).

När mark som tidigare packats, t.ex. alven, utsätts för ett tryck kommer den att deformeras mycket lite upp till ett visst tryck, det s.k. förkonsolideringstrycket (Fig. 7).

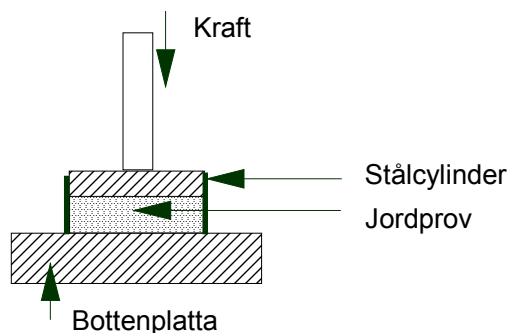
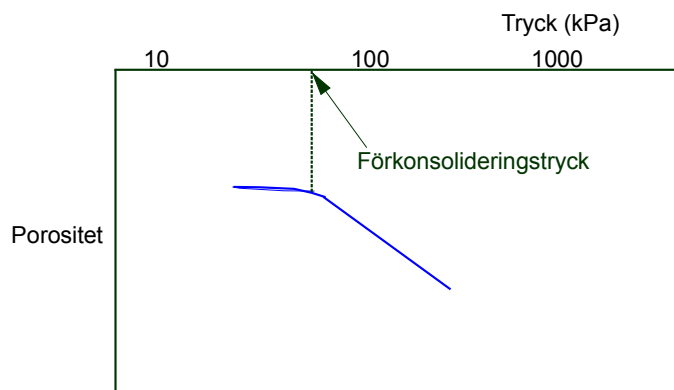


Fig. 6. Markens hållfasthet kan bestämmas bl.a. genom att mäta formförändringen när ett prov utsätts för ett enaxiellt tryck i en ödometer.

Formförändringen är då elastisk, tills trycket blir högre än förkonsolideringstrycket och vi får en plastisk deformation. Genom att bestämma förkonsolideringstrycket kan vi därmed ange det högsta tryck som marken tål utan att packas, och som kan användas som ett riktvärde som ej får överskridas för att undvika packning i alven. Metoden användes i del III, IV och V i denna rapport. Metoden kan användas för att genomföra en kartering av olika jordars packningskänslighet från prover tagna i fält, vilket har gjorts framförallt i Tyskland (Lebert och Horn, 1991). För att en sådan kartering ska bli meningsfull krävs dock att den testas mot praktiska fältförsök. I praktiken kommer också packningsförloppet ofta att följa en relativt jämn kurva, och förkonsolideringstrycket kan då vara svårt att bestämma. Dessutom är packning i fält ett betydligt mer dynamiskt förlopp än den statiska enaxiella belastningen i en ödometer.

Ett annat vanligt sätt att mäta jordens hållfasthet är att bestämma dess skjuvhållfasthet, eller kohesionen. Då bestäms hur stor skjuvspänning jorden tål vid olika normalspänningar. Kohesionen är betydligt högre för ler- än för sandjordar. Metoden användes i avsnitt IV i denna rapport.

Det högsta tryck alven tål är dock inte detsamma som det högsta tryck markytan får utsättas för, eftersom trycket normalt avtar med djupet (Fig. 3, 4 och 5).



Figur 7. Porositetsminskning vid tryckning av ostört jordprov i ödometer. Jorden genomgår plastisk deformation när trycket överstiger det högsta tryck jorden tidigare utsatts för, förkonsolideringstrycket.

#### *Erfarenheter från fältförsök med packning i alven*

Under 80-talet genomfördes ett internationellt samarbete för att studera effekterna av alvpackning på marken och på efterföljande grödor. I samtliga försök har ingått axelbelastningar på 10 ton eller mer. Körningen har utförts vid försökets start, därefter har marken brukats på vanligt sätt. En sammanfattning av packningens effekter på de olika försöksplatserna ges i tabell 1.

Tabell 1. Körning med hög axelbelastning i svenska och utländska försök med en likartad försöksuppläggning. Försöksytan har packats spår intill spår vid försökens start

Land	Jordart	Axellast (ton)	Ringtryck (kPa)	Skrymdens. <sup>1</sup> cm	Hållfasthet <sup>1</sup> cm	Skördesänkn.
Finland <sup>a</sup>	SL (48)	19 (2) <sup>2</sup>		55	40	Ja
	Mulljord	16 (2)		55	42	-
Holland <sup>b</sup>	Sand	28 (3)		30-50		Ja
	Sand	10				Ja
	Sand	10		30-50		Ja
	Sand	10		30-50		Ja
Kanada <sup>c,d</sup>	ML	12		60		Ja
	"	20		60		Ja
	LL	12	145	n.s.	35	-
USA <sup>e,f</sup>	Mjäla	10	200	75	60	Nej
	"	20	330	75	60	Ja
	Mjäla	12,5		60	46	Nej
	ML	14		60	34	Ja
Norge <sup>g</sup>	ML	14 (2)				Nej
	(morän)	26 (2)				Nej
Danmark <sup>h</sup>	Sand	22 (2)	220	40-50	50	Ja?
	Lerig mo	22 (2)	220	60-70	60	Nej
Sverige <sup>i</sup>	l Sa	10(1)+16(2)300		-	-	Ja
	l mo Sa	10(1)+16(2)300		45-60	45-55	Ja
	ML	10(1)+16(2)300		n.s.	45-55	Nej
	SL	10(1)+16(2)300		n.s.	45-55	-
	ML	10(1)+16(2)300		n.s.	35-45	Nej
	SL	10(1)+16(2)300		45-60	45-55	Ja
	MSL	10(1)+16(2)300		n.s.	45-55	Ja

<sup>1</sup> Största djup med uppmätta skillnader <sup>2</sup> Antal axlar

<sup>a</sup> Alakukku 1994, <sup>b</sup> Alblas et al 1994, <sup>c</sup> Gameda et al 1994, <sup>d</sup> Stewart och Wyn, 1994, <sup>e</sup> Hammel 1994, <sup>f</sup> Lowery och Schuler 1994, <sup>g</sup> Riley 1994, <sup>h</sup> Schönning och Rasmussen 1994, <sup>i</sup> Håkansson 1985, 1987

Resultaten är förhållandevis samstämmiga. På de flesta av försöksplaserna har det varit möjligt att konstatera markfysikaliska förändringar i form av ökad skrymdensitet eller ökad hållfasthet (mätt med penetrometer eller vingborr) ner till ca 50 cm. Det är svårare att med bestämdhet uttala sig om effekterna på avkastningen. De första åren beror naturligtvis en stor del av avkastningssänkningen på packning i matjorden. Efter 4-5 år torde effekten av denna ha klingat ut. Avkastningssänkningen är för de senare åren, för de försök som presenteras i tabell 1, ca 2,5 % i genomsnitt. Anledningen till att det är svårt att ge säkra



resultat för avkastningen är att en skördesänkning på i storleksordningen 2-3 % ofta ligger i samma storleksordning som försöksfelet, varför utslagen sällan blir signifikanta. Variationen är också stor mellan åren, eftersom packningen främst ger sig till känna under år med viss väderlek, t.ex. speciellt blöta eller torra år. På vissa jordar är det naturligtvis också möjligt att alven tål en viss packning utan att det påverkar skörden.

Det är helt klart att väldigt olika jordtyper påverkats av packning, såväl lätta jordar i Danmark och Holland, som styvare jord i Kanada, Finland och Sverige.

I det norska försöket, som låg på en moränjord, uppmättes inga skördeskillnader och det var ej tekniskt möjligt att utföra några markfysikaliska mätningar. I det svenska försöksmaterialet ingår dock inte någon moränjord, exempelvis på den för sockerbetsodling viktiga skånska sydvästmoränen. Detta var en av anledningarna till att utföra de försök som presenteras i denna rapport.

## Referenser

- Alakukku, L., Elonen, P., 1994. Finnish experiments on subsoil compaction with high axle load. *Soil Tillage Res.*, 29, 151-156.
- Alblas, J., Wanink, F., van den Akker, J., van der Werf, H.M.G., 1994. Impact of traffic-induced soil compaction of sandy soils on the yield of silage maize in The Netherlands. *Soil Tillage Res.*, 29, 157-168.
- Gameda, S., Raghavan, G.S.V., McKyes, E., Watson, A.K., Mehuys, G., 1994. Long-term effects of a single incidence of high axle load compaction on a clay soil in Quebec. *Soil Tillage Res.*, 29, 173-178.
- Hammel, J.E., 1994. Effect of high-axle load traffic on subsoil physical properties and crop yields in the Pacific Northwest. *Soil Tillage Res.*, 29, 195-204
- Håkansson, I., 1985. Swedish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Use Manage.*, 1, 113-116.
- Håkansson 1987. Hur långvariga är jordpackningens verkningar? Sveriges Lantbruksuniversitet, Fakta mark/växter nr 14. Uppsala.
- Lebert, M., Horn, R., 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.*, 19, 275-286.
- Lowery, B., Schuler, R.T. 1994. Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. *Soil Tillage Res.*, 29, 205-210.
- Riley, H., 1994. The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. *Soil Tillage Res.*, 29, 211-214.
- Schønning, P., Rasmussen, K.J., 1994. Danish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Tillage Res.*, 29, 215-228.
- Stewart, G.A., Vyn, T.J. 1994. Influence of high axle loads and tillage systems on soil properties and grain corn yield. *Soil Tillage Res.*, 29, 229-236.
- Söhne, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and compaction under tractor tires. *Agric. Eng.*, 39, 276-281, 290.

### III. Körning med tunga betupptagare - effekter på markens fysikaliska egenskaper och på skörd

#### **Innehållsförteckning**

Sammanfattning	1
Inledning	1
Material och metoder	2
Försöksplatser	4
Försöksplan och försökens utläggning	4
Markfysikaliska mätningar	5
Skörd	5
Statistisk bearbetning	5
Resultat	6
Penetrometermätningar	6
Torr skrymdensitet och mättad genomsläpplighet	6
Skörd	9
Diskussion och slutsatser	9
Referenser	12

### III. Körning med tunga betupptagare - effekter på markens fysikaliska egenskaper och på skörd

#### Sammanfattning

Körning med höga axelbelastningar medför risk för alvpackning, som kan ses som ett hot mot markens långsiktiga produktionsförmåga. Under åren 1995-1997 startades sex fältförsök i Skåne för att studera effekter av körning med tunga betupptagare på markens fysikaliska egenskaper, främst i alven, och på skörd av efterföljande grödor.

Tre av försöken var placerade på moränlättilera, två på lerig moränmo och ett på en lerfri sandjord. Försöksplanen innehöll följande led: A=ingen körning, B=fyra överfarter med normalstor upptagare (totalvikt ca 18 ton på 4 axlar), C=en överfart med 6-radig betupptagare (totalvikt ca 35 ton på två axlar), D=fyra överfarter med 6-radig betupptagare, samt E=fyra överfarter med 6-radig betupptagare under torra förhållanden. Körningen gjordes på hösten i stubbåker, led B-D i oktober-november, led E något tidigare på hösten. Våren efter körning mättes penetrationsmotstånd, torr skrymdensitet och mättad genomsläpplighet för vatten. På vissa försöksplatser upprepades mätningarna några år efter körningen. Från andra året efter körning mättes också skörden.

I genomsnitt för samtliga platser på 50 cm djup höjde packningen i led D skrymdensiteten från 1,60 till 1,64 g/cm<sup>3</sup>, och sänkte genomsläppligheten från 48 till 12 mm/h, jämfört med ingen körning. Skillnaden gäller mätningar gjorda året efter packning, och är i båda fallen statistiskt signifikant. När mätningen upprepades på två av platserna fyra år efter körning kvarstod de skillnader i genomsläpplighet som uppmättes året efter körning.

Vid mätning året efter körning mättes inga signifikanta skillnader i penetrationsmotstånd. Då mätningarna upprepades på fem av platserna 2-4 år efter körning mättes signifikant högre penetrationsmotstånd i packade led på tre försöksplatser, med högst värden i led D.

Värden från mätningar av skrymdensitet, genomsläpplighet och penetrationsmotstånd i led B var oftast intermediära jämfört med led A och D. Skillnader mellan led A och B var inte statistiskt signifikanta i något enskilt fall, men det är troligt att även den treradiga upptagaren orsakade viss packning i alven. Fyra överfarter orsakade betydligt större packning än en överfart.

Försöksmässig skörd har gjorts i sammanlagt 9 fall. Signifikanta utslag på skörden har mätts i 2 fall, med lägst skörd i led D. I genomsnitt för alla försök var skörden i led D samma som för kontrolledet.

Det står helt klart att de sexradiga betupptagare som användes i försöken orsakade packning till åtminstone 50 cm djup, vid en vattenhalt i marken som kan förväntas under sena höstar i Skåne. Packningen innebar en försämring i markens funktion i form av sänkt genomsläpplighet och ökat penetrationsmotstånd. Effekten på skörden har hittills varit liten.

#### Inledning

Alvpackning är ett problem inom dagens jordbruk, främst genom att effekterna blir mycket långvariga. Medan skador av packning i matjorden repareras på några år

(Arvidsson och Håkansson, 1996), blir effekterna i alven mycket långvariga, eller t.o.m. permanenta (Etana och Håkansson, 1994).

Packning uppstår när jorden utsätts för ett tryck som är större än dess hållfasthet (Guerif, 1994; van den Akker, 1994). Generellt ökar risken för alvpackning med ökande hjul- eller axellast, eftersom trycket då fortplantas till större djup (Söhne, 1958). Hållfastheten kommer framförallt att bero av vattenhalten men också av jordarten. Parametrar som ofta används för att bestämma markens hållfasthet är förkonsolideringstryck och skjuvhållfasthet (Horn och Lebert, 1994).

I början av 70-talet gjordes mätningar av markrörelser under tunga fordon, som tydligt visade att höga axelbelastningar orsakade packning djupt ner i marken (Danfors 1974). Mätningarna ledde till en rekommendation att begränsa axelbelastningen till 6 ton för att undvika alvpackning, en rekommendation som knappast efterlevs idag. En begränsning i de mätningar som gjordes är att de utfördes på relativt få platser och oftast vid en vattenhalt; i regel nära fältkapacitet. Markens mekaniska hållfasthet vid körningarna fastställdes ej.

Också internationellt har frågan kring avpackning rönt stort intresse. Under 80-talet genomfördes en internationell försöksserie där marken överförs med en axelbelastning på ca 10 ton, i avsikt att packa alven. Erfarenheterna var likartade på de flesta platser och jordtyper: Körning vid hög vattenhalt packade marken till ca 50 cm djup och orsakade i många fall sänkt skörd (Håkansson, 1994).

Trots detta har vikterna på lantbruksmaskiner fortsatt att öka. Under 1990-talet började sexradiga betupptagare, med axellaster närmare 20 ton, att användas i Sverige. Detta orsakade en oro bland odlare avseende risken för alvpackning, och därför startades 1995 ett projekt för att studera effekten av körning med tunga betupptagare. En viktig anledning till att starta ett nytt projekt är att inget av tidigare svenska försök kring alvpackning (Håkansson, 1985) legat på någon av moränjordarna i Skåne. Eftersom dessa har ett annat geologiskt ursprung än andra svenska åkerjordar var det möjligt att effekterna av körning med tunga maskiner skulle bli annorlunda.

Som en del av projektet startades sex fältförsök 1995-1997 för att studera effekter av körning med tunga maskiner på markens fysikaliska egenskaper och på skörd av efterföljande grödor. I denna sammanställning redovisas de mätningar av markens fysikaliska egenskaper och av skörd som genomförts i dessa försök t.o.m. hösten 1999.

## **Material och metoder**

### *Försöksplatser*

De sex fältförsöken benämns i fortsättningen Brahmehem (nära Kävlinge), Tornhill (strax utanför Lund), Sandby (nära Borrby på Österlen), Kronoslätt (mellan Trelleborg och Ystad), Elvireborg (nära Billeberga) och Rinkaby (mellan Åhus och Kristianstad). Brahmehed och Tornhill startades 1995, Sandby och Kronoslätt 1996 samt Elvireborg och Rinkaby 1997. Alla platser är moränjordar, utom Rinkaby som är en vindtransporterad sandjord.

Före försökens utläggning genomfördes en noggrann försöksplatsundersökning på varje plats. Jordarten bestämdes ner till 70 cm i samtliga fyra block (Tabell 1). Dessutom bestämdes markens skrymdensitet, mättade genomsläpplighet och vattenhållande egenskaper på cylindrar (72 mm i diameter och 50 mm höga, 3-4

cylindrar per skikt) från 30 och 50 cm djup, och ibland också från 10 och 70 cm djup (Tabell 1). Jordarten på Brahmehem och Tornhill är något mullhaltig moränlättilera, på Sandby och Kronoslätt mullfattig lerig moränmo, på Elvireborg mullfattig moränlättilera och på Rinkaby måttligt mullhaltig svagt lerig sand.

För samtliga platser gjordes också mätningar för att bestämma markens förkonsolideringstryck (det tryck då markens deformation övergår från elastisk till plastisk). Cylindrar med ostörd jord (72 mm i diameter, 25 mm höga) togs på 30 och 50 cm djup i marken, två per djup. Dessa trycktes sedan i en ödometer med 25, 50, 75, 100, 150, 200, 400 och 800 kPa, i 30 minuter per trycksteg. Formförändringen utlästes i slutet av varje intervall och förkonsolideringstrycket bestämdes enligt Casagrande (1936).

Tabell 1. Kornstorleksfördelning, halt organiskt material, porositet, vattenhalt vid ett vattenavförande tryck av 1 och 150 m vp. och skrymdensitet på de sex försöksplatserna

	Kornstorlek (g 1000g <sup>-1</sup> )				Org. mat. (g 100g <sup>-1</sup> )	Porositet (%)	Vattenhalt <sup>1</sup>		Skrymd. (g cm <sup>-3</sup> )
	Ler	Mjåla	Mo	Sand			1 m vp.	150 m vp.	
Tornhill									
10-15 cm	219	167	386	228	21				
30-35 cm	256	164	362	218	9	38,4	30,3	16,3	1,66
50-55 cm	277	318	405	203	6	41,5	29,1	18,7	1,57
70-75 cm	274	310	416	213	4				
Brahmehem									
10-15 cm	191	150	404	255	25				
30-35 cm	234	149	374	242	6	37,3	30,1	16,3	1,68
50-55 cm	208	145	441	207	3	40,4	28,9	12,0	1,60
70-75 cm	166	178	356	300	4				
Sandby									
10-15 cm	121	140	385	355	19	43,4	26,1	8,0	1,49
30-35 cm	91	143	385	381	10	37,2	22,9	9,0	1,68
50-55 cm	114	160	379	347	5	41,4	23,2	7,2	1,54
70-75 cm	158	167	385	289	3				
Kronoslätt									
10-15 cm	129	136	355	380	20	43,7	26,5	8,3	1,47
30-35 cm	129	132	363	377	18	40,9	24,6	9,6	1,56
50-55 cm	169	153	341	337	8	35,6	21,3	13,7	1,72
70-75 cm	147	147	370	336	4	35,6	25,4	15,6	1,73
Elvireborg									
10-15 cm	200	210	348	241	21	45,4	30,0	12,5	1,50
30-35 cm	301	167	320	212	11	38,1	31,0	20,1	1,54
50-55 cm	366	219	306	109	3	38,3	28,5	10,5	1,62
70-75 cm	323	243	317	117	7	34,5	22,4	12,2	1,76
Rinkaby									
10-15 cm	35	21	237	707	32				
30-35 cm	23	0	153	824	14	48,5		2,7	1,38
50-55 cm	17	18	151	814	3	43,7		2,6	1,51
70-75 cm	19	2	181	798	3				

<sup>1</sup>% (vol/vol)

Tabell 2. Förkonsolideringstryck (kPa) vid ett vattenavförande tryck av 0,6 och 3 m vp. på 30 och 50 cm djup på de olika försöksplatserna (något värde för Rinkaby kunde ej erhållas från ödometertestet)

	0,6 m vp.		3 m vp.	
	30 cm	50 cm	30 cm	50 cm
Tornhill	120	120	63	129
Brahmehem	83	81	120	126
Sandby	117	135	148	132
Kronoslätt	53	60	122	70
Elvireborg	53	56	65	95

### *Försöksplan och försökens utläggning*

De sex försöken har lagts ut som randomiserade blockförsök med fyra upprepningar. I försöksplanen ingår följande led:

	<u>tonkm/ha</u>
A= Ingen körning	0
B= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med normalstor upptagare	760
C= Försöksrutan täcks av spår en gång med 6-radig betupptagare	190
D= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med 6-radig betupptagare	760
E= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med 6-radig betupptagare under torra förhållanden.	760

*Normalstor upptagare:* Edenhall 722 alt. 723 med axeltryck på ca 16 ton, varav 13 ton bärs upp av upptagarens hjul. Dessa upptagare är utrustade med boggie på ena sidan (16.9-34) och ett enkelt hjul på andra sidan (750/60-30.5). Ringtrycket i betupptagarens hjul var 200-250 kPa och i traktorhjulena 200-250 kPa.

*6-radig upptagare:* Totalvikt på ca. 35 ton fördelat på fyra hjul. P.g.a. maskinernas stora vikt var det ej möjligt att väga dem i fält. Den betupptagare som användes i försöket vid Hemmesdynge vägdes vid ett tillfälle, och vägde då 34,5 ton med last. Med upptagarbordet upplyft var vikten på framaxeln 20,4 ton. Upptagarna kördes med 850-1050 mm breda hjul, som kördes med ringtryck mellan 170 och 240 kPa.

Av praktiska skäl har försöken lagts ut i stubbåker. Vid varje körtillfälle bestämdes markens vattenhalt och ringtrycket i de hjul som överför marken. Körning i led B-D gjordes under "våta" förhållanden i oktober eller november. "Torra" förhållanden i led E erhöles genom att utföra körningen tidigare på hösten. Vattenhalt vid körning i de olika leden anges i tabell 3. Höstarna 1995, 1996 och 1997 var relativt torra och ingen av körningarna gjordes under speciellt svåra förhållanden. Spår djup efter 4 överfarer med de sexradiga upptagarna var i regel 5-10 cm, och något mer för den tre-radiga.

### *Markfysikaliska mätningar*

Våren efter försökets utläggning gjordes i samtliga försök mätningar av markens fysikaliska egenskaper (penetrationsmotstånd, skrymdensitet och mättad

genomsläpplighet). Dessutom upprepades vissa av mätningarna efter att försöken legat några år.

#### Penetrometermätningar:

Penetrometermätningar utfördes i samtliga led på alla försöksplatser på våren efter körning med en Bush Recording Penetrometer, kondiameter 12,8 mm. Motståndet mättes för 15 stick per ruta (60 per led) från markytan till 50 cm djup med 2 eller 3,5 cm intervall. Under 1998 upprepades mätningarna på försöksplatserna Brahmehem och Tornhill, och 1999 på Tornhill, Sandby, Kronoslätt och Elvireborg.

#### Skrymdensitet och mättad genomsläpplighet:

I försöken togs ostörda jordprover i cylindrar (72 mm i diameter, 50 mm höga) ut för bestämning av torr skrymdensitet och mättad genomsläpplighet för vatten. Fyra cylindrar per ruta och skikt togs på djupen 30-35 och 50-55 cm. Under 1996 gjordes denna provtagning endast i led A och D på Tornhill och Brahmehem, medan provtagningar 1997 och 1998 gjordes i alla led på övriga fyra försöksplatser. Under 1999 gjordes en förnyad provtagning på Tornhill och Brahmehem, nu i samtliga led.

Mättad genomsläpplighet för vatten mättes med konstant tryckhöjd enligt Andersson (1955). Torr skrymdensitet bestämdes genom vägning efter torkning vid 105° C under tre dygn.

#### Skörd

Året efter packning har i samtliga fall odlats sockerbetor, som ej har skördats försöksmässigt. Första försöksmässiga skörd gjordes 1997 i försöket på Tornhill. Försöket på Brahmehem 1997 utgick på grund av hagelskador. 1998 och 1999 gjordes försöksmässig skörd på fyra försöksplatser per år.

#### Statistisk bearbetning

Statistisk analys av resultaten har gjorts med SAS (Statistical Analysis System, SAS, 1985). För den mättade genomsläppligheten har analysen gjorts för geometriska medelvärden, eftersom dessa kan antas vara bättre normalfördelade än aritmetiska (Bathke och Cassel, 1991). De värden på genomsläpplighet som redovisas i resultatdelen är också geometriska medelvärden

Tabell 3. Vattenhalt (% vikt/vikt) på samtliga försöksplatser vid försökens utläggning. "Våt" =vattenhalt vid körning i led B, C och D, "Torr" = vattenhalt vid körning i led E

Djup (cm)	Tornhill		Brahmehem		Sandby		Kronoslätt		Elvireb.	Rinkaby
	Torr	Våt	Torr	Våt	Torr	Våt	Torr	Våt	Våt	Våt
10	18,9	18,8	20,4	20,8	12,6	15,9	15,5	16,1	21,3	11,4
30	16,6	15,4	18,4	17,8	12,8	13,4	14,2	14,3	18,3	7,0
50	15,7	17,2	18,8	19,3	13,1	13,4	15,7	16,1	17,4	4,8
70	14,2	17,8	19,8	20,5	6,5	14,4	13,8	13,6	15,5	7,1

## Resultat

### *Penetrometermätningar*

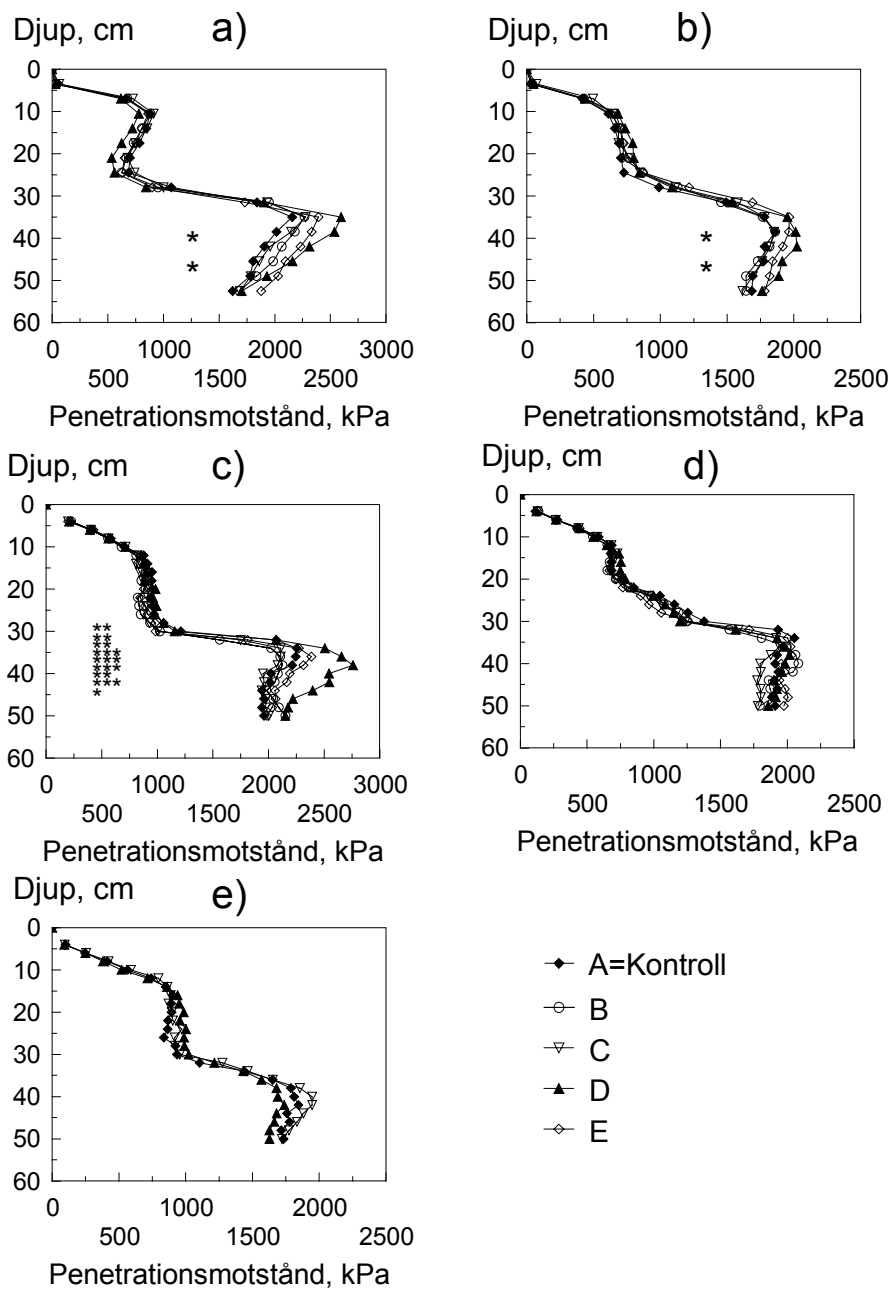
På våren efter packning var skillnaderna i penetrationsmotstånd mellan leden små på samtliga försöksplatser. I två av försöken finns en tendens till högre penetrationsmotstånd i alven men skillnaderna var ej signifikanta. I några av försöken var penetrationsmotståndet i matjorden signifikant högre i led som packats, trots att fälten plöjts mellan körning och mätning. I Rinkaby fanns en tendens till högre penetrationsmotstånd i alven i packade led, men skillnaderna var ej statistiskt signifikanta. Resultat från de mätningar som gjordes några år efter försökens start redovisas i figur 1. I försöken på Tornhill, Brahmehem och Sandby uppmättes signifikanta skillnader i penetrationsmotstånd i alven mellan leden. Det var i regel högst penetrationsmotstånd i led D, följt av led E.

### *Torr skrymdensitet och mättad genomsläpplighet*

Markens torra skrymdensitet och mättade genomsläpplighet på de olika försöksplatserna mätt våren efter körning redovisas i tabell 4. Fyra överfarter med sexradig betupptagare medförde en ökad skrymdensitet och minskad genomsläpplighet på både 30 och 50 cm djup på de flesta av platserna; i många fall är skillnaderna signifikanta. På Tornhill, Brahmehem och Sandby medförde packningen i led D en kraftigt försämrad genomsläpplighet. I försöket på Sandby blev packningen betydligt högre av den sexradiga än av den tre-radiga upptagaren. I genomsnitt för samtliga platser sjönk genomsläppligheten i led D till från 48 till 12 mm/h jämfört med kontrolledet, medan skrymdensiteten ökade från 1,60 till 1,64 g/cm<sup>3</sup>. I båda fallen är skillnaderna statistiskt signifikanta ( $P < 0,05$ ).

Resultat från mätningar gjorda 1999 på Tornhill och Brahmehem redovisas i tabell 5. På både 30 och 50 cm djup mättes kraftigt försämrad genomsläpplighet i packade led, framförallt i led D, på båda platserna. Skillnaderna var statistiskt signifikanta på 50 cm djup på Tornhill, och på både 30 och 50 cm djup på Brahmehem. De uppmätta skillnaderna i skrymdensitet var relativt små, och ej statistiskt signifikanta.





Figur 1. Penetrationsmotstånd i marken på fem av försöksplatserna, mätt 2-4 år efter körning. a) Brahmehem 1998, b) Tornhill 1999, c) Sandby 1999, d) Kronoslätt 1999, e) Elvireborg 1999. A=Ingen körning, B= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med normalstor upptagare (totalvikt ca 18 ton på 4 axlar, C= Försöksrutan täcks av spår en gång med 6-radig betupptagare (totalvikt ca 35 ton på två axlar), D= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med 6-radig betupptagare, samt E= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med 6-radig betupptagare, torra förhållanden.

Tabell 4. Mättad genomsläpplighet för vatten och skrymdensitet för samtliga försöksplatser vid mätning på våren efter körning. Värden som ej följs av samma bokstav är signifikant skilda ( $P < 0,05$ )

	<u>Mättad genomsläpplighet (mm h<sup>-1</sup>)</u>		<u>Skrymdensitet Mg m<sup>-3</sup></u>	
	30 cm	50 cm	30 cm	50 cm
<b>Tornhill</b>				
A <sup>1</sup>	21,8	45,7a	1,66	1,60
D	4,7	4,0b	1,67	1,69
<u>Signifikans</u>	n.s.	*	n.s.	n.s.
<b>Brahmehem</b>				
A	7,4	80,6	1,68b	1,57
D	0,8	5,7	1,74a	1,63
<u>Signifikans</u>	P=0,11	P=0,06	**	n.s.
<b>Sandby</b>				
A	24,5a	28,3	1,71b	1,71
B	13,0ab	15,4	1,73b	1,71
C	7,6ab	14,3	1,76b	1,72
D	0,8c	2,8	1,84a	1,79
E	6,3b	20	1,77b	1,71
<u>Signifikans</u>	***	P=0,06	*	n.s.
<b>Kronoslätt</b>				
A	5,6	43,7	1,70	1,64
B	2,6	26,2	1,75	1,67
C	6,6	15,1	1,74	1,66
D	9,6	36,7	1,69	1,67
E	3,1	28,6	1,76	1,69
<u>Signifikans</u>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
<b>Elvireborg</b>				
A	1,3	6,2	1,66b	1,57
C	0,61	2,7	1,70ab	1,62
D	0,69	5,5	1,71a	1,60
<u>Signifikans</u>	n.s.	n.s.	*	n.s.
<b>Rinkaby</b>				
A	116	458	1,38	1,51
B	252	160	1,57	1,49
C	161	274	1,48	1,54
D	184	193	1,56	1,49
<u>Signifikans</u>	n.s.	P=0,09	P=0,11	n.s.
<b>Samtliga platser</b>				
A	12,2	48,4a	1,63	1,60b
D	3,9	11,6b	1,70	1,64a
<u>Signifikans</u>	n.s.	*	P=0,06	*

<sup>1</sup> A=Ingen körning, B=4 överfarter med 3-radig upptagare, C=1 överfart med 6-radig betupptagare, D=4 överfarter med 6-radig betupptagare, samt E= som D men under torrare förhållanden.

Tabell 5. Mättad genomsläpplighet för vatten och skrymdensitet för Brahmehem och Tornhill. Körning gjordes 1995, mätningarna gjordes våren 1999. Värderna som ej delar samma bokstav är signifikant skilda ( $P < 0,05$ )

	Mättad genomsläpplighet ( $\text{mm h}^{-1}$ )		Skrymdensitet $\text{Mg m}^{-3}$	
	30 cm	50 cm	30 cm	50 cm
Tornhill				
A <sup>1</sup>	11,4	45,3a	1,64	1,58
B	9,1	19,8a	1,67	1,63
C	7,7	7,6ab	1,69	1,57
D	3,2	1,3b	1,63	1,59
E	2,6	11,4a	1,68	1,64
<u>Signifikans</u>	n.s.	*	n.s.	n.s.
Brahmehem				
A	2,3ab	23,8ab	1,76	1,66
B	3,4ab	36,3a	1,71	1,60
C	9,5a	39,0a	1,74	1,64
D	0,33c	4,7b	1,78	1,70
E	0,97bc	4,3b	1,78	1,68
<u>Signifikans</u>	*	*	$P=0,11$	$P=0,08$

<sup>1</sup> A=Ingen körning, B=4 överfarter med 3-radig upptagare, C=1 överfart med 6-radig betupptagare, D=4 överfarter med 6-radig betupptagare, samt E= som D men under torrare förhållanden.

### Skörd

Skörd på de platser som skördats försöksmässigt t.o.m. 2000 redovisas i tabell 6. Skillnader i skörd mellan leden har i genomsnitt varit liten. Endast i två fall har uppmätts signifikanta skördeskillnader, i båda fallen med lägst skörd i led D. I medeltal för samtliga försök är skörden i led D samma som för kontrollerdet, medan skörden i övriga led är en procent högre.

### Diskussion och slutsatser

Resultaten från fältförsöken är relativt entydiga: körning med tunga betupptagare under fuktiga förhållanden innebär en stor risk för jordpackning till åtminstone 50 cm djup. I genomsnitt för samtliga platser var skrymdensiteten och genomsläppligheten signifikant högre respektive lägre i led D än i kontrollerdet på 50 cm djup, och på tre platser mättes ett högre penetrationsmotstånd i alven i packade led jämfört med kontrollerdet. De negativa effekter av packning som oftast anges är försämrad transport av vatten och luft, vilket kan leda till syrebrist, samt ökat mekaniskt motstånd, vilket försämrar möjligheterna för rotutveckling. I försöken kunde vi alltså mäta en försämring av båda dessa egenskaper i alven i packade led. Resultaten stämmer också väl överens med tidigare mätningar (Håkansson, 1994), där körning med höga axelbelastningar orsakat packning till ca 50 cm djup på olika jordtyper i norra Europa och Nordamerika. Vid mätningar av penetrationsmotstånd på våren efter körning föregående höst uppmättes inga signifikanta skillnader i alven. Vid mätningar några år efter försökens

Tabell 6. Relativ skörd (ingen körning=100) efter körning med tunga betupptagare, 1997-2000

Plats	År	Gröda	Rel. skörd (A'=100)					Sign.
			A	B	C	D	E	
Tornhill	1997	Vårkorn	100	99	101	95	95	*
Tornhill	1998	Höstraps	100	105	105	106	105	n.s.
Brahmehem	1998	Höstvete	100	102	103	103	105	n.s.
Sandby	1998	Årter	100	101	91	91	98	n.s.
Kronoslätt	1998	Vårkorn	100	102	100	99	101	n.s.
Tornhill	1999	Höstvete	100	101	102	104	103	n.s.
Kronoslätt	1999	Höstvete	100	100	103	101	101	n.s.
Sandby	1999	Höstvete	100	102	98	97	99	*
Elvireborg	2000	Höstvete	100		99	96		n.s.
Sandby	2000	Rödsvingelfrö	100	106	103	108	112	n.s.
Brahmehem	2000	Korn	100	99	102	99	96	n.s.
Kronoslätt	2000	Höstraps	100	99	98	95	99	n.s.
Medel (n=12)			100		100	100		n.s.
Medel (n=11)			100	101	101	100	101	n.s.

<sup>1</sup>A= Ingen körning, B= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med normalstor upptagare (totalvikt ca 20 ton), C= Försöksrutan täcks av spår en gång med 6-radig betupptagare (totalvikt ca 35 ton), D= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med 6-radig betupptagare, E= Försöksrutan täcks av spår fyra gånger med 6-radig betupptagare under torra förhållanden.

start var däremot penetrationsmotståndet i alven signifikant högre i packade led jämfört med kontrolledet på tre av försöksplatserna. En förklaring till skillnader mellan mättillfällena kan vara s.k. age-hardening, d.v.s. en ökning av markens hållfasthet med tiden (Dexter m.fl., 1988). Semmel m.fl. (1990) redovisade hur hållfastheten hos aggregat ökade med antalet uttorknings-vättningscykler. Det är möjligt att det krävdes ett eller flera uttorkningsförlopp för att skillnaden i penetrationsmotstånd skulle utvecklas. Resultaten visas en av svårigheterna med att använda penetrometer för att mäta markens hållfasthet. Förhöjt penetrationsmotstånd i alven efter körning med hög axelbelastning mättes också av t.ex. Alakukku och Elonen (1994), Alblas m.fl. (1994), Etana och Håkansson (1994), Schjønning och Rasmussen (1994) och Stewart och Vyn (1994).

Definitionsmässigt innebär packning vid körning med jordbruksmaskiner att skrymdensiteten ökar p.g.a. en sammantryckning av markens grövsta, luftfyllda porer. Skrymdensiteten i sig har relativt liten betydelse för marken som växtplats, utan de negativa effekterna av packning beror främst på minskningen av antalet grova porer och en ökning av markens mekaniska hållfasthet. Också små förändringar i skrymdensitet kan leda till stora förändringar i markens mättade genomsläpplighet (Dawidowski och Koolen, 1987, Horton m.fl., 1994), som därmed kan vara en känsligare parameter än skrymdensitet för att mäta effekter av packning. I de resultat som presenteras här var denna effekt mycket tydlig: t.ex. i mätningarna på Tornhill och Brahmehem 1999 mättes signifikant lägre genomsläpplighet i packade led i tre fall av fyra, medan skillnader i skrymdensitet inte var signifikanta i något fall. På Tornhill,

Brahmehem och Sandby uppmättes 5-10 ggr lägre genomsläpplighet i led D jämfört med kontrolledet, och i genomsnitt orsakade denna packning en sänkning av genomsläppligheten från 61 till 9,5 mm/h. Resultaten från Rinkaby är relativt osäkra, markprofilen innehöll stråk med sand av olika grovlek vilket gjorde inomfältvariationen stor. Ofta anges 30-40 mm/h som ett riktvärde för god genomsläpplighet, och i många fall har packningen därmed sänkt värdet från en god till en suboptimal nivå. Mätningarna visar också förekomsten av en plogsula på alla platser utom Sandby, i form av den högre skrymdensiteten och lägre genomsläppligheten i skiktet 30-35 cm jämfört med 45-50 cm. Resultaten har ett stort vetenskapligt värde, eftersom det finns relativt få mätningar av hur packning förändrar genomsläppligheten i alven. Undantag är t.ex. Hammel (1994), Lowery och Schuler (1994) och Alakukku (1997).

Fyra överfarter med sexradig betupptagare under fuktiga förhållanden orsakade generellt den största packningen. Också i ledet med körning med treradig upptagare var genomsläppligheten oftast lägre än i kontrolledet, även om skillnaderna inte var statistiskt signifikanta (tabell 4 och 5). Sammantaget alla resultat förefaller det troligt att också den treradiga upptagaren orsakat packning i alven, åtminstone på 30 cm djup.

Fyra överfarter med en sexradig upptagare orsakade mycket större packning än en överfart (tabell 4 och 5, figur 1). Detta stämmer väl överens med resultat från tidigare försök (Etana and Håkansson, 1994; Schjønning and Rasmussen 1994), och visar att effekten av flera körningar är kumulativa till ett relativt stort antal överfarter. Detta gör att det är svårt att uttala sig om vilken överfart i ordningen som orsakar störst skada, eller huruvida det är bättre att koncentrera spår jämfört med att sprida ut dem över fältet. Inte i något fall uppmättes några signifikanta skillnader mellan kontrolledet och en överfart med upptagaren. Resultatet visar att det var nödvändigt att genomföra led med en mycket kraftig packning för att få mätbara skillnader, bl.a. beroende på att de använda mätmetoderna är relativt grova och att den naturliga variationen i markegenskaper är stor.

Högre penetrationsmotstånd i packade led mättes fyra år efter körning (figur 1). Detta stämmer väl med tidigare erfarenheter att effekter av alvpackning finns kvar under lång tid, Etana och Håkansson (1994) uppmätte högre mekanisk hållfasthet i alven ca 10 år efter körning. På Tornhill och Brahmehem var skillnader i genomsläpplighet ungefär lika stora fyra år efter körning som under året efter (tabell 4 och 5). Detta visar att också effekter på genomsläpplighet finns kvar under lång tid, något som är dåligt belyst i tidigare undersökningar. Det skulle vara mycket värdefullt att komma tillbaka och upprepa dessa mätningar om ytterligare ett antal år, för att se om effekterna kvarstår.

En hypotes som fördes fram när försöken startades var att moränleror, som en gång packats av inlandisen, skulle vara mindre packningskänsliga än t.ex. sedimentära jordar. Trots en låg total porositet i alven har dock försöksjordarna en luftfylld porositet kring 10 % vid en meters vattenavförande tryck (tabell 1), vilket är ett relativt högt värde. Detta visar att jordarna har en ganska hög andel grova porer som kan packas samman. Förkonsolideringstrycket vid 60 cm vattenavförande tryck varierar

mellan 53 och 135 kPa, vilket inte är särskilt höga värden jämfört med undersökningar av bl.a. Lebert (1989), Salire m. fl. (1994), Dios Jr och Pierce (1995) och Veenhof och McBride (1996). Mätningarna av markfysikaliska och markmekaniska egenskaper hos dessa skånska jordar tyder alltså inte på att de skulle vara särskilt motståndskraftiga mot packning. Tijink (1998) beräknade trycket för en betupptagare med en hjullast av 10 ton till ungefär 230 och 165 kPa på 30 respektive 50 cm djup. Dessa värden är högre än de uppmätta värdena för förkonsolideringstrycket, vilket innebär en risk för packning (van den Akker, 1994).

Trots de stora effekterna av körning på markens fysikaliska egenskaper har effekterna på skörden i genomsnitt varit små. I den internationella försöksserien för att mäta effekter av packning i alven var den genomsnittliga skördesänkningen ca 2,5 % vid ungefär samma kör mängd. De skånska försöken behöver dock skördas ytterligare några år för att ge ett säkrare underlag. Eftersom effekterna antas vara mycket långvariga är också små effekter på skörden betydelsefulla.

## Referenser

- Alakukku, L., Elonen, P., 1994. Finnish experiments on subsoil compaction with high axle load. *Soil Tillage Res.*, 29, 151-156.
- Alakukku, L., 1997. Properties of fine-textured subsoils as affected by high axle load traffic. *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B: Soil and Plant Science.*
- Alblas, J., Wanink, F., van den Akker, J., van der Werf, H.M.G., 1994. Impact of traffic-induced soil compaction of sandy soils on the yield of silage maize in The Netherlands. *Soil Tillage Res.*, 29, 157-168.
- Andersson, S., 1955. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. VIII. En experimentell metod. (Soil physical measurements on arable land. VIII. An experimental method). *Grundförbättring* 8, 35-44.
- Arvidsson, J., Håkansson, I. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil Tillage Res.*, 39, 175-198.
- Bathke, G.R., Cassel, D.K., 1991. Anisotropic variation of profiles characteristics and saturated hydraulic conductivity in an utisol landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 333-339.
- Casagrande, A., 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Proc. of ICSMFE.* Cambridge, MA, 22-26 June 1936, vol. 3. Cambridge, MA, pp. 60-64.
- Danfors, B., 1974. Packning i alven. (Compaction of the Subsoil). Swedish Inst. Agric. Eng., Uppsala, Sweden. Rep. S 24, 91 pp. (In Swedish, with English summary).
- Dawidowski, J.B. & Koolen, A.J. 1987. Changes in soil water suction, conductivity and dry strength during deformation of wet undisturbed samples. *Soil Tillage Res.*, 9, 169-180.
- Dexter, A.R., Horn, R., Kemper, W.D., 1988. Two mechanisms for the age-hardening of soil. *Journal of Soil Science*, 39, 163-175.

- Dias Junior, M.S., Pierce, F.J., 1995. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, 8, 139-151.
- Etana, A., Håkansson, I., 1994. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil Tillage Res.*, 29, 167-172.
- Guerif, J., 1994. Effects of soil compaction on soil strength parameters. In: *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam.
- Håkansson, I., 1985. Swedish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Use Manage.*, 1, 113-116.
- Håkansson, I. (ed.) 1994. Subsoil compaction by high axle load traffic. Special Issue of *Soil Tillage Res.*, 29, 105-306.
- Hammel, J.E., 1994. Effect of high-axle load traffic on subsoil physical properties and crop yields in the Pacific Northwest. *Soil Tillage Res.*, 29, 195-204.
- Horn, R. & Lebert, M. 1994. Soil compactibility and compressibility. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam.
- Horton, R., Ankeny, M.D. & Allmaras, R.R. 1994. Effects of soil compaction on soil hydraulic properties. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam.
- Lebert, M., 1989. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Ph.D. thesis, Univ. Bayreuth, Germany, 131 pp.
- Lowery, B., Schuler, R.T. 1994. Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. *Soil Tillage Res.*, 29, 205-210.
- Salire, E.V., Hammel, J.E., Hardcastle, J.H., 1994. Compression of intact subsoil under short-duration loading. *Soil Tillage Res.*, 31, 235-248.
- SAS 1985. SAS User's Guide: Statistics, 1982 Edition. SAS Institute Inc., Cary, N:C: 1985. 584 pp.
- Schjønning, P., Rasmussen, K.J., 1994. Danish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Tillage Res.*, 29, 215-228.
- Semmel, H., Horn, R., Hell, U., Dexter, A.R. & Schulze, E.D., 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technol.*, 3, 113-129.
- Stewart, G.A., Vyn, T.J. 1994. Influence of high axle loads and tillage systems on soil properties and grain corn yield. *Soil Tillage Res.*, 29, 229-236.
- Tijink, F.J.G., 1998. Mechanisation strategies to reduce traffic-induced soil compaction. In: *Soil Compaction and Compression in Relation to Sugar Beet Production. Advances in Sugar Beet Research*, vol. 1. International Institute for Beet Research, Brussels, Belgium.
- van den Akker, J.J.H., 1994. Prevention of subsoil compaction by tuning the wheel load to the bearing capacity of the subsoil. In: *Proceedings of 13th International Conference of ISTRO*, Aalborg, Denmark, 537-542.
- Veenhof, D.W., McBride, R.A., 1996. Overconsolidation in agricultural soils: 1. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 362-373.

## IV. Tryck och markrörelser vid körning med tunga betupptagare – fältmätningar och modellberäkningar

### **Innehållsförteckning**

Sammanfattning	1
Introduktion	1
Material och metoder	2
Mätprincip för att mäta markrörelser	2
Mätning av av marktryck och understödsyta	3
Mätningar 1996, 1997 och 1998	3
Bestämning av markens hållfasthet vid körning	4
Modellberäkningar av packning	5
Resultat	5
Packning vid olika vattenhalter, 1997	5
Packning vid olika vattenhalter, mätningar 1998	7
Mätning av packning på olika jordtyper	9
Verkan av flera överfarter	9
Sexradig jämfört med treradig upptagare	10
Tryck i marken och i understödsytan	11
Modellberäkningar av packning	12
Diskussion och slutsatser	13
Referenser	14



## IV. Tryck och markrörelser vid körning med tunga betupptagare – fältmätningar och modellberäkningar

### Sammanfattning

Jordpackning bestäms oftast genom mätning av markens torra skrymdensitet, en metod som ger relativt låg precision. Under 1996 utvecklades en metod för att mäta vertikala markrörelser på olika djup vid körning med maskiner i fält. Metoden har hög noggrannhet, och har använts framförallt för att studera vattenhaltens betydelse för den erhållna packningen.

Mätningar av markrörelser gjordes på 30, 50 och 70 cm djup på olika jordar vid körning med lastade och olastade sexradiga betupptagare med en totalvikt på ca 35 respektive 22 ton. Under 1997 gjordes mätningar på en moränlättilera (Elvireborg) vid olika vattenhalter, liknande mätningar utfördes på en annan moränlättilera (St. Isie) under 1998. Vid samtliga tillfällen togs prover ut för att bestämma markens hållfasthet (förkonsolideringstryck). Den uppmätta packningen jämfördes sedan med modellberäkningar baserade på markens hållfasthet. Mätning vid enstaka tillfällen gjordes också på ytterligare fem jordar. Dessutom studerades verkan av flera överfarter. Mätningar av markrörelse gjordes också för sexradig upptagare jämfört med boggiehjul på en bogserad upptagare.

Vattenhalten hade mycket stor inverkan på packningen. På Elvireborg mättes packning endast på 30 cm djup i den torraste jorden medan körning under våta förhållanden orsakade packning också på 50 och 70 cm. Mönstret var liknande på St. Isie, men packningen var större än på Elvireborg, främst därför att nederbörden sommaren och hösten var betydligt högre under 1998 jämfört med 1997. Den uppmätta packningen stämde relativt bra överens med modellberäkningar baserade på markens hållfasthet. Några tydliga skillnader i skillnad mellan olika jordtypers packningskänslighet gick ej att utläsa, vattenhalten vid körning var den viktigaste faktorn. Vattenhalten hade också större betydelse för packningen än om upptagaren kördes med eller utan last. Packningen föreföll öka i stort sett rätlinjigt med antalet överfarter, åtminstone upp till fyra överfarter. Markrörelsen var betydligt högre under en lastad sexradig upptagare jämfört med boggiehjulen på en lastad tre-radig upptagare. Mätningarna tyder på, att under år med normal nederbörd kommer betupptagning sent på hösten medföra stor risk för alvpackning, med de hjullaster på 5-8 ton och ringtryck kring 200 kPa som används idag.

### Introduktion

Jordpackning innebär per definition en ökning av markens torra skrymdensitet, och mätning av packning görs därför oftast genom att bestämma skrymdensitetenden t.ex. genom cylinderprovtagning av ostörda jordprover. Denna metod är dock grov, ger låg precision och är arbetskrävande, speciellt vid provtagning i alven. En betydligt högre precision kan uppnås om man istället mäter markens rörelse i vertikalled när den överfars med ett hjul (en sammanpressning av jorden medför att markpartiklarna förflyttas nedåt). Denna grundprincip för att mäta jordpackning har använts av bl.a. Danfors (1974) och Kuhner m.fl. (1993). Under 1996 utvecklades vid SLU en

mätmetod för att mäta vertikala markrörelser (Arvidsson och Andersson, 1997), framförallt för att mäta packning i alven. Samtidigt mäts trycket i marken.

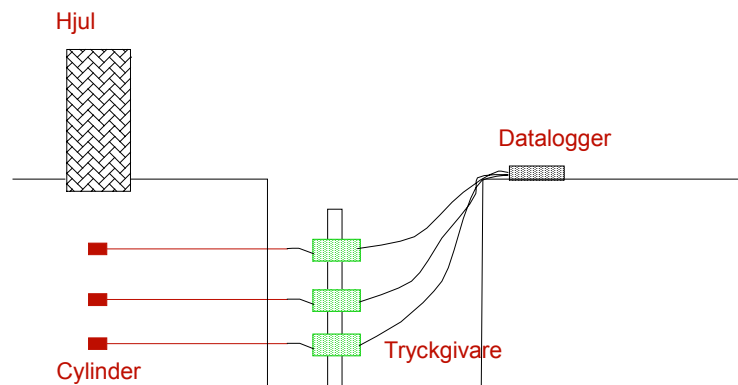
Packning uppstår när jorden utsätts för ett tryck som är större än dess hållfasthet (Guerif, 1994; van den Akker, 1994). Generellt ökar risken för alvpackning med ökande hjul- eller axellast, eftersom trycket då fortplantas till större djup (Söhne, 1958). Hållfastheten kommer framförallt att bero av vattenhalten men också av jordarten. Parametrar som ofta används för att bestämma markens hållfasthet är förkonsolideringstryck och skjuvhållfasthet (Horn och Lebert, 1994). En generell metod för att undvika packning i alven vore att se till att den belastning som marken utsätts för är lägre än markens hållfasthet. En teoretisk modell för att göra detta utvecklades av van den Akker (1994).

Den teknik för att mäta markrörelser som nämnts ovan användes för mätningar av packning under betupptagare under 1997 och 1998. Syftet var framförallt att studera inverkan av vattenhalt, jordart, belastning och antal överfarter med större noggrannhet än vad som är möjligt med traditionella mätmetoder, såsom cylinderprovtagning. Vid varje körtillfälle mättes dessutom markens mekaniska egenskaper, i syfte att relatera den uppmätta packningen till markens hållfasthet.

## Material och metoder

### *Mätprincip för att mäta markrörelser*

En principiell bild av metoden för att mäta markrörelser ges i figur 1. En cylinder innehållande en vätska installeras horisontellt från en grävd grop i marken och är ansluten med en slang till en trycksensor som är fast monterad i gropen. Rörelser i vertikalled registreras som en tryckförändring eftersom höjden av vätskepelaren ändras. Vid testkörning konstaterades att utrustningen klarar att mäta rörelser i storleksordningen 0,2 mm. Lägesgivarna kan installeras på flera djup för samtidig mätning. I de mätningar som gjorts har mätsonder normalt installerats på tre djup: 30, 50 och 70 cm.



Figur 1. Mätprincip för att mäta markrörelser. En plexiglascylinder innehållande en vätska installeras horisontellt från en grävd grop. Vätskan är kopplad till en tryckgivare som är fast monterad i gropen. Höjdförändringar i vertikalled registreras som en förändring av trycket av vätskepelaren.

### *Mätning av marktryck och understödsyta*

Samtidigt med sönerna för att mäta markrörelser installeras också lastceller, som mäter trycket i marken vid körning, på 30, 50 och 70 cm djup. Vid mätningar på St Isie 1998 installerades också lastceller på 12 cm djup, för att mäta trycket i matjorden.

Understödsytan för däcken på den upptagare som användes vid St Isie mättes på hårt underlag, med och utan last. Mätningarna gjordes vid samma tillfälle som maskinen vägdes, varför det är möjligt att ange belastningen på fram- och bakhjul. Däcken placerades på ett stycke tyg, där understödsytan markerades med sprayfärg, och sedan klipptes ut. Därefter klipptes ett stycke papper med samma form som tyget, och understödsytan beräknades från papprets vikt.

### *Mätningar 1996, 1997 och 1998*

Under 1996 gjordes endast testkörning av utrustningen i samband med utläggningen av försöket på Sandby gård. Under 1997 gjordes mätningar på flera platser i Skåne.

Mätning av markrörelser vid olika vattenhalter gjordes på Elvireborgs gård nära Billeberga i Skåne. Mätningarna utfördes vid körning med en sexradig, tvåaxlad betupptagare med en totalvikt på ca 35 ton fullt lastad och ca 22 ton utan last. En viss del av vikten bars av upptagningsbordet, som hade en egenvikt på ca 5 ton. Den genomsnittliga hjullasten var därför ca 8 ton för lastad upptagare och 5 ton för olastad. Framhjulen var Trelleborg TWIN 850/60-38, ringtryck 2,0 bar, bakhjul Continental 800/65 R32, ringtryck 1,7 bar. Mätningar utfördes vid två tillfällen: 15 och 28 oktober, dels i betor, dels i intilliggande stubb. En del av betfältet täcktes med presenning den 10 okt för att förhindra nederbörd, medan en ruta i stubbåkern bevattnades med 120 mm vatten.

Mätningar av packning av sexradiga upptagare mättes under 1997 också på följande platser: Värmö nära Billeberga, Vanninge vid Hemmesdyngge nordöst om Trelleborg, Gårdstånga utanför Lund samt Rinkaby utanför Kristianstad. Vid mätningarna på Gårdstånga användes samma upptagare som vid Elvireborg. Den upptagare som användes vid Vanninge vägdes vid ett tillfälle och hade då en totalvikt av 34,5 ton lastad och 22,7 ton utan last, och kördes med ett ringtryck av 240 kPa fram och 220 kPa bak. Vid Värmö och Rinkaby användes upptagare utrustade med däck 800/65 R32, med ringtryck på 220-240 kPa i framhjulen och 180-200 kPa i bakhjulen.

Under 1998 gjordes mätningar av packning vid St Isie och Jordberga gods nordöst om Trelleborg vid olika vattenhalter under hösten, vid körning med samma upptagare som användes vid Vanninge under 1997.

Kornstorleksfördelning för samtliga platser redovisas i tabell 1.

Vid mätning installerades sonder på 30, 50 och 70 cm djup från en grävd grop för mätning av tryck och markrörelse. Alla mätningar utom den på Rinkaby gjordes i betfält och maskinen kördes med upptagningsbordet nedsänkt som vid upptagning. Normalt kördes upptagaren fullastad vid mätning på ena sidan av gropen, och tom vid mätning på andra sidan.

Vid mätningarna på Gårdstånga 1997 och St Isie 1998 gjordes också mätningar av markrörelse med tregradiga bogserade upptagare av typ Edenhall 722 alt. 723 med

Tabell 1. Kornstorleksfördelning och halt organiskt material på platser med mätning av markrörelser

Djup (cm)	Kornstorlek (g kg <sup>-1</sup> )				Org. mat. (g kg <sup>-1</sup> )
	Ler	Mjåla	Mo	Sand	
Elvireborg					
10	200	210	348	241	21
30	301	167	320	212	11
50	366	219	306	109	3
70	323	243	317	117	7
Värmdö					
10	274	180	367	154	26
30	268	174	368	183	6
50	346	218	310	126	0
70	324	269	276	128	3
Rinkaby					
10	35	21	237	707	32
30	23	0	153	824	14
50	17	18	151	814	3
70	19	2	181	798	3
Vanninge					
10	158	140	348	324	30
30	150	145	355	328	21
50	178	141	358	322	1
70	112	155	358	372	3
Gårdstånga					
10	171	152	349	299	28
30	150	171	355	298	26
50	184	127	264	417	9
70	224	210	365	198	3
St. Isie					
10	240	163	339	220	38
30	261	204	337	178	20
50	162	137	298	402	2
70	171	173	352	298	0
Jordberga					
10	174	164	345	303	14
30	227	135	331	302	5
50	246	168	323	260	2
70	186	177	365	272	0

axeltryck på ca 16 ton, varav 13 ton bärs upp av upptagarens hjul. Dessa upptagare är utrustade med boggie på ena sidan (16.9-34) och ett enkelt hjul på andra sidan (750/60-30.5). Ringtrycket i betupptagarens hjul och i traktorhjulen var 200-250 kPa.

#### *Bestämning av markens hållfasthet vid körning*

Vid alla mättillfällen utom på Vanninge och Gårdstånga togs cylindrar med ostörd jord (72 mm i diameter, 25 mm höga) på 30, 50 och 70 cm djup i marken, två per djup, för

att bestämma markens hållfasthet. Jorden trycktes sedan i en ödometer (Eriksson, 1982) med 25, 50, 75, 100, 150, 200, 400 och 800 kPa, i 30 minuter per trycksteg. Formförändringen utlästes i slutet av varje intervall och förkonsolideringstrycket bestämdes enligt Casagrande (1936).

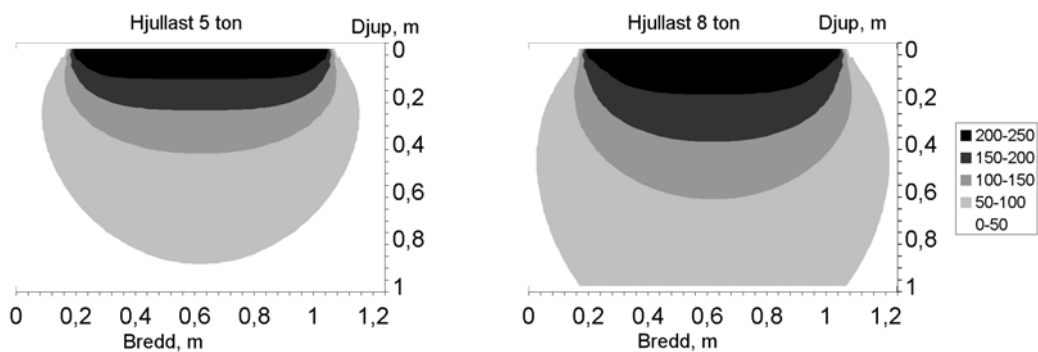
Vid mätningarna 1997 togs också prover för att bestämma kohesion och inre friktionsvinkel. Tolv cylindrar (61 mm i diameter, 34 mm höga) togs på vardera djupen 30, 50 och 70 cm. Jorden skjuvades sedan med en skjuvningsring vid fyra olika normalspänningar: 40, 80, 120 och 160 kPa, enligt Schjønning (1986).

Vid varje körtillfälle togs också prover för att bestämma markens gravimetriska vattenhalt.

### *Modellberäkningar av packning*

Tryckfördelning i marken och det djup till vilket marken packas beräknades med hjälp av SOCOMO (Soil Compaction Model, van den Akker, 1988). Modellen använder de analytiska ekvationer för tryckfördelning som utvecklades av Söhne (1958). Trycket i marken beräknades för hjullasterna 5 och 8 ton, en däcksbredd på 850 mm och ett jämnt fördelat marktryck på 220 kPa i understödsytan. Koncentrationsfaktorn, som anger hur trycket fördelas i sidled, sattes till 5, ett värde som kan användas för våt jord (Koolen och Kuipers, 1983). Det beräknade trycket till 1 m djup visas i figur 2.

Vid beräkning av det djup marken packas till användes två kriterier för när packning inträffar: (1) Det vertikala trycket är högre än förkonsolideringstrycket. (2) Skjuvning av jorden när skjuvkrafterna är högre än jordens skjuvhållfasthet.



Figur 2. Beräknat tryck i marken för två hjullaster.

## **Resultat**

### *Packning vid olika vattenhalter, 1997*

I tabell 2 visas den kvarstående deformationen, markens vattenhalt och hållfasthet (skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck) vid körningar på Elvireborg vid olika vattenhalter. I figur 3 visas markrörelsen vid några av dessa mätningar. Vattenhalten

Tabell 2. Vattenhalt, jordens hållfasthet, markrörelse och beräknat packningsdjup vid körning med två laster (tom resp. lastad sexradig betupptagare) på Elvireborg 1997

Led	Djup (m)	w <sup>a</sup> %	Kohesion (kPa)	$\varphi^b$	P <sub>c</sub> <sup>c</sup> (kPa)	Rörelse (mm)		Beräknat djup <sup>d</sup> (m)	
						22 Mg	35 Mg	22 Mg	35 Mg
Betor, täckt från 10 okt.	0.3	17.6	87	35	123	-3.7	-4.2	0.34	0.41
	0.5	11.0	>154 <sup>(e)</sup>	-	165	-0.2	0.0		
	0.7	11.8	>154 <sup>(e)</sup>	-	202	- <sup>(f)</sup>	- <sup>(f)</sup>		
Betor 15 okt.	0.3	17.0	129	27	79	-1.6	-1.9	0.51	0.66
	0.5	16.2	140	26	89	-0.7	- <sup>(f)</sup>		
	0.7	12.9	147	47	100	- <sup>(f)</sup>	- <sup>(f)</sup>		
Stubb 15 okt	0.3	18.0	129	41	64	-4.5	-4.9	0.47	0.59
	0.5	20.8	125	30	98	-1.1	-2.1		
	0.7	16.6	166	40	122	- <sup>(f)</sup>	- <sup>(f)</sup>		
Betor 28 okt	0.3	17.2	91	37	77	-5.5	-8.5	0.48	0.73
	0.5	17.3	103	31	95	-1.3	-0.9		
	0.7	16.8	154	31	89	-0.3	0.0		
Stubb 28 okt bevattnat	0.3	18.6	74	46	60	-10.9	-13.2	0.66	0.92
	0.5	20.0	96	25	68	-0.9	-3.0		
	0.7	21.4	118	46	69	-0.1	-0.5		

<sup>a</sup> Vattenhalt (viktprocent)

<sup>b</sup> Intern friktionsvinkel

<sup>c</sup> Förkonsolideringstryck

<sup>d</sup> Beräknat djup för packning med SOCOMO

<sup>e</sup> Uppskattat värde, jorden för hård för att installera skjuvningsring

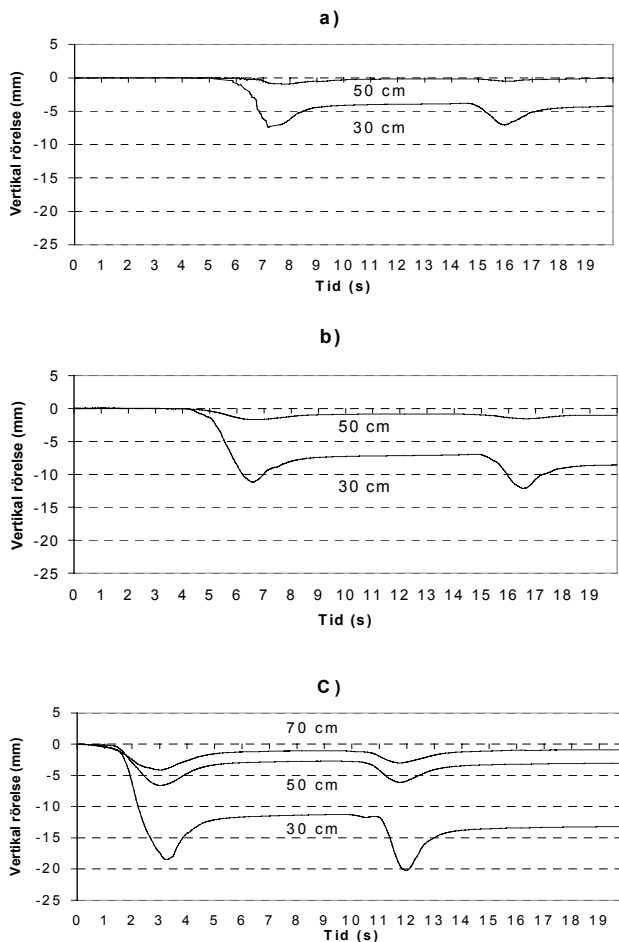
<sup>f</sup> Värde saknas, oftast för att marken varit för hård för att installera mätutrustning

hade en avgörande betydelse för hur mycket marken packades, och var en viktigare faktor än om upptagaren kördes med eller utan last. På 30 cm djup hade vattenhalten hunnit bli ganska hög också i den mark som hållits övertäckt sedan 10 oktober, vilket förklarar att marken i samtliga fall packades på detta djup. Av figur 3 framgår att i den torraste marken erhöles endast en svag elastisk deformation på 50 cm djup, medan körning vid högre vattenhalter orsakade gradvis större deformationer. På 70 cm djup erhöles en liten deformation vid de högsta vattenhalterna. Vid låg vattenhalt var det ej möjligt att installera sondaerna på detta djup, då marken var för hård.

Markens hållfasthet var också väl korrelerad med vattenhalten. I den torraste marken antog både skjuvhållfastheten (kohesionen) och förkonsolideringstrycket höga värden. Dessa sjönk gradvis med stigande vattenhalt.

#### *Packning vid olika vattenhalter, mätningar 1998*

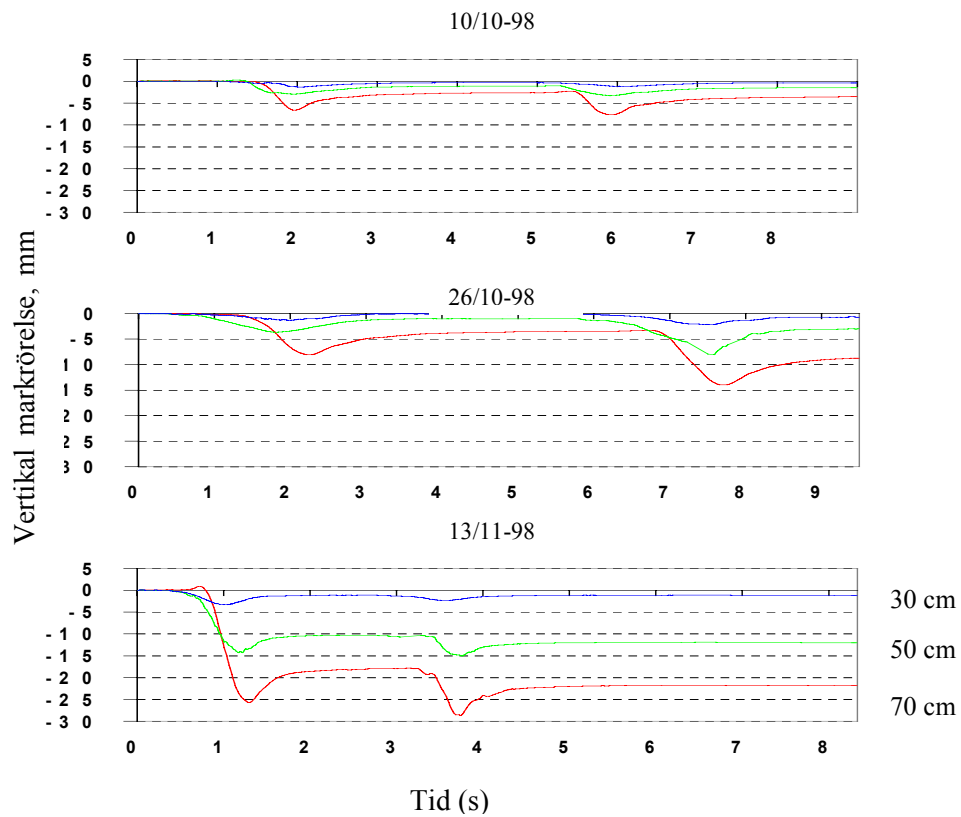
Packning blev mätt vid tre olika tillfällen på St Isie i oktober och november: 10/10,



Figur 3. Markrörelse vid körning med fullastad betupptagare (totalvikt ca 35 ton) på Elvireborgs gård i Skåne. a) Körning i betfält 28 okt, marken täckt sedan 10 okt. b) Upptagning 28 okt, naturlig vattenhalt. c) Körning 28 okt på bevattnad mark.

26/10 och 13-14/11. I tabell 3 redovisas markens vattenhalt, förkonsolideringstryck och deformation på 30, 50 och 70 cm djup, samt beräknat djup för packning vid de olika körtillfällena. I Figur 4 visas exempel på mätningar av den vertikala markrörelsen på 30, 50 och 70 cm djup under överkörning med fullastad upptagare.

Det var en relativt kraftig ökning av vattenhalten från den första till den sista körningen, medan markens hållfasthet mätt som förkonsolideringstryck minskade. Den plastiska deformationen ökade med ökande vattenhalt: t.ex. var den kvarstående deformationen 13/11 22 mm på 30 cm djup och 12 mm på 50 cm djup för den fullastade upptagaren. Vid detta tillfälle var markens vattenhalt så hög att den låg på gränsen för maskinens bärighet. Jämfört med mätningarna 1997 var markens vattenhalt högre och deformation större under 1998. Modellberäkningarna av packningsdjup stämde relativt väl med det djup till vilket packning uppmättes.



Figur 4. Markrörelse vid körning med fullastad sexradig upptagare, St. Isie 1998.

Tabell 2. Markens vattenhalt, förkonsolideringstryck (hållfasthet), deformation och beräknat packningsdjup vid körning med fullastad sexradig upptagare, St. Isie 1998

Datum	Djup (cm)	Vattenhalt (vikt/vikt)	Förkonsolideringstryck (kPa)	Deformation (mm)	Beräknat packningsdjup (cm)
10 okt	30	0,16	120	3,5	62
	50	0,16	73	1,5	
	70	0,15	123	0,2	
26 okt	30	0,17	60	8,2	>80
	50	0,20	76	2,5	
	70	0,17	54	0,5	
13 nov	30	0,24	65	21,7	>80
	50	0,22	48	12,3	
	70	0,19	73	1,3	



### *Mätning av packning på olika jordtyper*

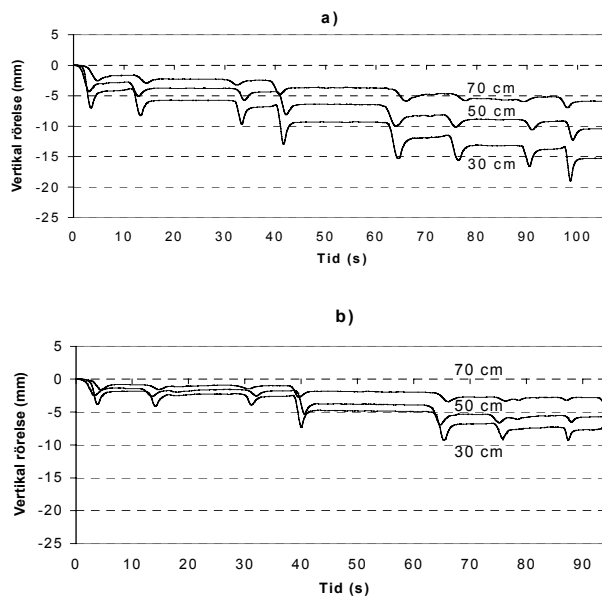
I tabell 4 redovisas resultat från mätningar gjorda vid ett tillfälle under 1997 på Värmö (Billeberga), Gårdstånga (Lund), Vanninge (Hemmesdynge mellan Trelleborg och Ystad), och Rinkaby (nära Kristianstad). Körning med sexradig upptagare har i samtliga fall orsakat packning till 50 eller 70 cm djup.

Tabell 4. Resultat från mätning av vertikal markrörelse vid körning med sexradiga betupptagare hösten 1997 på Värmö (Billeberga), Gårdstånga (Lund), Vanninge (Hemmesdynge), och Rinkaby (Kristianstad)

Plats, datum, jordart	Rörelse (mm)		
	30 cm	50 cm	70 cm
<i>Gårdstånga, 3/11-97, moränlättilera</i>			
Tom 6-radig	-1,5	-0,6	-
Lastad 6-radig	-7,0	-5,1	-
3-radig, lastad	-0,9	-0,2	0,0
<i>Vanninge, 5/11-97, moränlättilera</i>			
Tom	-3,0	-1,4	-0,3
Lastad	-4,4	-1,9	-0,6
<i>Värmö, 1997</i>			
Tom	-1,0	-0,4	0,0
Lastad	4,4	1,1	0,0
<i>Rinkaby, 1997</i>			
Tom	-2,5	-1,4	-1,0
Lastad	-4,8	-3,0	-1,8
<i>Jordberga, 26/9-98</i>			
Tom	-2,4	-0,5	-0,1
Lastad	-6,7	-3,3	-0,7
<i>Jordberga, 10/10-98</i>			
Tom	-2,1	-1,1	-0,2
Lastad	-4,7	-1,9	-0,6

### *Verkan av flera överfarter*

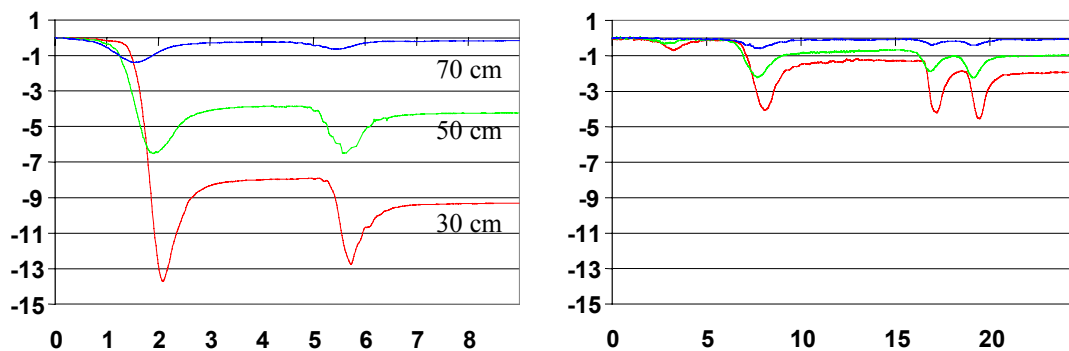
I figur 5 visas markrörelsen när en fullastad respektive en tom sexradig upptagare kördes fram och tillbaka över mätsönderna, med sammanlagt fyra överfarter. Marken fortsatte att röra sig nedåt med varje ny överfart. Liknande resultat erhöles också på andra jordar när marken blev överfaren flera gånger.



Figur 5. Mätning av markrörelse vid överfarter med tunga betupptagare på sandjord nära Kristianstad. Mätningarna utförda 19-20 nov. 1997. a) Två körningar fram- och tillbaka med en fullastad sexradig betupptagare (totalvikt drygt 35 ton). b) Två körningar fram- och tillbaka med en olastad sexradig betupptagare (totalvikt ca 20 ton).

#### *Sexradig jämfört med treradig upptagare*

Mätning av packning under sexradig upptagare, jämfört med traktorhjul och boggiehjulen på en treradig upptagare, redovisas i tabell 4 för mätningar på Gårdstånga, och figur 6 för mätningar på St Isie. I båda fallen uppmättes packning i alven för den treradiga upptagaren, dock betydligt lägre än för den sexradiga. På St Isie mättes vertikala markrörelser under traktorn och boggiehjulen ända ner på 70 cm djup, där rörelsen dock var elastisk.

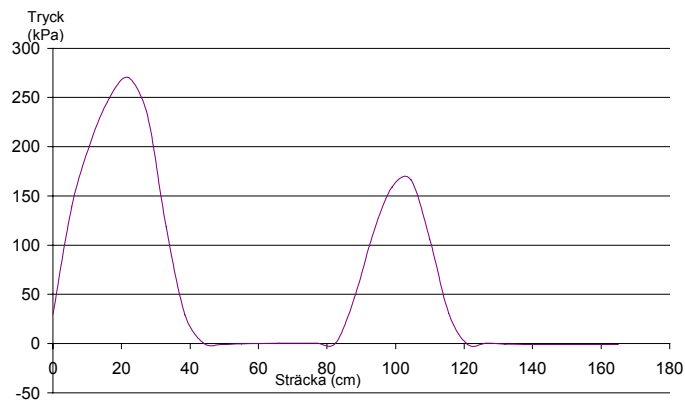


Figur 6. Vertikal markrörelse (mm) vid körning på St. Isie 1998. Vänster: lastad sexradig upptagare. Höger: traktor och boggiehjul på lastad treradig upptagare.

### Tryck i marken och i understödsytan

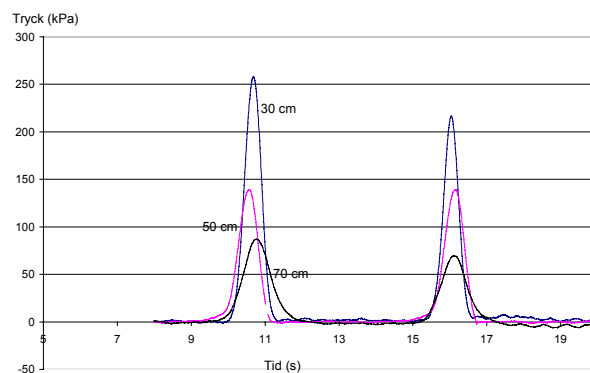
I tabell 5 redovisas genomsnittligt tryck i understödsytan i fram- och bakhjul för den upptagare som användes vid St Isie 1998, utan respektive med last. Marktrycket beräknat från understödsytan är i samtliga fall lägre än ringtrycket, detta är speciellt uttalat vid lägre hjullaster.

Ett exempel på mätningarna av tryck på 12 cm djup visas i figur 7. Det maximala uppmätta trycket från framhjulen var ca 260 kPa, något högre än ringtrycket på 240 kPa.



Figur 7. Tryck på 12 cm djup vid mätning med sexradig upptagare, St. Isie 1998.

Ett exempel från mätningar av tryck på 30, 50 och 70 cm djup på St Isie visas i figur 8. Trycket på 30 cm var ungefär samma som trycket på 12 cm djup (figur 7).



Figur 8. Tryck på 30, 50 och 70 cm djup vid mätning med sexradig upptagare, St. Isie 1998.

Tabell 5. Belastning och understödsyta per hjul, genomsnittligt marktryck samt ringtryck vid mätning med fram- och bakhjul på hårt underlag. Mätning gjord med den sexradiga upptagare som användes vid St Isie 1998

	Belastning (kg)	Understödsyta (m <sup>2</sup> )	Marktryck (kPa)	Ringtryck (kPa)
<i>Framhjul</i>				
Last, bord uppe	10400	0,51	202	240
Utan last, bord nere	3940	0,29	135	240
<i>Bakhjul</i>				
Last, bord uppe	6850	0,43	151	220
Utan last, bord nere	5180	0,30	167	220

### Modellberäkningar av packning

I tabell 2 och 3 visas hur djupt marken beräknas packas utifrån beräknat tryck och markens mekaniska egenskaper. På t.ex. Elvireborg varierar detta djup från 41 cm i den torraste till 92 cm i den fuktigaste för körning med en hjullast av 8 ton. Som regel gäller att det beräknade djupet stämmer relativt väl med till vilket djup packning uppmätts. I figur 9 visas exempel från Elvireborg och Rinkaby på det område under hjulet som beräknas packas. I samtliga beräkningar utom för Rinkaby har packning skett p.g.a. att trycket i marken överskridit förkonsolideringstrycket. För den mycket sandiga Rinkabyjorden beräknades packning inträffa för att jordens skjuvhållfasthet var för låg.

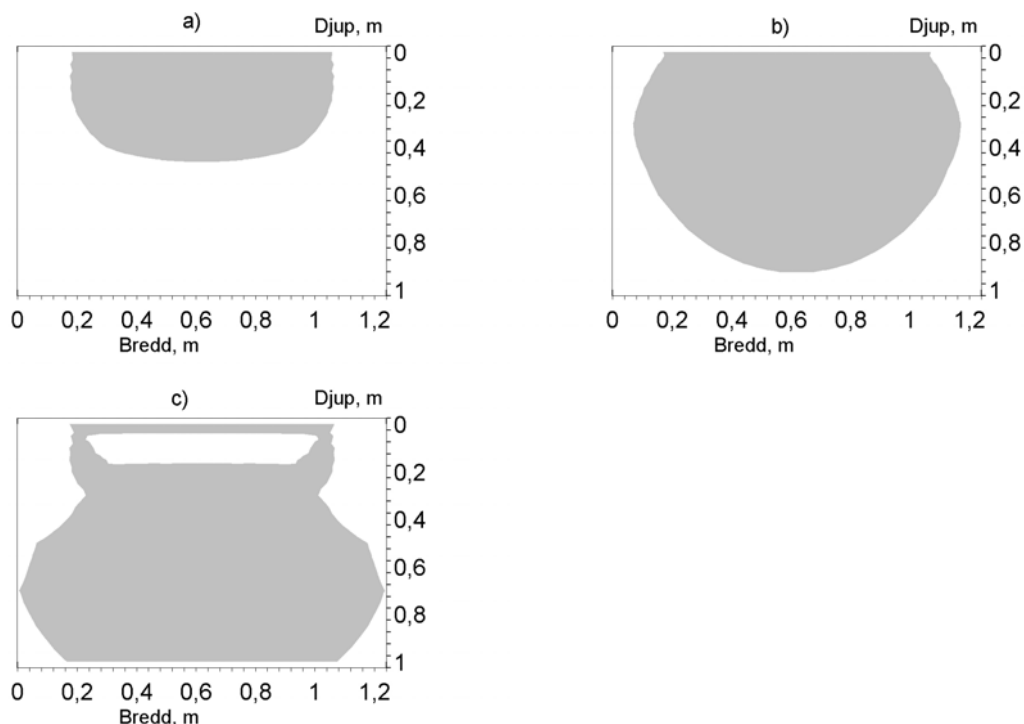


Fig 9. Beräknat packningsdjup för körning med 8 tons hjullast, 220 kPa ringtryck. a) Elvireborg 1997, marken täckt sedan 10 oktober b) Elvireborg 1997, 28 oktober, bevattnad mark, c) Rinkaby 1997.

## Diskussion och slutsatser

Körning med sexradiga upptagare orsakade packning djupare än 30, 50 och ibland 70 cm på olika jordtyper. Eftersom mätningarna i samtliga fall utom Rinkaby skedde vid betupptagning, visar de tydligt att alvpackning inträffar under normala fältförhållanden. Det fanns inga uppenbara skillnader i packning mellan olika jordtyper; vattenhalten föreföll vara den mest avgörande faktorn. Resultaten stämmer väl överens med tidigare rapporter om alvpackning, inklusive mätningarna som redovisas i del III i denna rapport. I en internationell försöksserie med körning med 10 tons axelbelastning uppmättes packning till ca 50 cm djup på olika jordtyper (Håkansson, 1994).

Under 1997, som var ett år med relativt normal nederbörd, uppmättes ingen packning på 50 cm djup under början av upptagningsperioden, på slutet mättes dock packning på både 50 och 70 cm djup. Under 1998, som var ett blött år, uppmättes deformation djupt ned i alven redan från början av upptagningsperioden. Dessa resultat, tillsammans med mätningar i de fastliggande försöken (del III i denna rapport) antyder att packningsrisken på 50 cm är relativt låg tidigt på hösten och hög sent på hösten under år med normal nederbörd.

Vattenhalten var alltså den faktor som hade störst betydelse för hur mycket marken packades, och hade större inverkan än om upptagaren kördes med eller utan last (tabell 2). Detta stämmer också med modellberäkningar av packning (tabell 2). Resultaten visar att för att undvika alvpackning under våta förhållanden krävs en drastisk sänkning av hjullasten och/eller marktrycket jämfört med de högsta som används idag. Detta kan ske antingen genom att totalvikterna minskar, eller att maskinerna utrustas med fler hjul, bättre däck eller framförs med band.

Åtminstone upp till fyra överfarter rörde sig marken nedåt, ungefär lika mycket för varje ny överfart (Fig 5). Det finns naturligtvis en gräns då jorden inte packas ytterligare, men mätningarna visar att det krävs ett relativt stort antal överfarter innan man når denna gräns, och att verkan är kumulativ upp till ett relativt stort antal överfarter. Detta stämmer också väl med de resultat som presenteras i del III, där fyra överfarter orsakade betydligt större packning än en överfart, liksom med tidigare undersökningar (Etana och Håkansson, 1994).

För treradiga upptagare med tank uppmättes packning i alven under traktorhjul och upptagarens boggiehjul, dock betydligt mindre än för de sexradiga upptagarna. Mätningarna visade att åtminstone till 70 cm djup verkar boggiehjulen som enskilda hjul med avseende på packning, med en distinkt markrörelse för vart och ett av hjulen (Fig 6). Inga mätningar gjordes dock under betupptagarens enkla hjul, som vid full last har en hjullast kring 5 ton, ungefär samma som för en sexradig upptagare utan last, och därmed innebär en klar risk för alvpackning.

De modellberäkningar som gjordes för hur djupt marken packas stämmer relativt väl med på vilken nivå packning mättes (Tabell 2 och 3, Figur 9). Också de teoretiskt beräknade trycken i marken stämmer relativt väl med uppmätta tryck. Detta tyder på att det är möjligt att teoretiskt beräkna riskerna för packning utifrån kända teorier om tryckfördelning och markens mekaniska egenskaper. På så vis blir det möjligt att uppskatta risken med utgångspunkt från t.ex. markens hållfasthet vid olika vattenhalter.

Sammanfattningsvis stöder mätningarna av markrörelser resultaten av de markfysikaliska mätningar som presenteras i del III i denna rapport. Körning med

tunga betupptagare under våta förhållanden kan orsaka packning till 50 eller 70 cm djup på de undersökta jordtyperna. Fyra överfarter orsakade betydligt större packning än en överfart. Vattenhalten var en mycket viktig faktor för hur mycket marken packades, och hade t.ex. större betydelse än om hjullasten var ca 8 eller 5 ton. Mätningarna tyder på, att under år med normal nederbörd kommer betupptagning sent på hösten medföra stor risk för alvpackning, med de hjullaster på 5-8 ton och ringtryck kring 200 kPa som används idag.

## Referenser

- Arvidsson, J., Andersson, S., 1997. Determination of soil displacement by measuring the pressure of a column of liquid. In: Proceedings of the 14th ISTRO Conference, Pulawy, Poland, 47-50.
- Casagrande, A., 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Proc. of ICSMFE. Cambridge, MA, 22-26 June 1936, vol. 3. Cambridge, MA, pp. 60-64.
- Danfors, B., 1974. Packning i alven. (Compaction of the Subsoil). Swedish Inst. Agric. Eng., Uppsala, Sweden. Rep. S 24, 91 pp. (In Swedish, with English summary).
- Etana, A., Håkansson, I., 1994. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil Tillage Res.*, 29, 167-172.
- Guerif, J., 1994. Effects of soil compaction on soil strength parameters. In: *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam, 191-214.
- Håkansson, I. (ed.), 1994. Subsoil compaction by high axle load traffic. Special Issue of *Soil Tillage Res.*, 29, 105-306.
- Horn, R., Lebert, M., 1994. Soil compactibility and compressibility. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier, Amsterdam, 45-70.
- Koolen, A.J., Kuipers, H. 1983. *Agricultural Soil Mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 241 pp.
- Kühner, S., Horn, R., Baumgartl, T., Raper, R., Bailey, A., Johnson, C., 1993. Stresses and particle displacement during wheeling. ASAE Meeting Presentation No. 93-1092, 6 pp.
- Schjønning, P., 1986. Shear strength determination in undisturbed soil at controlled water potential. *Soil Tillage Res.*, 8, 171-179.
- Söhne, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and compaction under tractor tires. *Agric. Eng.*, 39, 276-281, 290.
- van den Akker, J.J.H., 1988. Model computations of subsoil stress distribution and compaction due to field traffic. In: Proceedings of 11th International Conference of ISTRO, Edinburgh, U.K., 403-408.
- van den Akker, J.J.H., 1994. Prevention of subsoil compaction by tuning the wheel load to the bearing capacity of the subsoil. In: Proceedings of 13th International Conference of ISTRO, Aalborg, Denmark, 537-542.

## V. Markens packningskänslighet under vegetationsperioden – mätningar och simuleringar på två skånska moränjordar.

### **Innehållsförteckning**

Sammanfattning	1
Inledning	2
Material och metoder	2
Försöksjordarna	2
Textur och struktur	2
Vattenhållande förmåga och genomsläpplighet	3
Vattenhaltsprovtagning och mätning av rotutvecklingen och beståndets slutenhet	4
Väderdata 1997	4
Simuleringar av vattenhalter	4
Beskrivning av SOIL-modellen	5
Parameterisering	6
Kalibrering av SOIL -modellen för 1997	6
Simulering av vattenhalten under perioden 1963 –1988	7
Simuleringar av mekaniska hållfastheten	8
Resultat	8
Växttillgängligt vatten	8
Grödutveckling	8
Markens mekaniska hållfasthet	9
Vattenhalter på olika djup, kalibrering av SOIL modellen	10
Packningsfrekvensen under ett år baserat på period 1963- 1988	13
Diskussion	14
Slutsatser	14
Referenser	15

## V. Markens packningskänslighet under vegetationsperioden – mätningar och simuleringar på två skånska moränjordar.

### Sammanfattning

Vattenhalten i marken är en av de viktigaste faktorerna för markens packningskänslighet. Syftet med detta arbete var att uppskatta risken för packning vid körning under olika tidpunkter på året. Arbetet bygger på att vattenhalter i marken mättes under en växtsäsong (1997), och användes för att kalibrera simuleringsmodellen SOIL. Därefter simulerades vattenhalter från väderdata för en 25-årsperiod, och sedan beräknades risken för packning under växtsäsongen.

Undersökningen gjordes på två jordar: Elvireborg, en moränlättilera som ligger öster om Landskrona, och Kronoslätt, en lerig moränmo som ligger i närheten av Hemmesdynge i södra Skåne. På Elvireborg odlades sockerbetor och vårvete medan det på Kronoslätt odlades korn och sockerbetor. Markens vattenhalt mättes var 14 dag under hela växtsäsongen 1997 i tiocentimetersskikt ner till 1 meters djup. Det togs även ut cylindrar för bestämning av markens fysikaliska egenskaper; genomsläpplighet och vattenhållande förmåga. Vattenhalterna användes till att bestämma det växttillgängliga vattnet och till att kalibrera simuleringsmodellen (SOIL). Väderdata för 1997 är hämtade från Jordberga sockerbruk för Kronoslätt och från Svalöv väderstation för Elvireborg. Vid simuleringarna har det använts dygnsmedelvärden för temperatur, nederbörd och solinstrålning. Beräkningarna har gjorts för vattenhaltsförändringen under 1997 och för perioden 1963 - 1988 med 1997 som kalibrering.

För jordarna beräknades också det maximala tryck som jorden kan utsättas för utan att packas, det s.k. förkonsolideringstrycket. Förkonsolideringstrycket bestämdes för fyra tensioner och ett logaritmiskt samband togs fram mellan tension och förkonsolideringstryck. Från detta samband och vattenhaltsberäkningarna gjordes en riskkalyf över packningskänsligheten hos jordarna på hösten.

Dessutom gjordes beräkningar av trycket i marken för en hjullast på åtta ton och 220 kPa marktryck, tänkt att motsvara körning med en fullastad sexradig betupptagare. Risk för packning ansågs föreligga när trycket på ett visst djup var högre än markens hållfasthet vid den vattenhalten.

Spannmålen tog upp mindre mängd vatten än sockerbetorna, beroende på den kortare växtsäsongen. De uppmätta vattenhalterna var under slutet av sommaren lägre än de simulerade, vilket tyder på en avdunstning av vatten från profilen som gjorde att det försvann mer vatten än det som var växttillgängligt. Denna avdunstning var en av svårigheterna att komma till rätta med i simuleringarna. I stort sett får det dock anses vara en god överensstämmelse mellan uppmätta och simulerade värden.

Enligt simuleringarna stiger risken för packning kraftigt under hösten. Som exempel beräknas risken för packning på 50 cm djup på Elvireborg stiga från kring 35 till 85 % under oktober månad, vilket är den period då största delen av betskörden äger rum. Tidigarelagd skörd har alltså stor effekt för att minska packningen i alven.



## **Inledning**

Jordpackning i alven kan ses som ett långsiktigt hot mot markens produktionsförmåga. Förutom effekter på skörd kan den också tänkas påverka växtnäringssläckage och erosion. Alvluckring kan inte rekommenderas generellt, eftersom effekterna i regel är kortvariga (Canarache m.fl., 2000). Den bästa lösningen vore därför att helt undvika alvpackning.

Vissa åtgärder för att undvika alvpackning har vidtagits i olika länder. I Sverige och i Danmark gäller en generell rekommendation att begränsa axelbelastningen till 6 ton. I förutvarande Sovjetunionen fanns angivet maximalt tillåtet tryck på 50 cm djup, med hänsyn tagen till jordart och fuktighet vid körning (Rusanov, 1994). En generell lösning vore att ange högsta tillåtna kombination av hjullast och ringtryck utifrån markens hållfasthet vid körtillfället (van den Akker, 1994).

Eftersom markens vattenhalt är den kanske viktigaste faktorn för markens packningskänslighet, måste denna vägas in i rekommendationer för att undvika packning. De svenska rekommendationerna är tänkta för en vattenhalt nära fältkapacitet, medan t.ex. de sovjetiska var anpassade efter markfuktigheten.

Syftet med arbetet som presenteras här var att ta fram en ”riskkalkyl” för jordpackning i alven vid körning vid olika tidpunkter på året. Detta gjordes genom att:

1. Mäta vattenhalter ner till en meters djup i vårsäd och sockerbetor på två platser från sådd till skörd 1997.
2. Bestämma markens packningskänslighet vid olika vattenhalter.
3. Beräkna markvattenhalt med hjälp av modellen SOIL och jämföra de uppmätta och de beräknade värdena.
4. Beräkna markens vattenhalt och därmed dess packningskänslighet, för en följd av år utifrån väderdata.

Resultaten finns också presenterade i ett examensarbete (Sjöberg, Olsson och Persson, 1999).

## **Material och metoder**

### *Försöksjordarna*

Arbetet har utförts på två skånska jordar, Elvireborg som ligger öster om Landskrona och Kronoslätt som ligger nära Hemmesdyngge i södra Skåne. På Elvireborg gjordes mätningar i sockerbetor och vårvete, på Kronoslätt i sockerbetor och korn.

### *Textur och struktur*

För texturanalysen togs det ut jordprover på var tionde centimeter som analyserades med pipettmetoden. En profil/fält analyserades.

Kronoslätt är en lerig mo i matjorden som övergår till en lättlera i alven, tabell 1. Jorden är genomgående mullfattig och har en tydlig enkelkornstruktur som gör att

Tabell 1. Kornstorleksfördelning, mullhalt (organiskt material), mättad genomsläpplighet (Ksat) för vatten och vattenhållande förmåga för Kronoslätt

Djup (m)	Kornstorlek (g kg <sup>-1</sup> )			Org. m. (g kg <sup>-1</sup> )	Ksat mm/h	Vatten(% vol/vol) vid tension (kPa)				
	<2 µm	2-60 µm	0,06-2 mm			0	0,5	10	60	1500
0,1	134	272	594	19	1087	43	38	27	24	8
0,2	133	270	597	22	192	37	36	26	23	9
0,3	130	253	617	16	238	40	38	25	22	10
0,4	147	264	589	10	244	31	32	24	21	10
0,5	178	261	561	6	13	35	31	22	19	14
0,6	195	264	542	3	54	34	30	23	20	13
0,7	207	263	530	0	10	34	32	26	24	16
0,8	211	262	527	2	4	33	33	29	27	16
0,9	217	273	510	0	5	33	33	28	26	18
1,0	199	273	528	2	3	34	35	32	30	16

Tabell 2. Kornstorleksfördelning, mullhalt (organiskt material), mättad genomsläpplighet (Ksat) för vatten och vattenhållande förmåga för Elvireborg

Djup (m)	Kornstorlek (g kg <sup>-1</sup> )			Org.m. (g kg <sup>-1</sup> )	Ksat mm/h	Vatten(% vol/vol) vid tension (kPa)				
	<2 µm	2-60 µm	0,06-2 mm			0	0,5	10	60	1500
0,1	235	255	509	19	505	45	40	30	28	13
0,2	235	255	509	19	264	43	39	30	28	16
0,3	228	269	503	17	148	42	38	31	29	21
0,4	246	296	457	15	200	37	34	29	27	17
0,5	313	337	349	12	122	38	35	28	26	11
0,6	315	371	313	11	233	41	37	30	28	16
0,7	325	368	308	10	48	35	29	22	20	13
0,8	319	387	295	11	9	33	30	23	21	13
0,9	314	386	300	10	39	32	28	23	22	15
1,0	295	380	324	10	1	35	33	30	28	14

profilen blir kompakt, och den största rotutvecklingen sker i de många maskgångarna och sprickorna.

Elvireborg är en moränlättera i matjorden medan lerhalten stiger till mellanlera i alven. Fältet är mullfattigt och ligger mellan två jordartsbälten, ett mera sandbetonat i sydväst och ett med moränlättera i nordöst. I tabell 2 anges kornstorleksfördelningen i profilens olika skikt. Jorden har en god aggregerad struktur och för att öka mullhalten i matjorden har lantbrukaren brukat ned halm och höns gödsel.

#### *Vattenhållande förmåga och genomsläpplighet*

För bestämningen av de fysikaliska egenskaperna togs det ut två cylindrar (72 mm i diameter, 50 mm höga) var tionde centimeter i profilen. Dessa användes till att

bestämma porstorleksfördelningen och för att bestämma markens genomsläpplighet och torra skrymdensitet.

Kronoslätt har porositeten 35,4 % (vol/vol) med 13,0 % ej upptagbart vatten. Kronoslätt har en kraftig minskning av genomsläppligheten i skiktet 40-50 cm (tabell 1), vilket är hämmande för vattentransporten och rotutvecklingen.

Elvireborg har en genomsnittlig porositet på 38,4 % (vol/vol) med 14,1 % ej upptagbart vatten till 1 meters djup. Genomsläppligheten är god i de översta skikten men det är en låg genomsläpplighet i plogsulan och nedre delen av alven. Under torra somrar förbättras dock genomsläppligheten genom att det bildas stora sprickor som leder regnvattnet snabbt ned till alven. Genomsläppligheten för Elvireborg redovisas i tabell 2.

#### *Vattenhaltsprovtagning och mätning av rotutvecklingen och beståndets slutenhet*

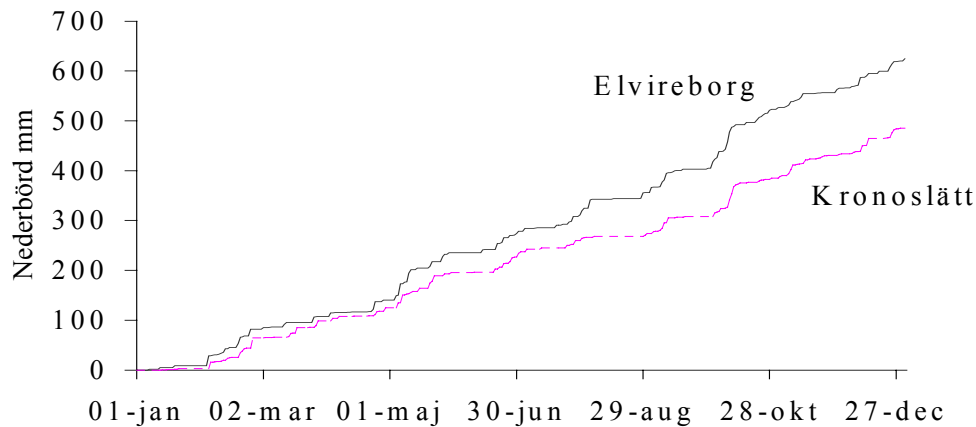
Provtagningen skedde till en början med en s.k. Ultunaborr som fungerar så att en kon formar jorden till en cylinder med en diameter som är något mindre än det uppsamlingsrör som slås ned. Senare under säsongen användes till stor del en jordborr med öppen cylinder. Båda drogs upp med domkraft. Provtagningen gick till på så sätt att först togs ett prov på matjorden (0- 25 cm) och sedan togs ett nytt prov i samma stickhål i alven (25- 100 cm). Därefter fördelades jorden med kniv och tumstock i tiocentimetersskikt. Det togs fem stick per prov och tre prov per provtillfälle, men senare på sommaren togs endast ett prov på grund av den hårdhet marken fick efter upptorkandet. Provtagningen skedde från såtid till dess att grödan skördades med ett intervall på 14 dagar, plus minus någon dag beroende på vädret. De insamlade jordprovernas vattenhalt analyserades genom vägning före och efter torkning vid 105 ° C i tre dygn. I samband med provtagningen av vattenhalter gjordes också mätning av rotutveckling. Denna genomfördes genom att i en grop ta bort ett skikt av jord längs ena väggen, och mäta det maximala rotdjupet. Beståndets slutenhet bestämdes genom okulär bedömning av hur stor del av ytan som var täckt av växtlighet.

#### *Väderdata 1997*

Väderdata är hämtade från Jordberga sockerbruk för Kronoslätt och från Svalöv väderstation för Elvireborg. Vi har använt oss av dygnsmedelvärdet för temperaturen, nederbörd och solinstrålning. Nederbörden 1997 redovisas i fig. 1.

#### *Simuleringar av vattenhalter*

I det följande beskrivs simuleringsmodellen SOIL, hur den fungerar och hur den kalibrerades för de olika platserna. Vi har använt oss av en simuleringsmodell för vattenhalter och sedan gjort omvandlingar för packningskänsligheten vid olika tidpunkter. Kronoslätt har använts som kalibrering och Elvireborg som validering. Det går lättast att jämföra simuleringarna i sockerbetsodling genom att det är samma gröda och då är färre parametrar förändrade mellan simuleringarna.



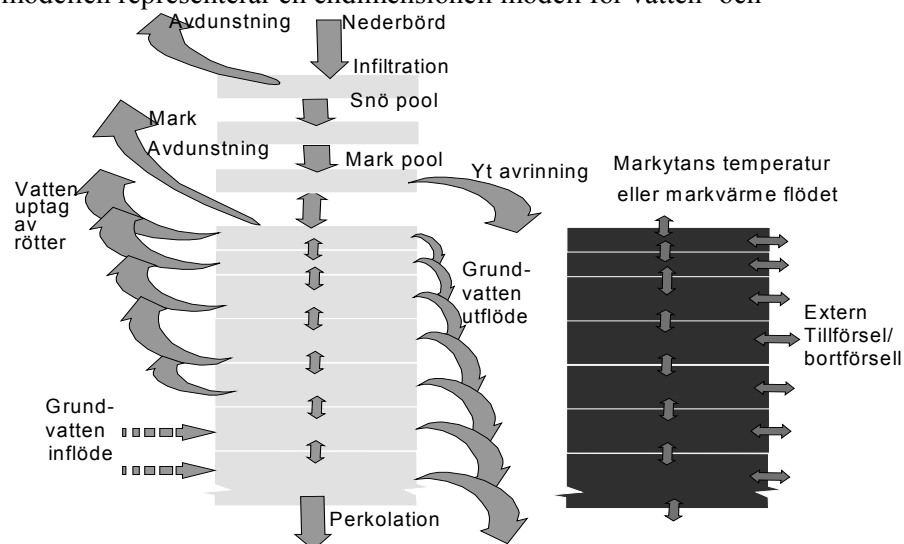
Figur 1. Nederbörden för Elvireborg och Kronoslätt 1997.

### Beskrivning av SOIL-modellen

Vid simuleringarna har modellen SOIL (Jansson 1991) använts för att simulera vattenhaltarna i de olika skikten. SOIL är en matematisk modell som används för att beräkna flöden och lagring av vatten i systemet mark –växt –atmosfär, utgående från fysikaliska principer och mer eller mindre kända kunskaper om de fysikaliska processerna.

SOIL-modellens struktur utgår ifrån att marken är uppdelad i ett antal skikt som behandlas separat för vatten och värme. För att beskriva gränsytorna till marken behandlas också vegetation, snötäcke och eventuell vattenanhopning på markytan. Marken inkluderar både den omättade och den mättade delen av markprofilen.

SOIL-modellen representerar en endimensionell modell för vatten- och



Figur 2. Vattenflöden (till vänster) och värmeflöden (till höger) i SOIL-modellen.

värmedynamiken i en lagrad markprofil täckt med vegetation. Avdelningar för snö, infiltration av vatten och markytans förändringar är inkluderade för processerna i det övre markskiktet. Modellen kan också ta hänsyn till t.ex. grundvattenflöden. Modellen utgår från de partiella differentialekvationer som beskriver vatten- och värmeflöden i en markprofil. Ekvationen löses med finita element-metoden, en numerisk teknik där derivator med avseende på djupet och på tiden approximeras med små differenser vilket gör att profilen är uppdelad i ett bestämt antal lager (fig. 2). Vattenflödet,  $q_w$  och värmeflödet,  $q_h$ , är baserade på två kopplade differentialekvationer deriverade från Darcys lag och Fouriers lag. Snabbt vattenflöde i makroporer kan beskrivas genom att använda en enkel beskrivning av bypass-flöde. Modellen är i detalj beskriven av Jansson (1991). Markhydrologiska parametrar karakteriseras av pF-kurvan ( $\psi = f(\theta)$ ) enligt Brooks och Coreys (1964) beskrivning. Den omättade konduktiviteten beskrivs enligt Mualem (1976), ( $k_w = k_{mat} S_e^{(n+2+2/\lambda)}$ ) där  $k_w$  är den omättade konduktiviteten och  $k_{mat}$  är den mättade konduktiviteten för de texturella porerna.  $S_e$  är den effektiva mättnaden där  $n$  är slingrighetsfaktor och  $\lambda$  är porstorleksfördelningsindex. En enkel log-linjär funktion av den volumetriska vattenhalten används för makroporområdet närmast mättnad.

Beräknad transpiration, markavdunstning och avdunstning från växtlighet beräknas med Penmans potentiella kombinationsekvation i utförande enligt Monteith (1965). Verklig transpiration beräknas från djupdistribuering av rötter, marktemperatur och markvattens tension.

### *Parameterisering*

Den fullständiga parameteriseringen av modellen finns angiven i Sjöberg m. fl. (1999).

### *Kalibrering av SOIL -modellen för 1997.*

För att få en modell som fungerar bra har modellen kalibrerats för ett känt år (1997) med data för vattenhalter och väder. På samma fält har endast grödrelaterade parametrar ändrats, medan det mellan de två olika fälten även har gjorts förändringar i de markrelaterade parametrarna. Väderdata har hämtats från närliggande väderstationer: Svalöf Weibulls väderstation för Elvireborg och Jordberga sockerbruk för Kronoslätt.

De grödrelaterade parametrarna justerades efter vilka parametrar som var relevanta för simuleringen och därigenom vattenhaltsflöden i marken. De mest avgörande är bladyteindex (LAI) och rotutveckling som även studerades i fält. Resterande parametrar har antagits från litteratur eller så har modellens standardvärden använts. Sockerbetorna har justerats utifrån det att de har haft olika tillväxt på de två fälten. Sockerbetornas rotutveckling sker betydligt fortare än bladutvecklingen enligt Larsson m. fl. (1996). Rötterna sägs generellt växa 1,5 cm/dag efter de första 40 dyggen. P.g.a. betornas långsamma tillväxt har även LAI antagits som långsamt ökande tills beståndet slutit sig.

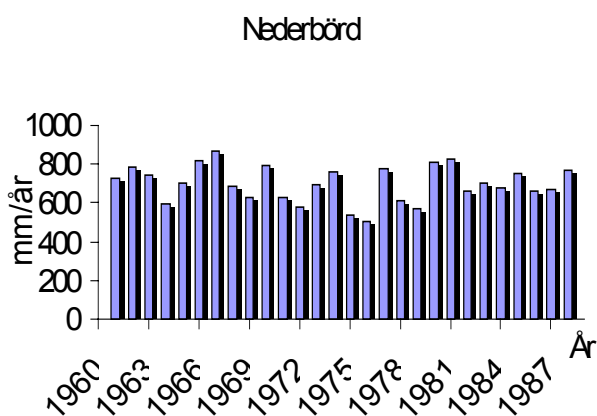
De värden som används för rotdjup är uppmätta medan de värden som används för bladyteindex är skattade utifrån fältens slutenhet under året.

Spannmålsgrödorna har studerats mera än sockerbeter i tidigare simuleringar vilket resulterar i att de fanns väl utprovade i databasen till SOIL. Men även grödparametrarna för spannmål justerades så att de anpassades för de fält där försöken låg.

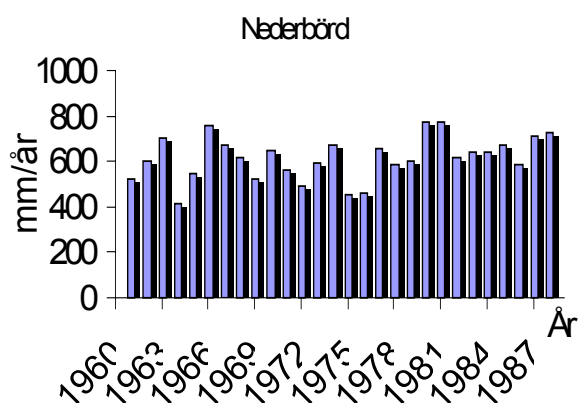
#### *Simulering av vattenhalten under perioden 1963 -1988*

Vid simuleringen under en längre tidsperiod användes de jordar som kalibrerats. Till dessa användes väderleksförhållandena under den period som simuleringen har utförts på. Temperaturen och nederbörden för Elvireborgs väderstation Svalöv visas i fig. 3.

För Kronoslätt har använts väderdata från Jordberga väderstation för nederbörd och för temperaturen fram till 1974, medan det mellan åren 1974 och 1988 har använts väderdata från Smygehuk väderstation (fig. 4). För att underlätta simuleringarna har det antagits att det har varit en och samma gröda under hela tiden.



Figur 3. Nederbördsmängd under åren 1963-1988 för Elvireborg.



Figur 4. Nederbördsmängd under åren 1963-1988 för Kronoslätt.

### Simuleringar av mekaniska hållfastheten

En grafisk och regressions process har använts för att bestämma förkonsolideringstrycket ( $\sigma_p$ ) enligt Casagrande (1936).

Förkonsolideringstrycket bestämdes för 30, 50 och 70 cm djup på båda platserna vid 4 olika tensioner, 60, 300, 600 och 1500 cm v.p. Dessa förhållanden är specifika för varje jord och djup eftersom de beror starkt på hur jorden är bearbetad och hur den är sammansatt.

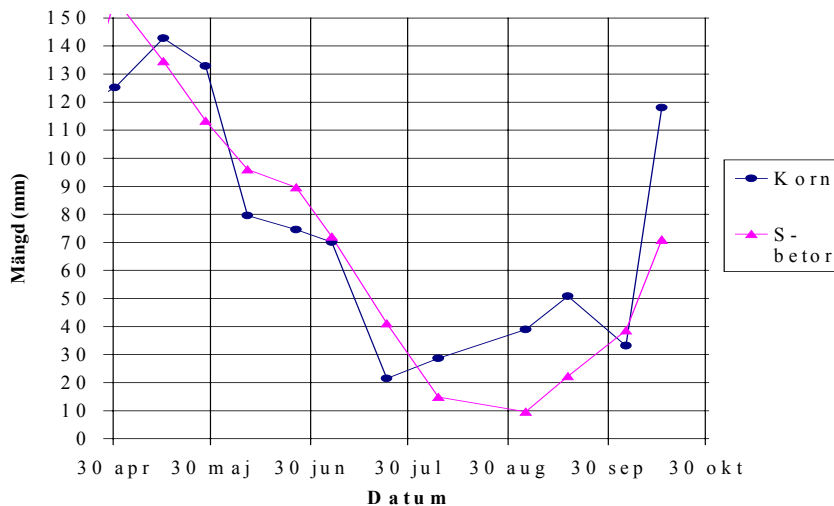
För att beräkna risken för packning beräknades trycket i marken för en hjullast på åtta ton, 220 kPa marktryck och koncentrationsfaktor 5, vilket är tänkt att motsvara körning med en fullastad sexradig betupptagare under fuktiga förhållanden. Det beräknade trycket på 30, 50 och 70 cm djup var 175, 125 och 90 kPa.

Risk för packning ansågs föreligga när trycket på ett visst djup var högre än markens hållfasthet vid den vattenhalten. Detta gjordes för varje dag under den 25-årsperiod som vattenhalter simulerats med hjälp av SOIL.

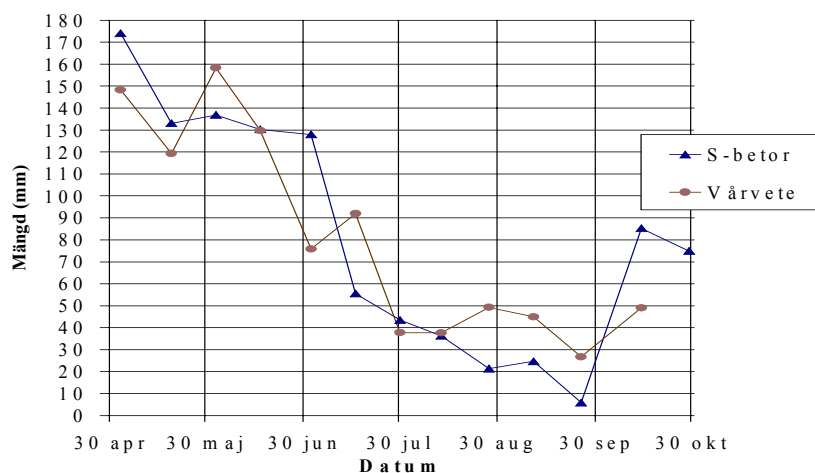
## Resultat

### Växttillgängligt vatten

Det växttillgängliga vattnet tas fort upp av grödorna fram till slutet av juli. Därefter fortsätter sockerbetorna att ta upp vatten till mitten av augusti, och marken har sitt minsta vatteninnehåll från slutet av augusti till mitten av september (fig. 5 för Kronoslätt och fig. 6 för Elvireborg).



Figur 5. Total mängd växttillgängligt vatten under växtodlingssäsongen till en meters djup i markprofilen, Kronoslätt.



Figur 6. Total mängd växttillgängligt vatten under växtsäsongen till en meters djup i markprofilen, Elvireborg.

### Grödutveckling

Datum för sådd, slutet bestånd, 1 meters rot djup och skörd för samtliga grödor anges i tabell 3. Spannmålen utvecklade slutet bestånd och hade rötter till en meters djup betydligt tidigare än sockerbetorna.

Tabell 3. Datum för sådd, slutet bestånd, rotutveckling till 100 cm och skörd

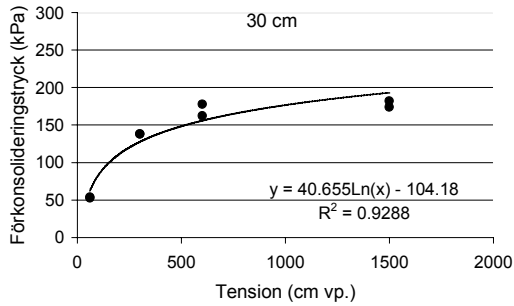
	Sådatum	Slutet bestånd	Rotutveckling 100 cm	Skörd
<i>Kronoslätt:</i>				
S-betor	13-april	10-juli	23-juli	16-okt
Korn	13-april	05-juni	25-juni	22-aug
<i>Elvireborg:</i>				
S-betor	13-april	25-juni	20-juli	28-okt
Vårvete	15-april	29-maj	16-juni	28-aug

### Markens mekaniska hållfasthet

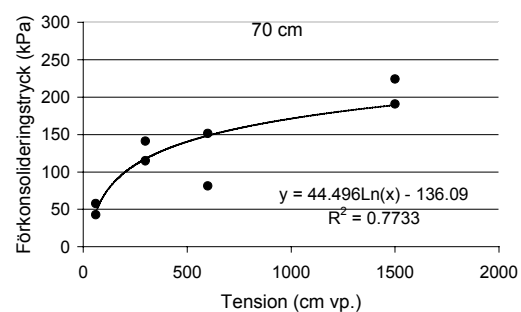
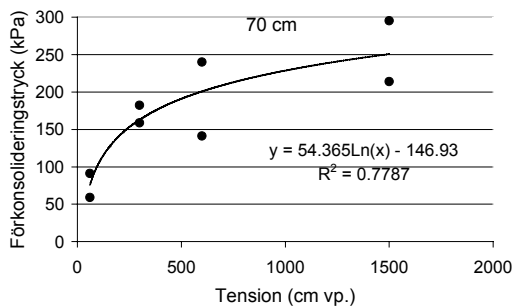
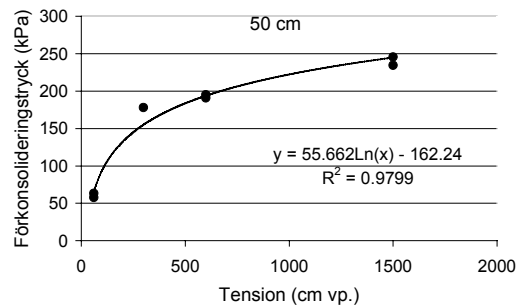
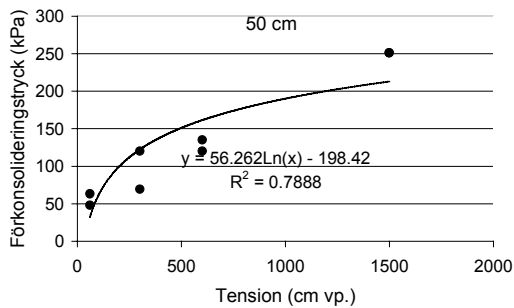
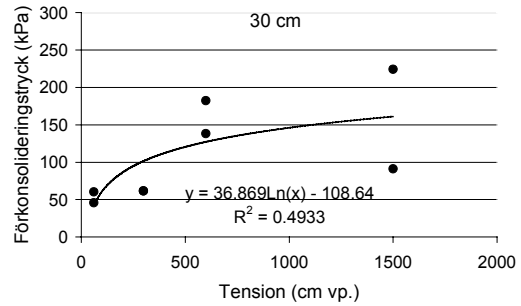
I figur 7 visas förhållandet mellan tension och förkonsolideringstryck för Kronoslätt och Elvireborg. Förkonsolideringstrycket stiger i regel med ökande djup, och var generellt sett högre på Kronoslätt än Elvireborg.



### Kronoslätt



### Elvireborg



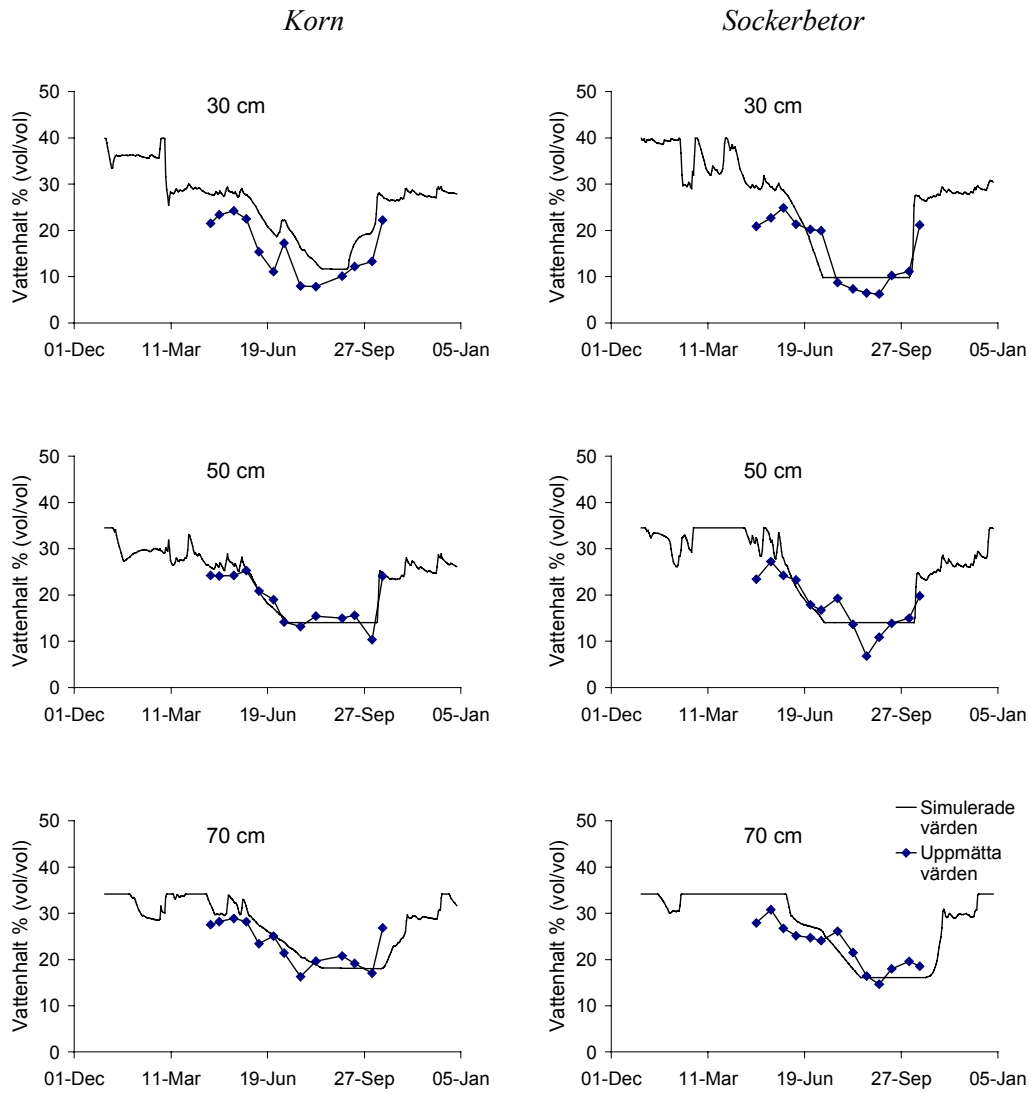
Figur 7. Förhållande mellan tension och förkonsolideringstryck för Kronoslätt och Elvireborg.

### Vattenhalter på olika djup, kalibrering av SOIL modellen

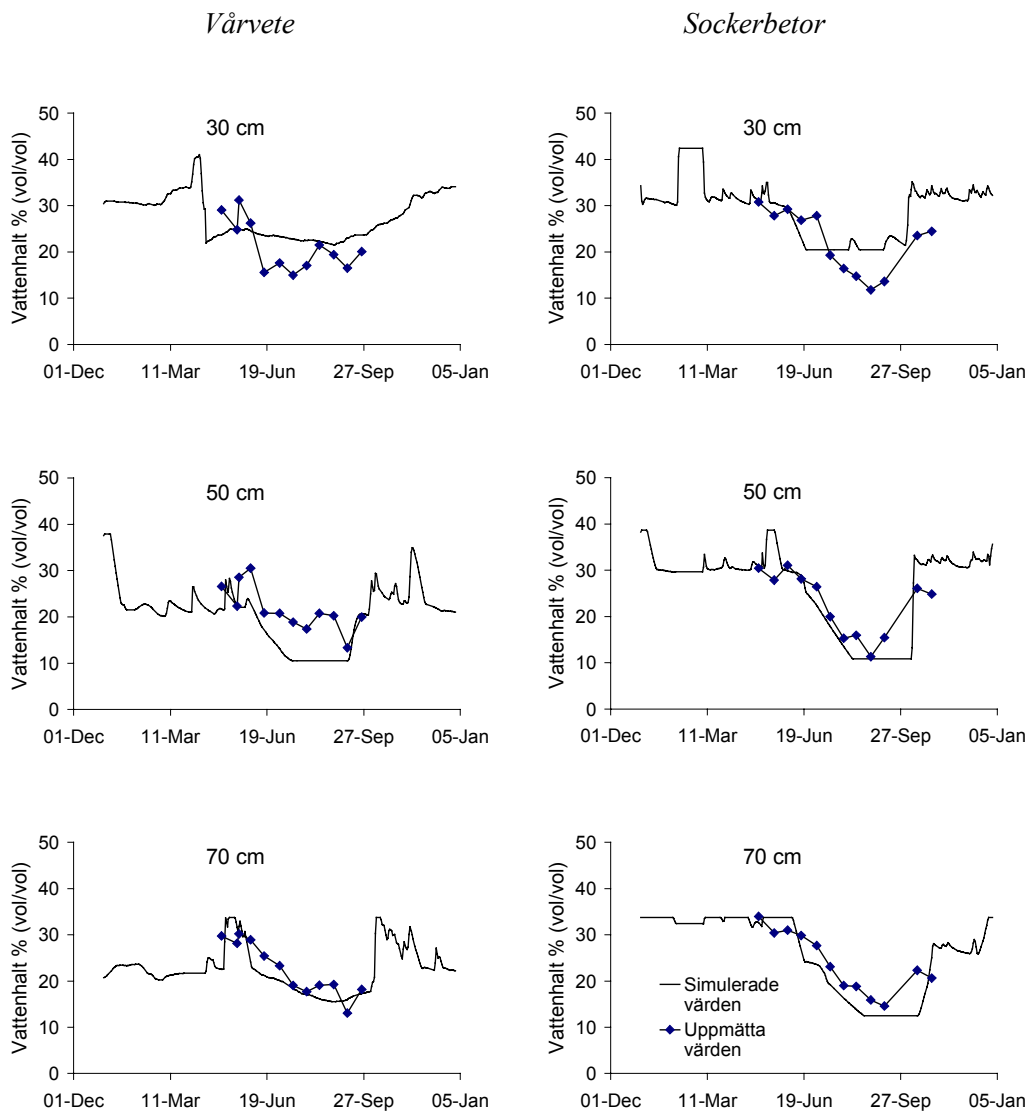
Uppmätta och simulerade vattenhalter i tre skikt vid odling av korn och sockerbetor på Kronoslätt visas i figur 8. Överensstämmelsen är relativt god för båda grödorna., speciellt i sockerbetor.

Uppmätta och simulerade vattenhalter i tre skikt vid odling av vårvetet och sockerbetor på Elvireborg visas i figur 9. Överensstämmelsen är också här relativt god,

dock hamnar de uppmätta värdena på 30 cm djup lägre än de simulerade när marken torkat ut.



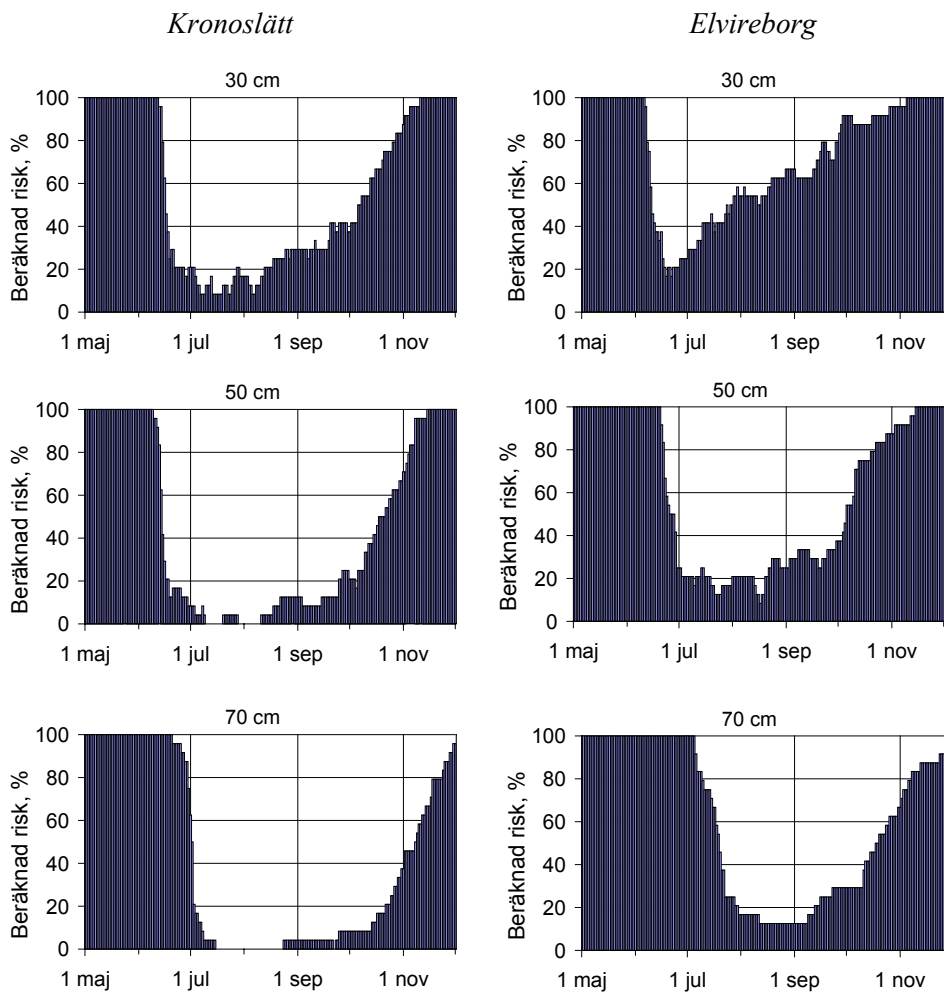
Figur 8. Uppmätta och simulerade vattenhalter för korn och sockerbeter på Kronoslätt.



Figur 9. Uppmätta och simulerade vattenhalter för vårvete och sockerbetor på Elvireborg.

*Packningsfrekvensen under ett år baserat på perioden 1963- 1988*

I fig. 10 redovisas andel av år som körning med tyngre maskiner beräknas orsaka packning i sockerbetsodling och stråsäd (hjulast 8 ton, marktryck 220 kPa). Generellt sett är risken hög på våren och sent på hösten. Risken är oftast större på 30 än på 50 cm djup, även om risken på våren håller i sig längre på det större djupet. Generellt är också risken större på Elvireborg än på Kronoslätt.



Figur 10. Andel av år som körning med tunga maskiner beräknas ge skada på Kronoslätt och Elvireborg vid körning i sockerbetor (hjulast 8 ton, marktryck 220 kPa).

## Diskussion

Praktiskt taget allt växttillgängligt vatten till en meters djup togs efter hand upp av grödan (fig. 5 och fig. 6). Sockerbetor tog upp en större mängd vatten än vårstråsåd på både Elvireborg och Kronoslätt. Sockerbetorna tog även upp vatten en längre tid på året genom den långa växtsäsongen. Växten hade också ett visst upptag av vatten på större djup än en meter, vilket kan kompensera en del av vattenbristen till en meters djup.

Det var relativt god korrelation mellan simulerade och mätta värden på markvattenhalter, speciellt på större djup. Ett av problemen i simuleringarna var att uttorkningen där stannar vid permanenta vissningsgränsen, medan de uppmätta värdena ibland var lägre än denna. Detta var mer uttalat i det översta lagret, antagligen beroende på avdunstning från markytan. Också Sandsborg och Rodskjer (1983) mätte värden klart under vissningsgränsen under vegetationsperioden, speciellt på 0 till 20 cm djup.

Vid bestämning av förkonsolideringstrycket var det ibland stor skillnad mellan två värden vid samma tension. Detta kan till viss del bero på att det är svårt att bestämma förkonsolideringstrycket, speciellt i torr jord, då den räta linjen av kurvan endast innehåller få punkter. Det hade varit önskvärt att använda flera upprepningar och ett högre högsta tryck.

Riskberäkningen följde samma mönster som vattenhaltsförändringarna under 1997: risken var hög på våren, låg under sensommaren och stigande igen på hösten. Djupare ner i alven förblir risken hög ganska länge under försommaren, eftersom vattenupptagningen sker långsamt. Risken på hösten är lägre på större djup, eftersom uppblötningen av marken sker uppifrån, och det kan dröja ganska länge innan hela markprofilen når fältkapacitet. I denna rapport visas endast riskkalkyler för sockerbetor, vilkas långsamma etablering också gör att packningsrisken är hög länge under försommaren. Vårsåd, och i ännu högre utsträckning höstsåd, leder till en snabbare uttorkning på våren.

Vid beräkning av andel av år som kan ge skada av körning med hjullaster över åtta ton syns att på Elvireborg är risk för packning större än på Kronoslätt. Om man ser till 1 oktober, betupptagning och 50 cm djup, är risken 35 % på Elvireborg och 25 % på Kronoslätt. En månad senare har Elvireborg en packningsrisk på 85% och Kronoslätt på 70 %. Samma mönster finns på 70 cm djup men det är över lag lägre risker där. Att packningsrisken är större på Elvireborg beror i första hand på att Kronoslätt har en mera kompakt jord som tål ett högre tryck innan den packas.

## Slutsatser

- Packningsrisken i alven är högst på våren och senhösten
- Under normala år kommer vattenhalten i alven att stiga under hösten. Ju senare under året en körning utförs, desto större kommer alvens packningskänslighet att vara. Under den tid betupptagningen görs (sept-nov) sker normalt en påfyllnad av vattenförrådet i alven, som ändrar packningskänsligheten från låg till hög.

- Vårsäd tar upp mera vatten än betor tidigt på säsongen, medan betorna fortsätter ta upp vatten på hösten. Packningsrisken i alven är därför större i betor än vårstråsäd under försommar och sommar medan förhållandet är det motsatta på hösten.
- Den metod som visas här är möjlig att använda för att förfina rekommendationer för att undvika alvpackning, på olika typer av jordar, för olika grödor och klimat. Det skulle också vara möjligt att göra riskbedömningar under enskilda år.

## Referenser

- Brooks, R.H. och Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media, Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, CO, 27 s.
- Casagrande, A., 1936. The Determination of pre-consolidation load and its practical significance. Proc. Int. Conf. Soil mech. Found, Eng. 22 –26 June. Harvard University. Cambridge. MA. USA. Vol 3, s 60 –66.
- Canarache, A., Horn, R., Colibas, I., 2000. Compressibility of soils in a long term field experiment with deep ripping in Romania. Soil Tillage Res., 56, 175-184.
- Larsson, Hans m.fl., 1996. Sockerbetans etablering och tidiga tillväxt. Rapport 6. Institutionen för växtskyddsvetenskap. Alnarp 98s.
- Jansson, P-E., 1991. SOIL water and heat model. Technical description. Rapporter från avdelningen för hydroteknik, institutionen för markvetenskap, nr 11. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. In: G.E. Fogg (Editor), The State and Movement of Water in Living Organisms, 19<sup>th</sup> Symp. Soc. Exp. Biol. The Company of Biologists, Cambridge, s 205-234.
- Mualem, Y. 1976. A new model of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12:513-522.
- Rusanov, V.A., 1994. USSR standards for agricultural mobile machinery: permissible influences on soils and methods to estimate contact pressure and stress at a depth of 0.5 m. Soil Tillage Res., 29, 249-252.
- Sandsborg, J., Rodskjer, N., 1983. Changes of soil water content under winter wheat, barley and bare soil during the growing season. A field study. Swed. J. Agr. Res., 13, 17-29.
- Sjöberg, E., Olsson, L., Persson, P., 1999. En modell för beräkning av markens packningskänslighet under vegetationsperioden – mätningar och simuleringar på två skånska moränjordar.
- van den Akker, J.J.H., 1994. Prevention of subsoil compaction by tuning the wheel load to the bearing capacity of the subsoil. In: Proceedings of 13th International Conference of ISTRO, Aalborg, Denmark, 537-542.