



---

Sveriges  
lantbruksuniversitet

# Utvärdering av fosforläckage efter stallgödsling med hjälp av lysimetertechnik

Evaluation of phosphorus leaching after  
manure application using lysimeter techniques

---

Pontus Johansson

## Referat

Från försöksfält med lerjord i Västergötland har koncentrationerna löst reaktiv fosfor (DRP) och partikelbunden fosfor, dvs. en stor del av den totala fosfor som mäts som övrig fosfor (OVRP), undersökts i perkolerande vatten. Detta gjordes genom att bevattna små lysimeterar med jordkolonner från matjorden i laboratorium. Tre regnsimuleringar gjordes. Koncentrationen löst reaktiv fosfor i vattnet som perkolerade genom jordkolumnerna låg mellan 0,2-0,3 mg·L<sup>-1</sup>. Mängderna DRP som perkolerade från fyra jordar med olika gödslingshistoria var tydligt relaterade till fosforhalten i jorden mätt i ett ofta använt jordextrakt med ammoniumlaktat (P-AL). Koncentrationerna OVRP var relativt låga och varierade mellan 0,12 och 0,16 mg·L<sup>-1</sup>. Försöket speglar hur en ganska långsam perkolering eller flöde av vatten via mesoporer kan frigöra DRP. I fält uppmäter man däremot ofta höga koncentrationer OVRP som man brukar förklara med snabba flöden genom makroporer i marken och genom dräneringssystemen.

Till lysimetrarna sattes stallgödsel, som motsvarade en normal giva i jordbrukssammanhang, dvs. 30 ton·ha<sup>-1</sup>, varefter tre nya regnsimuleringar utfördes. Stallgödselgivan ökade läckaget av DRP ca 7 ggr. Den största ökningen observerades från jordar som hade de högsta P-AL-talen. Den relativa ökningen efter att stallgödseln applicerats motsvarade en linjär ökning i förhållande till jordarnas P-AL, med ett starkt statistiskt samband. Effekten av stallgödsel i försöket pekade därmed på att jordar med stort fosforinnehåll frigjorde proportionsvis mer fosfor än jordar med lågt P-AL tal. Försöket visade på vikten att anpassa stallgödselgivan till jordens fosfortal. Idag begränsar man bara stallgödselspridningen genom att tillåta ett visst antal djur per gödslingsbar mark, inte till fosfortalet i jorden.

Nyckelord: Lysimeterar, matjord, fosfor i vatten, fosfor i jord, stallgödsel

## Abstract

Based on laboratory studies with lysimeters, the concentrations of dissolved reactive phosphorus (DRP) and particulate phosphorus, which is the main part of other P (OVRP), has been studied in percolating water. The experiment was conducted through irrigation of small soil columns containing clay topsoil from an experimental field in Västergötland. Three rain simulations were consecutively performed. DRP concentrations in the percolating water ranged between 0.2 - 0.3 mg·L<sup>-1</sup>. The amount of DRP percolating from four soils with different fertilization history was clearly related to the phosphorus concentration in the soil, measured in a soil extract of ammonium lactate (P-AL). Concentrations of OVRP were relatively low and ranged between 0.12 and 0.16 mg·L<sup>-1</sup> in the percolating water passing through the topsoil. Any macropore flow was not proven and the experiment may reflect how a relatively slow percolation of water may release DRP. In contrast, from observed fields with drainage systems quite high concentrations of OVRP are typically recorded. This is generally explained by fast flows through macropores in the soil and through the drain tile systems.

Solid manure was applied to the lysimeters equal to a normal agricultural load (30 tons per ha), and thereafter another three rainfall were simulated. The load of manure increased the leaching of DRP approx. 7 times. The largest increase was observed from the soils with the highest P-AL-numbers. The relative boosts of DRP after manure application increased linearly relative to the P-AL number of the soil and with a high correlation coefficient. Thus the results from the manure addition indicated that the soil with highest phosphorus concentrations released proportionally more phosphorus than soils with low P-AL numbers. The studies demonstrate the importance of adjusting the load of manure to the soil phosphorus content. Presently the spreading of manure is only restricted by the number of cattle/cultivated land, not to the P-AL number of the soil.

*Keywords: Lysimeters, phosphorus in water, phosphorus in soil, manure*

## **Förord**

Det här examensarbetet har utförts inom civilingenjörsprogrammet Miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet. Arbetet var en del i min handledares doktorerande och gjordes vid institutionen för Mark och Miljö på SLU. Handledare var Annika Lindvall, senare Barbro Ulén och ämnesgranskare var Lars Bergström. Examinator var Allan Rodhe från Uppsala universitet. Genom arbetets gång har jag fått chans att se dessa tre människor med andra ögon och är enormt tacksam för genomfört arbete och hjälp.

Uppsala november 2009

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Riksdagens miljökvalitetsmål gör gällande att ingen övergödning skall finnas. Ett delmål är att reducera fosforförlusterna och det lyder att ”fram till år 2010 ska de svenska vattenburna utsläppen av fosforföreningar från mänsklig verksamhet till sjöar, vattendrag och kustvatten ha minskat kontinuerligt från 1995 års nivå”.

Kväve är ofta det mest begränsande ämnet för tillväxt av alger och växter i haven medan fosfor är det mest begränsande ämnet i sötvatten och bräckt vatten med låg omsättningstid. I stora delar av Östersjön styr därför fosfor tillväxten av alger och blågröna bakterier av fosfor. Övergödningen av de svenska sjöarna och hav beror till stor del av läckage av kväve och fosfor från våra åkermarker. På senare år har man lyckats förbättra kvävereningen men fosfor har varit svårare att åtgärda. Arbetet med att minska olika punktkällors bidrag till fosforbelastningen och att förbättra reningen i avloppsreningsverken, har ändå varit framgångsrika. I takt med bättre rening av avloppsvatten och att punktkällornas bidrag minskar har den relativa betydelsen ökat av bidraget från lantbruk.

Fosforförlusterna från åkermarkerna beror till stor del av olika typer av erosion i samband med vattentransport på eller i marken, speciellt från de finkorniga jordarna. Erosionen på mark benämns som ytavrinning. Via makroporflöde kan fosfor föras mycket snabbt ner genom jordprofilen. Stora delar av jordbruksmarken är dränerad och via dräneringssystem har en betydande fosfortransport dokumenterats under de senaste 30 åren. Det är dock först under de sista 10 åren som detta läckage har fått större uppmärksamhet eftersom man tidigare ansåg att nästan all fosfor fixerades i jorden. Samtidigt tog man inte i beaktande den vertikala vattentransporten genom marken i form av t ex. makroporflöde.

Uppbyggnaden av fosfor i de svenska jordarna har pågått sen efterkrigstiden. Sedan slutet av 70-talet har gödningen med mineralgödsel minskat kraftigt men fortfarande sker en större tillförsel än bortförsel av fosfor på vissa ställen. Dessa är nästan uteslutande platser med stor djurhållning och stallgödsling. Stora överskott av fosfor uppstår ofta på gårdar med svin eller kycklingproduktion där fodret är fosforrikt. Den kartering av tillståndet i svensk åkermark som genomfördes i mitten på 1990-talet visade att stora delar jordbruksmarken i Sydsverige hade en fosforklass IVa, eller IVb på en skala av I-V, en skala utarbetad efter Jordbruksverket riktlinjer. Användning av stallgödsel har också visat sig ge större läckage än handelsgödsel, framför allt om det finns höga nivåer av organiskt material som gör fosfor mer lätttröglig. Idag eftersträvar man att sänka fosfornivån i marken till fosforklass III för alla jordar som har höga fosfornivåer, medan nivåer kan höjas till max fosforklass III i jordar som nu har lägre fosfornivå.

Studier som jämfört åkrars fosforläckage emellan olika platser visar ofta att det är platsspecifika egenskaper som orsakar läckagen. Det finns inte någon enda faktor som gäller för alla slags jordtyper. Växtlighet, rotvolym, bakterieflora, inneboende förmåga till adsorption – desorption, fosfornivåer i jordarna, gödning, struktur, textur, vattenhållande egenskaper är några av alla de faktorer som påverkar fosforläckaget från en jord.

Fosfor binds starkt till partiklar och det är ofta vid erosionen av partiklarna som de största fosforförlusterna sker. Om det finns ett stort fosforinnehåll i marken kan dock läckaget av löst fosfor vara betydande beroende på att en jämvikt ställts in mellan marklösningen och den fosforrika jorden.

En förutsättning för att kunna minska fosforförlusterna från jordbruksmark är att man på alla nivåer (jordbrukare, myndighetspersoner, politiker etc.) är medvetna om problemet och att man kraftigt ökar ansträngningarna att utnyttja detta växtnäringsämne på ett optimalt sätt. För att komma till bra resultat behöver man identifiera kritiska områden där risken för förluster är stora samt känna till hur fosfortransporten sker. Man vill varken ha utarmning eller stor ackumulering i marken utan en balans mellan in- och utflödet. Även med ett jordbruk i balans kan det ändå ske stora fosforförluster p.g.a. att det ofta inträffar episoder med förhöjda läckage koncentrerat till intensiva avrinningsperioder.

Idag finns bestämmelser, utförda av Jordbruksverket, som reglerar när stallgödsel får spridas. Bestämmelserna gäller när spridningen får ske under året och det finns regler på nedbrukning inom ett visst tidsintervall, samt krav på att speciell teknik ska användas i vissa län. Markkartering och analys av jordarna och av stallgödels sammansättning måste dock också beaktas vid spridningen av gödsel. Mer grundläggande forskning måste också till för att helhetsbilden ska bli komplett om hur fosfor omsätts och hur spridningen ska ske på optimalt sätt. Stor djurhållning höjer halten av löslig fosfor i marken och idag finns också restriktioner för antalet tillåtna djur per jordbruksareal. I den här undersökningen vill man visa att fosfor har en större tendens att frigöras i fosforrika jordar och att detta också påverkar läckaget från stallgödsel. Först studerades läckage i relation till fosfornivåerna i matjorden. I andra delen av försöket testades hur läckaget ändrades efter tillsatts av stallgödsel. Läckagen både före och efter stallgödselgivan visade på ett tydligt statistiskt samband mellan läckagen av löst reaktiv fosfor och jordarnas fosfornivåer.

## Innehållsförteckning

<b>1. INLEDNING</b>	<b>1</b>
<b>2. BAKGRUND</b>	<b>2</b>
<b>2.1 FOSFOR I JORDEN</b>	<b>2</b>
2.1.1 Metoder att kvantifiera lättillgänglig och annan fosfor	2
2.1.2 Olika fosforformer i marken	2
2.1.3 Gödsel	3
2.1.4 Jordar med hög risk för fosforläckage	3
2.1.5 Tidigare försök och behov av nya	4
<b>2.2 MARKFYSIK OCH MAKROPORER</b>	<b>4</b>
2.2.1 Uppkomst av makroporer	4
2.2.2 Preferentiellt flöde	4
2.2.3 Ämnestransport	5
2.2.4 Fosforläckage med makroporflöde	5
<b>3. MATERIAL OCH METODER</b>	<b>6</b>
<b>3.1 FÖRSÖKSJORDEN</b>	<b>6</b>
3.1.1 De långliggande bördighetsförsöken	6
3.1.2 Bördighetsförsöket vid Bjertorp	6
3.1.3 Stallgödsel	7
<b>3.2 METODER</b>	<b>8</b>
3.2.1 Provtagning och preparering	8
3.2.2 Regnsimulering	8
3.2.3 Applicering av stallgödsel	8
3.2.4 P-AL-metoden	9
3.2.5 Statistiska metoder	9
<b>4. RESULTAT</b>	<b>9</b>
4.1 Avrinning och koncentrationer under hela försöket	9
4.2 Koncentrationer efter första regnsimuleringen	10
4.3 Fosforläckage relativt jordens fosfornivå	11
<b>5. DISKUSSION</b>	<b>13</b>
5.1 Metodikdiskussion och förslag till förändringar	16
<b>6. SLUTSATSER</b>	<b>17</b>
<b>7. REFERENS</b>	<b>18</b>

## 1. INLEDNING

Den antropogena, dvs. av människan orsakade eutrofieringen av vatten är ett miljöproblem som har fått stor uppmärksamhet på senare år. Den orsakar inte bara fiskdöd och syrefria sjöbottnar utan också ekonomiska kostnader genom förstörda dricksvattentäkter och naturreservat. Fosfor är ofta den begränsande faktorn för tillväxt av blågrönalger och oönskade fytoplankton. Åtgärder som minskar fosforbelastningen till vattensystemen är därför nyckeln till att förbättra tillståndet av eutrofiering i våra sjöar (Heckrath m.fl., 1995). Med koncentrationer i ytvatten på  $0,01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  löst fosfor eller vid  $0,02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  totalfosfor sker det ofta eutrofiering (Hesketh & Brookes, 2000).

Jordbruket står för den större delen av fosfortransporten till ytvatten och i samtliga EU-länder är jordbruket den största föroreningskälla sedan man förbättrat reningen av avloppsvatten. Ytavrinning och avrinning via dräneringssystemen i jorden anses vara den huvudsakliga vägen för fosfortransport från jordbruk (Djodjic m.fl., 2004). Men från att man tidigare inte trott att fosforläckage existerade i någon större utsträckning har man nu insett att detta ofta är mycket stort. Orsaken är att man länge trodde att fosforgödslingen av åkrarna hade mindre betydelse eftersom fosfor binds till jorden och att läckaget från åkrarna beror på andra faktorer som inte går, eller är svåra att kontrollera (Hesketh & Brookes, 2000). Dessa andra faktorer innefattar bland annat jordtyp och klimat.

Under andra halvan av 90-talet tillsattes fosforgödsel ofta i överflöd jämfört med vad som fördes bort med skörden. I djurtäta områden är fosfortillsatsen fortfarande ibland större än vad som förs bort. Det här har lett till en ackumulation av fosfor i matjorden. T.ex. har 50 % av de svenska jordbruken jordar med innehåll högre än  $8 \text{ mg P}\cdot(100\text{g jord})^{-1}$  (Djodjic m.fl., 2004), mätt med den vanliga metoden i Sverige för växttillgänglighet. Detta motsvarar ett fosforinnehåll som är större än klass III på en femgradig skala och är högre än vad som nu eftersträvas. Den här uppbyggnaden av fosfor i jorden kan också leda till ökad risk för fosforläckage genom markprofilen och via dräneringssystem. Fosfor kan dessutom på sikt transporteras ner i markprofilen till djupare lager (Börling m.fl., 2004). De ökade fosfornivåerna i den odlingsbara jorden har därför gjort det nödvändigt att visa förhållandet mellan fosforläckage och jordens fosfornivåer (Djodjic m.fl., 2004). Jordens fosfornivåer kvantifieras efter markens innehåll av växttillgänglig fosfor. Storheten uttrycks oftast som P-AL tal. Av fosforläckaget är det främst den löst reaktiva fosfor som beror på jordens P-AL tal.

Det övergripande målet med det här arbetet är att se hur fosforläckaget varierar med ökande P-AL tal från en matjord i ett av de långliggande bördighetsförsöken som Sveriges lantbruksuniversitet ansvarar för. Matjorden utsätts också för tillsats av stallgödsel för att se om det föreligger en signifikant skillnad i fosforläckage före och efter tillsats. Försöken utförs med lysimeterteknik, vilket är jordkolonner som dräneras på vatten i laboratorium. Med upprepade regnsimuleringar av lysimetrarna både före och efter stallgödselgiva får man hur fosforläckagen återspeglar jordens fosfornivå med tiden.

Följande hypoteser kommer att testas:

- Går det att relatera läckage av fosfor från matjord till P-AL talet?
- Förändras storleken på läckaget efter att stallgödsel tillförts lysimetrarna?



## 2. BAKGRUND

### 2.1 FOSFOR I JORDEN

#### 2.1.1 Metoder att kvantifiera lättillgänglig och annan fosfor

I Sverige används ofta de så kallade P-AL och P-HCl analyserna (Egnér m.fl., 1960) för att kvantifiera markens innehåll av växttillgänglig fosfor respektive fosforförråd. Resultatet från båda extraktionsmetoderna brukar uttryckas i enheten  $\text{mg P} \cdot (100 \text{ g jord})^{-1}$ . P-AL analysen (extraktion med en sur laktatlösning) används för att bestämma direkt växttillgänglighet, och därmed den mera lösliga fosfor i marken. Metoden är anpassad till de relativt sura skandinaviska jordarna och ger generellt högre värden än de flesta av övriga extraktionsmetoder som används i Europa. I kalkrika jordar överskattas den lättillgängliga fosfor med denna metod. Det beror på att kalciumbunden fosfor löses upp från jordar med mycket kalk.

Medelvärdet för P-AL i Sverige är 10,6 (mg per 100 g jord) vilket motsvarar den näst högsta klassen på en femgradig skala, som används för att kategorisera tillgänglig fosfor i mark (Bergström m.fl., 2007). P-HCl analysen (extraktion med saltsyra) används för att bestämma förrådsfosfor i marken. Ursprungligen analyserades fosfor i extrakten med en metod som bara mäter oorganisk fosfor genom den kolorimetriska molybdatmetoden, men under senare år analyseras den med ICP-teknik vid hög temperatur som innebär att resultatet kan innefatta en del organiskt bunden fosfor.

#### 2.1.2 Olika fosforformer i marken

De flesta jordar i Sverige är mineraljordar och har fosfor oorganiskt bunden. Bara i rena mulljordar och i den allra översta delen av matjorden brukar det finnas några större koncentrationer av organiskt bunden fosfor. Den oorganiska fosfor är bunden i jorden på tre olika sätt, fosfor i partiklar, fosfor bunden till ytan av partiklar och fosfor i marklösning. I jordbruksmark är halterna löst fosfor i marklösningen låga, ofta bara 0,03 mg per liter eller lägre. Genom att växternas rötter utsöndrar exsudat blir dock mer fosfor i marken tillgängliga för upptag. Samspel mellan upptag med rötterna och nedbrytningen av det organiska materialet samt de kemiska förhållandena i marklösningen bestämmer fosfors löslighet.

Av fosforformerna är det den lösta fosfor som utgör ett direkt problem i form av övergödning av de svenska sjöarna och haven eftersom den kan tas upp direkt av alger och blågrönbakterier. Den partikelbundna fosfor som sedimenteras på bottenarna kan dock i ett senare skede också bli tillgängliga för biologiskt upptag (Steineck m.fl., 2000).

Fosfors löslighet påverkas av mineralsammansättning, humushalt och pH i jorden. Vid lägre pH än 5,0 bildas det svårslösliga Fe- och Al-föreningar och vid höga pH binds fosfor i kalciumföreningar. Vid pH = 6,0 är andelen fosfor som är bundet i svårslösliga Fe- Al- och Ca föreningar som minst (Huselius, 2009). De egenskaper hos jorden som man främst relaterar till sorptionskapaciteten är oxider med järn (Fe) och aluminium (Al), organiskt material, textur och karbonater (Börling m.fl., 2001). Fe- och Al-oxider och karbonater binder till sig fosfor som sorberas till ytan.

Mycket av fosfor i jorden är bunden till lera eller oxider. Om fosfor fixeras till jorden eller om den blir tillgänglig för växterna bestäms i hög grad av markkemin och av jordens pH och innehåll av organiskt material. Lättillgängligheten påverkas därmed av olika åtgärder som gödsling, kalkning, jordbearbetning och andra åtgärder på fältet (Steineck m.fl., 2000). Transporten av partikelbunden fosfor sker ofta med markpartiklar ut ur jorden. Förhållandet mellan den lösta och den partikelbundna fosfor varierar både i tid och rum och kan inte generaliseras.

### **2.1.3 Gödsel**

Man delar in gödsel i två huvudgrupper, organisk och oorganisk gödsel. De vanligaste formerna av organisk gödsel är stallgödsel som hämtas från husdjurens träck och grön gödsel som kommer från odlade växter. Den vanligaste formen av oorganisk gödselmedel är mineralgödsel som är framställd på kemisk väg från gruvdrift. Den innefattar vad man av tradition brukar kalla för handelsgödsel och består av lösliga salter, t ex superfosfat som blir lättillgängliga för växten när jordens fuktighet löst upp gödselkornen.

I förhållande till både volym och vikt innehåller stallgödsel mindre näringsämnen än vad handelsgödsel gör men bidrar med organiskt material och mikroorganismer som hjälper till att förbättra jordens struktur. En viss del av den fosfor som finns i fast stallgödsel är i löslig form, en mindre del måste brytas ner av mikroorganismer innan den blir tillgänglig. I flytgödsel, dvs. stallgödsel med en torrsubstanshalt av max 12 % (pumpbar) är nästan all fosfor i lättillgänglig form redan vid spridningen. Även i fast stallgödsel (Ts halt minst 20 %) räknar man med en mycket snabb omsättning så att mycket av fosfor är i löslig form (Steineck m.fl., 2000).

Spridningen av gödsel blir som effektivast när den sker då grödan är på tillväxt. Spridning på hösten, speciellt utan nedbrukning innebär däremot en betydande risk för fosforläckage. Därför omges spridningen av stallgödsel med en mängd restriktioner. Enligt Tarkalson (2009) ser fördelningen och rörligheten olika ut beroende på typ och kemisk sammansättning av gödselmedel. Rörligheten hos gödselmedlet minskade med höga kalciumkoncentrationer men ökade med halten av organiskt kol. Stallgödseln har därmed generellt en större rörlighet än vad handelsgödsel har eftersom kolhalten är stor men detta kan antagligen motverkas av en hög kalciumhalt (Bergström, 2007).

### **2.1.4 Jordar med hög risk för fosforläckage**

Kraftig uppbyggnad av markens fosforförråd leder till att jordens kapacitet till sorption blir lägre eftersom man närmar sig mättnad. Konsekvenser av detta är ökade halter av löst fosfor i vatten som läcker genom jorden. Avgörande för hur mycket fosfor som totalt transporteras från jord till vatten är dock om det sker omfattande kanaliserade flöden.

Med texturen menar man hur jorden är uppbyggd av partiklar med olika storlek. Hög andel finpartikulära lerpartiklar innebär en stor yta för fosfor att adsorbera. I Sverige finns tre typiska högriskjordar för fosforläckage. Det är lerjordar med en typ av snabba kanaliserade flöden, (preferential flows) som innebär mycket snabba fosfortransporter genom jordprofilen utan att fosfor i vattnet är i jämvikt med jorden. I lerjordar sker detta när större strukturbetingade porer är delaktiga i transporten, s.k. makroporflöde. Andra problemjordar är siltjordar som har dålig förmåga att binda jordpartiklarna och därmed har hög risk för erosionsförluster.

En tredje problemjord är sandjordar som är fosforuppgödslade och har dålig sorptionskapacitet i alven (Ulén & Jakobsson, 2005).

### **2.1.5 Tidigare försök och behov av nya**

Fosforläckagen från fem olika svenska jordtyper som uppnått olika P-AL tal, beroende på skilda gödslingsstrategier med mineralfosfor har tidigare studerats med hjälp av djupa lysimetrar (jordkärnor i behållare som medför att läckaget kan studeras). Dessa innefattade både matjorden och alven ner till normalt dräneringsdjup (1 m) (Djordjic m.fl., 2004). Studien visade på signifikanta skillnader i fosforläckage mellan de olika jordarna men inte mellan de olika fosfornivåerna i jorden. Detta tyder på att fosforläckaget är starkt beroende på markens inneboende egenskaper som t.ex. dess struktur. Därför görs nu försök där fosforläckaget utvärderas direkt från matjordsskiktet med grunda lysimetrar. Dessutom behöver fosforläckaget studeras efter tillsats av olika typer av stallgödsel eftersom stallgödselets karaktär påverkar läckaget (Tarkalson, 2009). I det experimentet som gjordes här begränsade vi oss till fast stallgödsel av nöt som är den vanligaste formen på alla mindre gårdar.

## **2.2 MARKFYSIK OCH MAKROPORER**

### **2.2.1 Uppkomst av makroporer**

Uppkomsten av makroporer (större porer i marken), är ofta ett resultat av att dagmaskar grävt gångar, eller att växtlighet bildat håligheter genom att rötterna trängt ner i marken. Jordens fysikaliska egenskaper såsom partikelstorleken påverkar svällningen/krympningen av jordmaterialet vilket påverkar hur stabila makroporerna är.

Markstruktur är det sätt som markpartiklar är lagrade och förbundna med varandra. I lerjordar bildas ofta aggregat. Fördelningen och egenskaperna av aggregaten påverkar markstrukturen och därmed markhydrologin. Jordbearbetning har en stark påverkan på en jords struktur.

Ju mer intensiv jordbearbetningen är desto mer bryts jordaggregaten sönder, vilket ger minskad mängd av kontinuerliga makroporer. En intensiv jordbearbetning kan å andra sidan stimulera partikelläckage och därmed öka uttransporten av partikelbunden fosfor (Petersen m.fl., 2004). Kompaktering genom traktorer och andra fordon ger en grov struktur och markpackning och medför därför ofta mera kanaliserade flöden i marken.

### **2.2.2 Preferentiellt flöde**

Flöden utan vare sig hydraulisk eller kemisk jämvikt kan ske genom den omättade zonen i jorden. Preferentiellt flöde är en process när vatten nära atmosfärstryck passerar genom jordmatrisen. Hastighet är då så hög att ämnen lösta i vattnet inte är i jämvikt med jordmatrisen. Preferentiella flöden kan uppkomma i en jord som har nått upp till vattenmättade eller nära vattenmättade förhållanden. Makroporflöde är en typ av ett preferentiellt flöde. Ett intensivt regn och vatten som ansamlas på ytan, s.k. ponding, förstärker förekomsten av ett makroporflöde. Vattnet rinner förbi det ”gamla” vattnet som finns i markens mindre porer. Det blir en icke-jämvikt och ämnet förflyttar sig mycket snabbare än om det hade följt med våtfronten eller advektionsfronten. Större porer behöver mindre undertryck för vatteninträngning. Flödet in i makroporerna uppkommer först när vattnets tryck i våtfronten överskrider makroporernas givna ”vatteninträngningstryck”.

Makroporflöde beror på jordens initiala fuktighet, varaktigheten och intensiteten av regnet och markens mättade hydrauliska konduktivitet. Vatten som flödar genom jordporer styrs av krafter såsom gravitation, kapillärkraft och friktion. Dessa krafter verkar oavsett storlek på porerna men för makroporer är gravitationen den mest dominerande kraften. Dessutom kan flödes hastigheterna i makroporer under vissa betingelser (nära mättnad eller ponding-infiltration) bli så stora att det uppkommer turbulenta makroporflöden (Beven & Germann, 1982).

Preferentiella flöden i makroporerna kan bara upprätthållas om de vertikala flödes hastigheterna som orsakas av tryckpotentialgradienten är stora jämfört med den laterala infiltrationen in i jordmatrisen. Det samma gäller för transport av växtnäring vid ickejämvt, där lösta ämnen kan diffundera från makroporerna in i aggregaten. Den här diffusionen kan ske både initialt vid makroporflöde och senare när vattenföringen genom jordprofilen blivit mer homogen. Koncentrationsgradienterna i jorden tenderar därför att jämnas ut mot makroporerna. Vid vattenmättade jordar utan laterala tryckpotentialskillnader, har det istället uppstått laterala koncentrationsskillnader. Vatten- och ämne transporten genom jordprofilen under sådana förhållanden sker huvudsakligen via makroporer.

### 2.2.3 Ämne transport

Lösta ämnen följer markvattnet (advektion) men påverkas också av diffusion och dispersion. De fysikaliska transportprocesserna (advektion, dispersion och diffusion) sammanfattas matematiskt i *advektions-dispersionsekvationen*.

Storleken på den advektiva transporten bestäms dels av koncentrationen av det lösta ämnet, dels av vattenflödet. Med en fördröjningsfaktor beskrivs hur mycket långsammare ämnet rör sig i relation till markvattnet. Fördröjningsfaktorn beror på jordens adsorptionsförmåga av ämnet ifråga.

Diffusionen beror på att ämnet är ojämnt fördelat och att det därmed finns en koncentrationsgradient. Genom diffusionen sker en utjämnning mellan områden med högre koncentration och med mindre koncentration. Diffusion spelar en relativt större roll vid ett långsamt vattenflöde. Diffusionen kan också bidra till transport genom täta lerlager. Diffusionshastigheten ökar markant när jorden går mot högre vattenmättnad.

Vattnets rörelser genom marken sker olika fort då vattnet färdas genom olika stora porer, vilket ger uppkomst av dispersion. Dispersion uppkommer p.g.a. variationer i strömningshastigheten i porerna. I centrum av en por är hastigheten mycket högre än längs porväggarna. Det här leder till en omblandning och hur stor den blir beror främst på den genomsnittliga flödes hastigheten, porstorleksfördelningen och vattenhalten. Dispersionen blir större än diffusionen när den advektiva hastigheten blir tillräckligt stor, men den upphör när vattnet står stilla (Jarvis, 2007).

### 2.2.4 Fosforläckage med makroporflöde

Intensiva regn är av stor betydelse för fosforläckage i jordar, speciellt om det uppstår makroporflöden i dem. Om man tillsätter ett ämne vid markytan (t.ex. stallgödsel) och det kommer ett regn kort därefter kan läckagen bli mycket stora (Jarvis., 2007). Orsaken är att innan regnvattnet tar sig in i makroporerna växelverkar regnvattnet med marklösningen som har hög koncentration. Fosforläckage med makroporflöde uppstår däremot inte om vattnet i matjorden hinner diffundera eller avdunsta innan vattnet börjar flöda vertikalt, ett förhållande som råder

efter lätta regn (Isensee m.fl., 1990; Edwards m.fl., 1993; De Jonge m.fl., 2000). Fuktigheten bibehålls bäst om marken fuktas i ojämna oregelbundna cykler med kort varaktighet (Cote m.fl., 1999, 2000).

Makroporernas väggar har ofta en större mikrobiell aktivitet än resten av jordmaterialet (Vinther m.fl., 2001). Med en större bakterieflora blir nedbrytningen av organiska rester större, vilket kan ge en större frigörelse av fosfor i makroporena än i resten av jordmatrisen (Pivetz & Steenhuis, 1995).

Suspenderat material filtreras effektivt vid jämviktade vattenflöden genom marken. Trots detta har signifikant partikelbunden transport av fosfor påvisats i makroporerna (Worall m.fl., 1999; Villholth m.fl., 2000). Sorption av t.ex. fosfor till rörliga kolloider och lerpartiklar som transporteras i vattnet i makroporerna är en viktig faktor som påverkar transporten av fosfor i jordprofilen.

För alla sorters jordar är det sätt som gödsel appliceras viktigt för hur stor förlusten av fosfor via vattnet blir. Det är speciellt tydligt i de strukturerade jordarna som får kraftigt makroporflöde. Ett exempel är att flytgödsel läcker mindre om det plöjs ner jämfört med om den bara sprids på markytan (Geohring m.fl., 2001).

### **3. MATERIAL OCH METODER**

#### **3.1 FÖRSÖKSJORDEN**

##### **3.1.1 De långliggande bördighetsförsöken**

I detta examensarbete utnyttjas jord från ett av SLU:s s.k. ”långliggande bördighetsförsök”. SLU ansvarar för ett tjugotal liknande försök i Sverige. Odling sker med sexåriga växtföljder. I försöken har olika rutor gödslats i syfte att studera produktionen vid olika gödslingsstrategier sedan 1960-talet. Försöken grundar sig på gödsling med fyra nivåer av mineralgödsel och med fyra mängder av fosfor (A, B, C och D). Detta har inneburit att fosforförråden i marken byggts upp i olika grad genom de fyra olika fosforgödslingarna.

##### **3.1.2 Bördighetsförsöket vid Bjertorp**

Jorden som undersöktes kommer från det långliggande bördighetsförsök i Bjertorp i Västergötland. Den är en välstrukturerad lerjord med egenskaper i matjorden enligt Tabell 1, och är därmed typisk för Varaslätten i Västergötland.

Växtföljden är för nuvarande inne på sin åttonde omgång och har för kreaturslöst (ingen nötgödsel) system varit: korn, havre, våroljeväxter, höstvetete, havre, höstvetete.

Tabell 1. Jordart, medelvärden för lerhalt, halten av organiskt kol (OrgC), pH, järn och aluminium extraherade i oxalatlösning (Fe-ox och Al-ox) vid Bjertorp (A-D) samt två sorptionsindex, (PSI<sub>1</sub> och PSI<sub>2</sub>) med två fosfortillsatser (19,4 resp. 50 mmol P·kg<sup>-1</sup> jord) vid nivå A (från Börling, et al., 2001)

Jordart	Lerhalt (%)	Org.C (%)	pH	Fe-ox (mmol·kg <sup>-1</sup> )	Al-ox (mmol·kg <sup>-1</sup> )	PSI <sub>1</sub> (mmol·kg <sup>-1</sup> )	PSI <sub>2</sub> (mmol·kg <sup>-1</sup> )
silty clay loam	30	2,0	6,6	68,0	43,0	3,5	4,2

Växtföljden är av betydelse för uppbyggnaden av fosfornivåerna i försöket och att denna bibehålls. Detta försök har gödslats enligt de fyra strategier (A, B, C och D) sedan 1966. Nivå A har inte fått någon fosfortillsats, nivå B har fått en tillsats som motsvarar bortförseln av fosfor med grödan. Nivå C har fått en tillsats som motsvarar bortförsel + 20 kg P·(ha·år)<sup>-1</sup>. Nivå D har fått en tillsats som motsvarar bortförsel + 30 kg P·(ha·år)<sup>-1</sup> (se tabell 2). Rutor som samtidigt har fått normal kvävegiva (90kg N·ha<sup>-1</sup>) har utnyttjats för den här studien. De olika gödslingsstrategierna vid Bjertorp har inneburit låga till måttliga fosfortal i marken. Försöksrutor med en fosfortillförsel som motsvarade bortförseln hade ett fosfortal på 3.3 och den kraftigaste mineralgödslingen enligt nivå D ett fosfortal på 13.

Tabell 2. Fyra olika gödslingsstrategier (A-D) och de P-AL-tal i marken som det resulterat i. Fosforgödslingen är angiven i kg per ha och år. A motsvarar ingen tillförsel i strategi, B lika stor ersättning dvs. samma tillförsel som den som förs bort med skörden.) C och D motsvarar tillförsel av plus 20 resp. 30 kg mer fosfor än vad som förs bort

Strategi	Fosforgödsling kg·(ha·år) <sup>-1</sup>	P-AL mg·(100 g) <sup>-1</sup>
A	Ingen	2,3
B	Ersättning = bortförsel	3,3
C	Ersättning = bortförsel +20	9,3
D	Ersättning = bortförsel +30	12,9

### 3.1.3 Stallgödsel

Stallgödseln som var relativt färsk hämtades på en stallgödselplatta vid Kungängens gård. Den hade följande växtnäringsinnehåll. Fosfor 1,0 kg per ton, kväve 3,8 kg per ton, kalium 6,1 kg per ton. En normalgiva med 30 ton/ha motsvarade därmed 30 kg P·ha<sup>-1</sup>.

## 3.2 METOD

### 3.2.1 Provtagning och preparering

Jordkolonnerna togs med jordankare och ett hydrauliskt pumpsystem. På detta vis får man upp relativt ostörda jordkolonner. Dessa var 20 cm i diameter och 20 cm djupa och representerar i huvudsak matjorden, dvs. den del av jorden som vänds vid plöjningen. Fyra stycken kolonner togs ut från varje nivå (A-D). Tillsammans provtogs 16 jordkolonner från försöket vid Bjertorp i oktober 2008. Fram till mars 2009 förvarades kolonnerna i kylrum i plast för att minimera omsättning med mikroorganismer och uttorkning. Kolonnerna preparerades genom att botten av kolonnerna skars av varefter jorden försiktigt togs bort längs med de naturliga aggregaten med kniv. Därefter rengjordes botten från eventuella lösa aggregat och korn. Kolonnernas botten förankrades sedan till en basenhet med sluttande utlopp för dränering. På insidan mellan botten och basenheten placerades en finmaskig duk med 0,05 mm maskstorlek för att jordaggregat över denna dimension inte ska kunna rinna ut vid regnsimulering. Tillsammans utgör basenheten och kolonnen en s.k. lysimeter.

### 3.2.2 Regnsimulering

Regnsimulering utfördes i laboratoriet med en anordning med en tryckregulator som reglerar vattenintensiteten till 20 stycken sprinklers placerade på ett avstånd av 1,5 m ovanför lysimetrarna. Innan regnsimuleringen startade justerades tryckregulatorn till -70 kpa, vilket motsvarar en regnintensitet på ungefär  $11 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ . Regnsimuleringen varade därefter i 2,5 h. Under ca ett dygn därefter fick lysimetrarna dränera av, varefter dräneringsvattnet mättes upp. Varannan dag efter första regnsimuleringen utfördes två till på liknande sätt. Vattnet analyserades med avseende på löst reaktiv fosfor (DRP) och totalfosfor (TotP) enligt EU:s standardmetoder vid Vattenlaboratoriet på Institutionen för Mark och Miljö. Skillnaderna mellan totalfosfor och DRP benämns här som övrig fosfor (OVRP).

Suspenderat material (SS) bestämdes efter filtrering (0,2  $\mu\text{m}$  porstorlek) och vägning. Den fina porstorleken i filtren har visat sig nödvändig för att fånga de finpartikulära lerpartiklarna. Vid den första regnsimuleringen analyserade dessutom de allra första 100 millilitrarna som perkolerade igenom jorden ganska snabbt separat från huvuddelen som därefter perkolerade långsamt för att utröna om det fanns tydliga skillnader i vattenkvalitén.

Erfarenhetsmässigt utgörs koncentrationen OVRP från lerjordar till största delen av partikelbunden fosfor (Ulén, 2004). Kvoten OVRP/SS beräknades för att se om denna förändrades under försökets gång.

### 3.2.3 Applicering av stallgödsel

Stallgödsel av nöt motsvarande en giva på  $30 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  (85 g per lysimeter) tillfördes genom att ta bort den översta centimetern jord, tillföra stallgödseln och lägga tillbaka jorden ovanpå. För att sprida ut gödslet i jorden duschades lysimetrarna försiktigt ca 10 min. Gödsel och jord fick sedan jämvikta i tio dagar. Därefter utfördes tre regnsimuleringar på nytt, enligt samma metod som ovan.

### 3.2.4 P-AL-metoden

Fem gram lufttorkad jord vägs och placeras i en 200 ml omskakare tillsammans med 100ml extraktionslösning (0,01 M ammoniumlaktat ( $\text{NH}_4\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{COO}$ ) och 0,4 M ättiksyra ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )). Provet skakas sedan om och extraheras med ett OOH-filter och analyseras med kolorimetriska molybdatmetoden, vilket är en färganalys för fosfor bundet till molybdat. Denna bestämning gjordes från jord som provtogs i anslutning till lysimetrarna före laboratorieexperimentets start.

### 3.2.5 Statistiska metoder

Signifikanta skillnader mellan de fyra nivåernas (A-D) medelvärde beräknades med hjälp av varje nivåns standardavvikelse och med 95-procentigt konfidensintervall enligt studentens t-test. Genom den minsta kvadratmetoden och beräkning av korrelationskoefficienten skattades hur pass välanpassad den teoretiska kurvan var till empiriska data.

## 4 RESULTAT

### 4.1 AVRINNING OCH KONCENTRATIONER UNDER HELA FÖRSÖKET

För att få en allmän överblick över resultaten presenteras först halterna som medelvärde mellan de fyra nivåerna A-D (Tabell 3). Avrinningen skedde relativt jämnt genom alla kolonner och var ungefär lika stor (22-27 mm) efter alla 6 regnsimuleringarna. Halten DRP ökade markant efter stallgödsetillförseln, från omkring 0,3 till omkring 1,7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Halten OVRP var hela tiden låg (0,09-0,18  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) och påverkades inte på något tydligt sätt av stallgödslingen. Koncentrationen SS var däremot högre efter stallgödsetillförseln, vilket medförde att kvoten OVRP/SS ofta var låg efter de tre senare regnsimuleringarna.

*Tabell 3. Genomsnittlig avrinning (mm) genom jordkolonnerna och halter av löst reaktiv fosfor (DRP,) övrig fosfor (OVRP), suspenderat material (SS) och kvoten OVRP/SS (%) för alla 16 lysimetrar vid de olika regnsimuleringarna. Vid den första simuleringen analyserades det först avrunna vattnet (1A) och det vatten som därefter rann av långsamt avrunna (1B) var för sig*

Simulering	Avrinning (mm)	DRP ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	OVRP ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	SS ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	OVRP/SS (%)
<i>Före stallgödsetillsats</i>					
1A	3,3	0,24	0,16	109	0,15
1B	18,8	0,31	0,12	79	0,15
2	25	0,22	0,15	89	0,17
3	26	0,23	0,14	112	0,12
<i>Efter stallgödsetillsats</i>					
4	27	1,71	0,12	191	0,06
5	25	1,70	0,18	137	0,13
6	23	1,67	0,09	119	0,07



## 4.2 KONCENTRATIONER EFTER FÖRSTA REGNSIMULERINGEN

En närmare studie av det första vattnet som perkolerade snabbt under den första regnsimuleringen (1A), indikerade att detta ofta hade något lägre halter av DRP men högre halter av OVRP och av SS än i den efterföljande större vattenmängden som perkolerade långsammare genom kolonnerna (1B) under ett dygns tid. Dessa skillnader märktes för alla fosfornivåer i jorden (A-D) (Tabell 4).

Tabell 4. Medelhalter (4 upprepningar) från de fyra fosfornivåerna (A-D) av halterna löst reaktiv fosfor (DRP), övrig fosfor (OVRP) och suspenderat material (SS) samt kvoten OVRP/SS under den första avrunna mängden vatten (1A) jämfört med det långsamt avrinnande vattnet därefter (1B)

Nivå	P-AL mg·(100 g) <sup>-1</sup>	1A (avrinnig 3,3 mm)				1B (avrinnig 18,8)			
		DRP	OVRP	SS	OVRP/SS	DRP	OVRP	SS	OVRP/SS
		(mg·L <sup>-1</sup> )		(%)	(mg·L <sup>-1</sup> )		(%)		
A	2,26	0,007	0,163	99	0,16	0,012	0,062	77	0,08
B	3,26	0,064	0,160	100	0,16	0,068	0,088	66	0,13
C	9,33	0,264	0,089	101	0,09	0,335	0,081	70	0,12
D	12,90	0,618	0,222	130	0,17	0,816	0,253	104	0,24

Tabell 5. Medelvärden (4 parallella upprepningar) och standardavvikelse (SD) av mängden löst reaktiv fosfor (DRP) (kg/ha) som perkolerade från de fyra fosfornivåerna med olika P-AL-tal efter tre regnsimuleringar (simulering 1-3) samt motsvarande resultat efter tillförsel av fast stallgödsel av nöt (30 ton·ha<sup>-1</sup>) som fått jämvikta sig med jorden under 10 dagar (simulering 4-6)

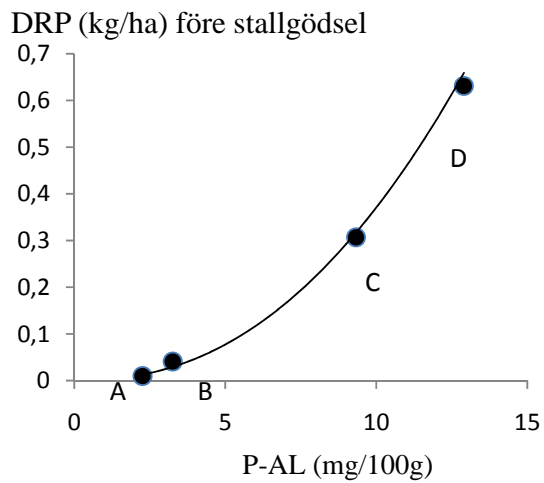
P-AL mg·(100 g) <sup>-1</sup>	Simulering 1		Simulering 2		Simulering 3		Summa 1-3	
	DRP (kg·ha <sup>-1</sup> )	SD	DRP (kg·ha <sup>-1</sup> )	SD	DRP (kg·ha <sup>-1</sup> )	SD	DRP (kg·ha <sup>-1</sup> )	SD
<i>Före stallgödsetillsats</i>								
2,26	0,002	0,000	0,004	0,002	0,004	0,002	0,01	0,004
3,26	0,012	0,008	0,015	0,009	0,014	0,008	0,041	0,025
9,33	0,076	0,037	0,108*	0,045	0,123*	0,054	0,307*	0,136
12,9	0,185	0,113	0,240**	0,120	0,206	0,161	0,631	0,394
<i>Efter stallgödsetillsats</i>								
	Simulering 4		Simulering 5		Simulering 6		Summa 4-6	
2,26	0,209	0,086	0,159	0,0918	0,206	0,102	0,573	0,280
3,26	0,170	0,069	0,177	0,0423	0,193	0,062	0,540	0,173
9,33	0,647	0,325	0,564*	0,2121	0,386	0,310	1,598	0,847
12,9	0,823**	0,300	0,799**	0,2835	0,749**	0,278	2,370**	0,862

\*Marginellt signifikant (p<0,05) högre läckage jämfört med närmaste lägre fosfornivå

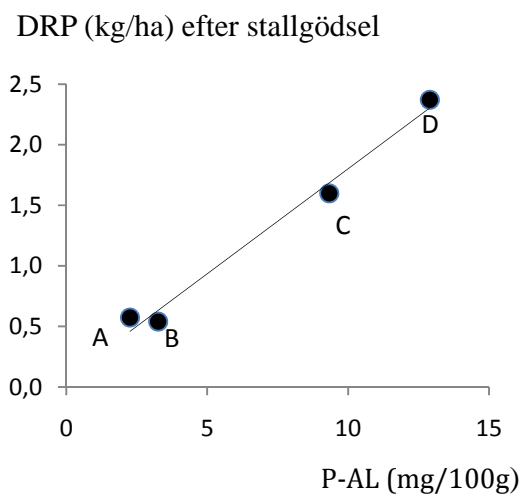
\*\* Signifikant (p<0,05) högre läckage jämfört med näst närmast lägre fosfornivå

### 4.3 FOSFORLÄCKAGE RELATIVT JORDENS FOSFORNIVÅ (P-AL)

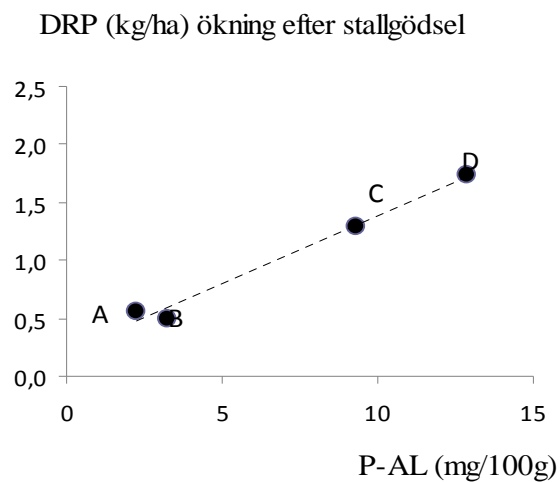
Regnsimuleringarna motsvarade tillsammans omkring 2x 85 mm (före och efter tillförsel av stallgödsel). Mängden DRP som perkolerade före stallgödsetillsatsen motsvarade mellan 0,01-0,63 kg·ha<sup>-1</sup> (Tabell 5), med en mer eller mindre starkt signifikant skillnad mellan de olika fosfornivåerna i jorden. Detta samband mellan läckage och fosfortalet i marken motsvarade en svagt böjd linje med en korrelationskoefficient ( $R^2$  adj.) på 99,8% (Figur 1a). Tillförsel av stallgödsel (regnsimulering 4-6) orsakade ett mångfalt, men inte signifikant, större läckage från alla lysimetrar (Tabell 5). För de båda lägsta fosfornivåerna A och B var ökningen 0,5-0,6 kg·ha<sup>-1</sup>, för högre fosfortal i marken var ökningen mellan 1 och 2 kg·ha<sup>-1</sup>. För de båda uppgödslade jordarna vid nivå C och D läckte därmed proportionsvis ännu mera DRP igenom trots att samma mängd stallgödsel tillförts alla kolonner (Figur 1b). Läckage av OVRP och SS tenderade att öka något med ökat fosfortal, vilket var tydligast före stallgödsetillförseln (Tabell 6). Samma gällde Kvoten OVRP/SS tenderade också i någon mån att öka något med ökat fosfortal, vilket var tydligast före stallgödsetillförsel. Den partikelbundna fosfor berodde därför också på jordens fosfortal men inte till samma grad och inte med samma statistiska säkerhet. Sammantaget beror både DRP och OVRP av jordens fosfornivåer.



1a)



1b)



1c)

Figur 1a) Läckage av löst reaktiv fosfor (DRP,) 1b) Läckage av DRP efter tillsats av fast stallgödsel från nöt relativt fosfortalet (P-AL) i matjorden samt 1c) ökningen av läckaget efter tillsatsen. Den krökta resp. de två raka linjerna motsvarar en korrelationskoefficient av 99,8 och 98,1 samt 98,6 %. Utmärkt i figurerna är de fyra gödslingsnivåerna (A-D). Observera att skalorna på y-axeln är olika mellan 1a och 1b & 1c.

Tabell 6. Medelvärden (4 upprepningar) av perkolerande mängd övrig fosfor (OVRP) och suspenderat material (SS) ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) från de fyra fosfornivåerna (P-AL) som ett resultat av de fyra gödslingsstrategierna A, B, C och D efter tre regnsimuleringar samt motsvarande resultat efter tillsats av fast stallgödsel av nöt ( $30 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) som fått jämvikta sig med jorden under 10 dagar. Sista kolumnen visar förhållandet mellan OVRP och SS före och efter stallgödsetillsatsen

P-AL $\text{mg}\cdot(100 \text{ g})^{-1}$	Simulering 1		Simulering 2		Simulering 3		Summa 1-3		
	OVRP $(\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1})$	SS	OVRP $(\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1})$	SS	OVRP $(\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1})$	SS	OVRP $(\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1})$	SS	OVRP/SS (%)
<i>Före stallgödsetillsats</i>									
2,26	0,021	22	0,024	21	0,030	26	0,074	69	0,11
3,26	0,021	15	0,018	13	0,029	19	0,069	46	0,14
9,33	0,019	19	0,030	26	0,042	27	0,091	71	0,13
12,9	0,065	26	0,110	44	0,059	62	0,234	132	0,18
<i>Efter stallgödsetillsats</i>									
	Simulering 4	Simulering 5	Simulering 6	Summa 4-6					
2,26	0,179	34	0,085	32	0,065	32	0,329	98	0,33
3,26	0,082	35	0,082	23	0,061	22	0,225	80	0,28
9,33	0,232	48	0,267	39	0,088	29	0,587	116	0,51
12,9	0,156	60	0,172	43	0,119	47	0,447	150	0,30

## 5. DISKUSSION

Försöket med matjord från Bjertorp visade att koncentrationen DRP i perkolerande vatten hade stark koppling till matjordens P-AL tal (se figur 1a). Sambandet var tydligt redan efter en regnsimulering, men blev ännu tydligare och statistiskt säkrare efter tre regnsimuleringar när mer vatten perkolerat igenom lysimetrarna. Den skillnad i P-AL tal som uppmättes i matjorden mellan olika gödslingsnivåer finns inte i alven (Börling m.fl., 2004). På större djup påverkar inte gödningen P-AL talet utan dessa har visat sig lika låga från alla gödslingsstrategierna.

Hastigheten på vattenflödet samt hur och vilka porer som är delaktiga i transporten av vatten är generellt viktigt för en jords fosforläckage. Vid långsam vattentransport blir kontakttiden förlängd mellan jordpartiklar och det perkolerande vattnet, vilket kan få läckaget att minska eftersom fosfor från markytan hinner adsorbera till alven. Vid snabb och kanaliserad transport som vid markoporflöde passerar vattnet ner genom jordprofilen utan att fosfor är i jämvikt med jorden. Läckagen kan då bli mycket stora men samtidigt mycket små om vattnet passerar utan inblandning med fosfor i marken.

Avsikten med att analysera den allra första portionen vatten separat var att se om detta, som ett resultat av snabbare flöde, hade annan vattenkvalité än det vatten som perkolerade genom långsammare. Det fanns inte möjlighet att genom t ex färgningsteknik kunna påvisa kontinuerliga makroporer i matjordskolonner. Sådant försök skulle ha kunnat påvisa förutsättningarna för ett snabbt makroporflöde. Om det skedde ett snabbt flöde i spricksystemen skulle man också kunna

förvänta sig höga halter av suspenderat material och partikelbunden fosfor i det dränerade vattnet. Nu uppmättes visserligen en högre halt av OVRP i det vatten som samlades upp allra först (1A, Tabell 4) men proportionerna mellan DRP och OVRP var ändå låga i förhållande till vad som brukar mätas i dräneringsystemen från lerjordar (Ulén, 2004). Lysimeterförsöken antas därför åskådliggöra det läckage av DRP som sker genom en mera långsam perkolering genom jorden.

I ett dränerat fält kan det däremot ske en snabb transport av partiklar antingen från markytan, genom inre erosion eller av partiklar som ansamlats i dräneringsledningarna (Djordjic m.fl., 2004). I små lysimetrar är troligen rumskalan så liten att laterala spricksystem och bidrag av fosfor från dessa går förlorad.

Vattnet och ämnestransporten skedde troligtvis ändå annorlunda i början när jorden var relativt torr jämfört med hur de skedde senare i försöket. Inledningsvis kan huvuddelen av vattnet ha tagit sig genom sprickorna, men det skedde förmodligen också ett lugnare flöde genom jordmatrisen via s.k. mesopor, dvs porer av mellanstorlek mellan mikro- och makroporer. Den mesta lösta fosfor (DRP) som fanns i markvattnet från början fanns troligen också i mesoporerna, inuti aggregaten (Jarvis, 2009, muntlig källa). Vattenflödet genom mesoporerna innebär en långsammare perkolation och det är troligen den här transporten som huvudsakligen bidrar till ämnestransporten genom marken (Jarvis, 2009, muntlig källa).

Orsaken till låga koncentrationer av DRP i det första vattnet är troligtvis att makroporerna samt jordmatrisen intill makroporerna är tömda på DRP eftersom det skett en viss upptorkning av jordkolonnerna trots att de förvarades i kylrum före försökets start. Genom diffusion kunde sedan DRP mobiliseras från det inre av jordmatrisen vilket ledde till fördröjning av DRP-läckaget. Effekten skulle antagligen ha blivit än större om jorden undergått en regelrätt upptorkning eftersom vattenbryggan från makroporerna till de minsta vattenfyllda porerna då blir längre. Det spricksystem som kan ha uppkommit efter den lätta upptorkningen skulle därmed kunna förklara den större andelen av OVRP i det första vattnet. Så länge sprickorna är öppna kan suspenderat material ta vägen ut genom de större kanalerna.

De högsta halterna av DRP uppmättes efter första regnsimuleringen i den portion av vattnet som samlades upp efter en längre tid (1B). Vattnet kan nu ha tagit en väg genom de mindre vattenfyllda porerna med högre fosforkoncentration. Ämnestransporten gick förmodligen genom s.k. mesopor som inte var urtvättade på DRP (Jarvis, 2009, muntlig källa). Vattenflödet genom mesoporerna går långsammare än genom makroporerna. Vid långsam perkolation och med ökande vattenmättnad ökar diffusionshastigheten genom täta lerlager generellt för alla ämnen (Kleja m. fl. 2006). Med hög diffusionshastighet ställdes det antagligen in en jämvikt mellan fosfor i marklösningen och fosfor i jorden som förklarar en konstant hög fosforkoncentration i det uppsamlade vattnet. Allt eftersom vattenhalten i jorden ökade och alla porer vattenfylldes speglade därför läckaget jordens fosfornivå allt tydligare. Spricksystemet hade däremot förmodligen börjat svälla igen, vilket medförde att halterna SS och OVRP sjönk under försökets gång. Senare under regnsimuleringarna 2 och 3 tog däremot vattnet antagligen samma flödesbanor genom jordmatrisen samtidigt som porer på längre avstånd från det huvudsakliga vattenflödet börjar tömmas på DRP. Mindre läckage av DRP antyder detta. Eventuella makroporer kan då ha varit helt tömda på fosfor. I och med att stallgödsel tillförts har porerna, framför allt de större, på nytt blivit fyllda med fosfor som läckte ut under regnsimulering 4-6.

Liknande samband mellan fosfornivån i matjorden och halter DRP i uppsamlat vatten (figur 1a) har uppmätts i stora dräneringssystem i Storbritannien (Heckrath m.fl., 1995). En av förklaringarna som dessa författare diskuterade var att det skett en ansamling av fosfor på väggarna i porerna, vilket gjorde att dessa var fosformättade och inte adsorberade fosfor. En mera närliggande förklaring kan dock vara att fältet var nydränerat och att vatten från markytan tagit en genväg till dräneringsledningarna via återfyllningen utan att markens porsystem varit så mycket delaktigt i transporten.

I det här försöket användes fast stallgödsel från nötboskap. Fosfor från denna borde därför inte rinna igenom jordens porsystem lika lätt som t ex flytgödsel av svin som har en betydligt högre halt av vatten och dessutom en högre fosforhalt. Resultatet var ändå i en stor ökning av läckaget av DRP som dessutom ökade i proportion till fosfortalet i jorden. Det är därför möjligt att t ex de organiska syrorna från stallgödseln även påverkade rörligheten för mineralfosfor i jorden (Ulén, 2009, muntlig källa). Försök med hela jordprofiler har visat att fosfors rörlighet ökade med halten av organiskt kol i stallgödsel (Tarkalson, 2009). Kalciumhalten i stallgödseln analyserades inte eftersom denna brukar vara låg. I motsats till stallgödsel kan svinggödsel ha en hög halt av kalcium och detta har visat sig minska fosfors rörlighet (Tarkalson, 2009).

Med lysimeterförsök förenklar man de naturliga förhållandena som finns i fält. Den i försöket långsamma vattentransporten innebar dock antagligen att markvattnet hade stora möjligheter att nå jämvikt med jordmatrisen under hela försökets gång. Experimentet visade därmed framför allt vilken potential matjordens fosforinnehåll (P-AL-talet) har på läckaget av löst reaktiv fosfor. Ett sådant samband är viktigt att visa när man skall ge råd för fortsatt gödsling. Den mesta gödslingen av fosfor sker idag i form av stallgödsel och tillsats av stallgödsel fick jordarna med högre P-AL att frigöra mer fosfor från jorden. Denna erfarenhet borde implementeras när man sprider stallgödseln. Idag begränsar man bara stallgödselspridningen genom att endast tillåta en viss mängd djur på varje gård, ett antal som beror på hur stor jordbruksareal man har. I stället borde man gå längre med att sprida stallgödsel optimalt på de skiften, eller delar av skiften som har lågt P-AL-tal i marken.

I tidigare försök gjorda av Djodjic m.fl.(2004) jämfördes sambanden mellan fosforläckage och jordens fosforinnehåll (P-AL) för en rad jordar från de långliggande bördighetsförsöken i djupa lysimetrar och vid naturlig nederbörd. De olika jordtyperna hade olika sätt att transportera vatten, beroende på de olika jordarnas inneboende egenskaper såsom vatteninnehåll vid fältkapacitet. Till skillnad från i den här studien, med simulerad nederbörd och lysimetrar till matjordsdjup, upptäcktes inga signifikanta skillnader i fosforläckage mellan de fyra olika fosforbehandlingarna som varje jord hade fått. Ingen korrelation kunde heller hittas mellan fosforkoncentration i dränerande vatten och jordarnas fosfornivåer. Slutsatsen blev att andra faktorer än fosforinnehållet och sorptionsegenskaperna var viktigare för läckaget genom hela jordprofilerna.

Det nu genomförda försöket visar däremot potentialen för läckaget från matjorden. Alvens betydelse för fosforläckage är dock stor. Den viktigaste skillnaden mellan alven och matjorden är alvens mindre innehåll av organiskt material. Eftersom det generellt finns färre rötter och rotkanaler och färre dagmaskar finns det ofta färre porer i alven än i matjorden. Det här kan leda till långsammare vattentransport och mera fosforsorption och bindning. Vid studier av bördighetsförsöken fanns det också ofta i alven ett positivt samband mellan lerhalten och

absorptionskapaciteten av fosfor. Lerhalten ökade generellt med djupet och med det även förmågan att binda fosfor (Börling m.fl., 2004).

För att få en bättre insikt om fosforläckaget från Bjertorp skulle man behöva upprepa regnsimuleringarna flera gånger för att se om fosforläckaget förändras med ökad vattenmängd. Man skulle också behöva kombinera de här resultaten med en regelrätt studie av fosforläckaget genom alven. Genom att sätta ett undertryck i botten av lysimetrarna skulle man också i viss mån kunna efterlikna en matjord med underliggande alv. Själva lysimeter tekniken skulle behöva förbättras för att efterlikna effekten av verklig nederbörd på jord i naturen. Bevattningen av lysimetrarna var nu något ojämnt fördelad, på grund av bristfällig teknisk utrustning. Lysimetrarna blev också igenslammade på grund av att jordaggregat ansamlades vid bottarna.

### **5.1 METODIKDISKUSSION OCH FÖRSLAG TILL FÖRÄNDRINGAR**

Fosforläckage i ett lysimeterförsök är generellt svårt att utföra så pass trovärdigt att det överensstämmer med de fosforläckage som sker i fält. Om man bortser från de olika årstidernas inverkan på typ av nederbörd och markstruktur, och att jorden kan få snötäcke och tjäle, så är det ändå svårt att efterlikna de naturliga förhållandena. Ett regn ersätts på labbet med en duschanordning som mer eller mindre simulerar en fuktig dimma som infiltrerar i jorden på ett mjukt sätt. Det här samt att försöket hade bestämda regelbundna duschningar (i verkligheten kommer regnen med olika mellanrum) får troligen effekt på fosforläckaget ut från jordarna. Stora regndroppar och stor regnintensitet kunde istället ha orsakat s.k. ponding och erosion av jordpartiklar, vilket generellt sett gynnar uppkomsten av makroporflöde.

Labbförsökets utrustning har inte kompenserat för undertryck vid lysimetrarnas bottnar vilket får som effekt att vattenflödet blir långsammare. Med igenslamning av markpartiklar efter flera efterföljande regnsimuleringar på den finmaskiga duken vid utloppet kan flödet bli ännu långsammare. Igenslamningen kan i vissa fall åstadkomma förhållanden vid botten så att ett eventuellt preferentiellt flöde i toppen av matjorden övergår till ett kolflöde vid botten. Med en långsammare vattentransport hinner däremot jämvikten mellan jordens fosfor och marklösningens fosfor ställas in, vilket får ett fosforläckage att spegla fosforinnehållet i jorden på ett tydligare sätt.

De rumsliga variationerna i fält innefattar laterala spricksystem som transporterar fosfor. Dessa kan troligen få vissa områden att läcka mer fosfor än andra. Med lysimeterförsök i en liten skala går denna rumsliga variation förlorad. Med uteblivna laterala spricksystem tvingas också vattnet ner genom lysimetrarna och fosforläckaget speglar än mer jordens fosforinnehåll vilket inte alltid är fallet vid fältstudier.

## SLUTSSATSER

- Det fanns ett klart samband mellan läckage av DRP och jordens P-AL i matjorden. Detta samband förstärktes med ökad vattenhalt.
- Hastigheten på vattenflödet är viktig för fosforläckagets storlek. Makroporflöde kan generera stora fosforläckage.
- Försöket visade på låga koncentrationer av DRP och OVRP. Tänkbar förklaring var makroporer som var urtvättade vid försökets start. Förmodligen var detekterade koncentrationer av DRP ett resultat av lugnare flöde genom jordmatrisen via s.k. mesoporer.
- Stallgödsel fick koncentrationen av DRP att öka proportionellt mot fosfortalet i jorden.
- Spridningen av stallgödsel bör anpassas efter jordens P-AL tal.
- Försöken borde inkludera studier av alvens betydelse av fosforläckage samt förbättras för att bättre efterlikna fältförhållanden.



## REFERENS

- Bergström, L., Djodjic, F., Kirchmann, H., Nilsson, I., Ulén, B. (2007). Fosfor från jordbruksmark till vatten-tillstånd, flöden och åtgärder i ett nordiskt perspektiv, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Rapport 21, 2.
- Beven, K. & Germann, P. (1982) "Macropores and water flow in soils " *Water resources research*, **18**, 1311-1325.
- Börling, K., Otabbong, E., Barberis E. (2001)"Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils" *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **59**, 39-46.
- Börling, K., Barberis, E., Otabbong, E. (2004) "Impact of long-term inorganic phosphorus fertilization on accumulation, sorption and release of phosphorus in five Swedish soil profiles" *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **69**, 11-21.
- Cote, C.M., Bristow, K.L. & Ross, P.J. (1999) "Quantifying the influence of intra-aggregate concentration gradients on solute transport" *Soil Science Society of America Journal*, **63**, 759-767.
- Cote, C.M., Bristow, K.L. & Ross, P.J. (2000) "Increasing the efficiency of solute leaching: impacts of flow interruption with drainage of the 'preferential flow paths' " *Journal of Contaminant Hydrology*, **43**, 191-209.
- De Jonge, H., De Jonge, L.W. & Jacobsen, O.H. (2000) "<sup>14</sup>C glyphosate transport in undisturbed topsoil columns" *Pest Management Science*, **56**, 909-915.
- Djodjic, F., Börling, K., Bergström, L. (2004) "Phosphorus Leaching in Relation to Soil Type and Soil Phosphorus Content" *Journal of Environmental Quality*, **33**, 678-684.
- Egnér, H., Riehm, H., Domingo, W.R. (1960) "Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden" *Kungliga Lantbrukshögskolans Annaler*, **26**, 199-215.
- Edwards, W.M., Shipitalo, M.J., Owens, L.B. & Dick, W.A. (1993) "Factors affecting preferential flow of water and atrazine through earthworm burrows under continuous no-till corn" *Journal of Environmental Quality*, **22**, 453-457.
- Geohring, L.D., Mchugh, O.V., Walter, M.T., Steenhuis, T.S., Akhtar, M.S. & Walter, M.F. (2001) "Phosphorus transport into subsurface drains by macropores after manure applications: implications for best manure management practices" *Soil Science*, **166**, 898-909.
- Heckrath, G., Brookes, P.C., Poulton, P.R., Goulding, K.W.T. (1995) "Phosphorous Leaching from Soils Containing Different Phosphorus Concentrations in the Broadbalk Experiment" *Journal of Environmental Quality*, **24**, 904-910.

- Hesketh, N., Brookes, P.C. (2000) "Development of indicator for risk of phosphorus leaching" *Journal of Environmental Quality*, **29**, 105-110.
- Huselius, L (2009). *Fosforläckage från växtodling – Orsaker och åtgärder*. LTJ-fakulteten, SLU.
- Isensee, A.R., Nash, R.G. & Helling, C.S. (1990) "Effect of conventional vs. no-tillage on pesticide leaching to shallow groundwater" *Journal of Environmental Quality*, **19**, 434-440.
- Jarvis, N.J. (2007) "A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality" *Soil Science*, **58**, 523-546.
- Kleja, D., Elert, M., Gustafsson, J.P., Jarvis, N.J., Norrström, A. (2006). *Metallers mobilitet i mark*. Hållbar sanering., Naturvårdsverket, Rapport 5536.
- Petersen, C.T., Hansen, S., H.E., Holm, J. & Koch, C.B. (2004) "Movement of suspended matter and a bromide tracer to field drains in tilled and intilled soil" *Soil Use and Management*, **20**, 271-280.
- Steineck, S., Gustafson, A., Stintzing, A., Salomon, E., Myrbeck, Å., Albihn, A., Sundberg, M. (2000). *Växtnäring I kretslopp*, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Tarkalson, D.D., Leytem, A.B. (2009) "Phosphorus mobility in soils columns treated with dairy manures and commercial fertilizer" *Soil Science*, **174** 2, 73-79.
- Ulén, B. (2004) "Size and settling velocities of phosphorus-containing particles in water from agricultural drains" *Soil, Air and Water Pollution*, **157**, 1-4, 331-343.
- Ulén, B. & Jakobsson C (2005) "Critical evaluation of measures to mitigate phosphorus losses from agricultural land to surface waters in Sweden" *Science of The Total Environment*, **344** 1-3, 37-50.
- Worrall, F., Parker, A., Rae, J.E. & Johnson, A.C. (1999) "A study of suspended and colloidal matter in the leachate from lysimeters and its role in pesticide transport" *Journal of Environmental Quality*, **28**, 595-604.
- Villholth, K.G., Jarvis, N.J., Jacobsen, O.H. & De Jonge, H. (2000) "Field investigations and modeling of particle-facilitated pesticide transport in macropores soil" *Journal of Environmental Quality*, **29**, 1298-1309.