



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för mark och miljö

Är kolrika jordar en källa till fosforläckage?

– En sammanställning av data från 130 åkerjordar
Are carbon-rich soils a source of phosphorus leakage?
– *A compilation of data from 130 arable soils*

Lisa Reiter

Kandidatuppsats i biologi
Agronomprogrammet – inriktning mark/växt

Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2013:09

Uppsala 2013

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och lantbruksvetenskap
Institutionen för mark och miljö

Lisa Reiter

Är kolrika jordar en källa till fosforläckage? – En sammanställning av data från 130 åkerjordar
Are carbon-rich soils a source of phosphorus leakage? – A compilation of data from 130 arable soils

Handledare: Holger Kirchmann, institutionen för mark och miljö, SLU
Examinator: Gerd Johansson, institutionen för mark och miljö, SLU

EX0689, Självständigt arbete i biologi – kandidatarbete, 15 hp, Grundnivå, G2E
Agronomprogrammet – inriktning mark/växt 270 hp

Serienamn: Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2013:09

Uppsala 2013

Nyckelord: fosfor, organiskt material, kol, mineralisering, läckage

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Abstract

Phosphorus (P) is an essential nutrient but a surplus could lead to eutrophication. Furthermore, the minerals used to produce the mineral phosphate is a non renewable resource. There are in other words several reasons to reduce the leakage of P and the agriculture is one important area to attend.

The aim of this work has been to investigate if carbon-rich arable soils content contain more P than arable soils with low carbon content. Moreover it has been calculated if the carbon-rich soils could pose a risk of P leakage by comparing their delivery of P with the plant uptake. The work has consisted of compiling the results from former gathered and analysed soil samples of 130 Swedish arable soils.

The fractions of P considered are water soluble P (P_w), ammonium lactate-extractable P (P-AL), hydrochloric acid-soluble P (P-HCl), organic ammonium lactate-extractable P (P_{org-AL}) and inorganic ammonium lactate-extractable P ($P_{org-HCl}$). The P-AL and P-HCl has been analysed both with colorimetric method, which detects the inorganic fraction and ICP, which detects the inorganic as well as the organic fraction. The difference between these values has given the value of P_{org-AL} and $P_{org-HCl}$, respectively.

The results show that there is a strong correlation between P_w and P-AL, which implies the possibility to make a realistic estimation of the amount of P in the soil solution by measuring the P-AL fraction. With the colorimetric method it is also shown not to exist any relation between P and the carbon content, whilst there with the ICP method exists a relation. This suggests that for carbon-rich soils, the colorimetric method could give an defective perception of the P content. It may therefore be advisable to consider other methods for such soils.

The majority of the soils investigated present a risk of P leakage. The carbon-rich soils often contain the highest concentration of P, however the soils with low carbon content contain the highest amounts of P. That indicates that the soils with low carbon content might pose a greater risk of leakage. Nevertheless, carbon-rich soils contain more organic carbon, which is a more mobile form of P and therefore is more easily transported to aquatic ecosystems. Based on this work it is difficult to conclude which kind of soil presents the greatest risk of leakage since the leakage is the result of many different processes taking part in complex systems.

Keywords: phosphorus, organic matter, carbon, mineralization, leakage

Sammanfattning

Fosfor (P) är ett essentiellt näringsämne för alla organismer men kan i överskott leda till övergödning av vattendrag. Dessutom är mineralerna ur vilka mineralfosfat utvinns en icke-förnyelsebar resurs. Det finns alltså flera orsaker till att minska läckaget av P och ett viktigt område att förbättra är jordbruket.

Syftet med det här arbetet har dels varit att undersöka om åkerjordar med hög kolhalt innehåller mer P än åkerjordar med låg kolhalt, dels att ta reda på ifall kolrika åkerjordar utgör en risk för P-läckage genom att jämföra P-leveransen med växtupptaget. Arbetet är en sammanställning av resultat från tidigare insamlade och analyserade jordprover från 130 åkerjordar.

En marks fosforleverande förmåga påverkas dels av mängden P och dels av hur lättlöslig P är, vilket bland annat beror på i vilken form den förekommer. De P-fraktioner som har undersökts i arbetet är vattenlöslig P (P_w), utbytbar P (P-AL), förråds-P (P-HCl), organisk utbytbar P (P_{org} -AL) och organisk förråds-P (P_{org} -HCl). För P-AL och P-HCl har fosforhalten mätts med kolorimetrisk metod, vilken mäter oorganisk P samt med ICP, vilken mäter både oorganisk och organisk P. Skillnaden mellan de båda metoderna har gett värdet på P_{org} -AL respektive P_{org} -HCl.

Resultaten visar att det finns ett starkt samband mellan P_w och P-AL. Det innebär att det är möjligt att göra en realistisk uppskattning av hur mycket vattenlöslig P jorden leverar genom att mäta P-AL-värdet. Vidare visar studien att P-AL och P-HCl inte ökar med kolhalten om kolorimetrisk analys används medan det däremot syns en ökning när halterna analyseras med ICP. Det tyder på att P-halter mätta med kolorimetrisk metod inte ger en representativ bild av jordarnas P-innehåll vid höga kolhalter. För kolrika jordar bör det därför övervägas att analysera fosforhalten med hjälp av andra metoder.

De flesta undersökta jordarna utgör en risk för P-läckage. De kolrika jordarna innehåller i många fall högre koncentration P, men mineraljordarna leverar de största mängderna. Det tyder på att mineraljordarna kan utgöra större risk för P-läckage. Dock innehåller kolrika jordar mer organiskt kol som är mer lättlösligt och därför lättare kan transporteras till olika vattensystem. Utifrån det här arbetet är det svårt att avgöra vilka jordar som utgör störst risk för läckage eftersom det faktiska läckaget påverkas av komplexa system med många påverkande faktorer.

Nyckelord: fosfor, organiskt material, kol, mineralisering, läckage

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
2	Syfte	8
3	Bakgrund	9
3.1	Fosfor	9
3.1.1	Förekomst i marken	9
3.1.2	Indelning av markens fosfor	10
3.1.3	Oorganisk markfosfor	10
3.1.4	Organisk markfosfor	11
3.1.5	Fosforförluster till vattendrag	13
3.2	Organiskt material.....	14
3.2.1	Funktioner i marken.....	14
3.2.2	Stabiliseringsmekanismer.....	15
3.3	Mineralisering	16
4	Material och metoder	18
4.1	Laborationsmetoder.....	20
4.1.1	Vattenlöslig fosfor	20
4.1.2	Utbytbar eller växttillgänglig fosfor.....	20
4.1.3	Förrådsfosfor	20
4.1.4	Kolorimetrisk och ICP-analys av fosfor.....	21
4.1.5	Markens kolhalt	22
4.2	Enkel linjär regression	22
5	Resultat	23
5.1	Vattenlöslig fosfor	23
5.2	Utbytbar fosfor	26
5.3	Förrådsfosfor	30
5.4	Mängd fosfor per hektar.....	34
6	Diskussion	36
7	Slutsats	41
8	Tackord	43
9	Referenser	44
10	Appendix 1	47

1 Inledning

Fosfor (P) är ett näringsämne som behövs i alla levande organismer. I växten ingår fosfor i DNA, RNA, ATP samt i dess cellmembran i form av fosfolipider (Eriksson, et al., 2011). Inom växtodling är det viktigt att grödan har tillräckligt med fosfor eftersom den annars kan få försvagat strå, bli mer mottaglig för växtsjukdomar och mogna senare än normalt (Tisdale & Nelson, 1975). Fosforbrist kan också leda till dålig blomning och sämre frökvalitet (Eriksson, et al., 2011). Om brist uppstår omfördelas fosfor från äldre till yngre växtdelar, vilket leder till att bristsymptomen ofta ses hos äldre vävnader först (Tisdale & Nelson, 1975).

Under andra halvan av 1900-talet, främst under 60- och 70-talet var fosforgödslingen i Sverige omfattande vilket innebar en uppgödsling av många åkerjordar (SNV, 1997). Sedan dess har fosforgödslingen minskat men många av jordarna har fortfarande ett högt fosforinnehåll. 41 % av jordarna ligger inom förrådsfosforklass V (>80 mg/ 100 g jord). De flesta åkerjordar har god status också vad gäller lättlöslig fosfor då endast 13,5 % av alla jordar ligger inom klass I och II (≤ 4 mg/100 g jord) (SNV, 2000). Grödans fosforbehov uppgår till omkring 15-25 kg P per hektar och år (Jordbruksverket, 2012). Ett överskott av fosfor kan innebära en ökad risk för läckage. Fosforläckage bidrar till övergödningen av vattendrag och hav genom att främst tillväxten av cyanobakterier gynnas av fosfortillskottet. Ökad näringstillgång innebär också ökad tillväxt av olika kärlväxter vilket kan leda till att vattendrag växer igen (SNV, 2000). För att förbättra miljön har Sveriges regering antagit 16 miljömål. Några av dem är *Grundvatten av god kvalitet*, *Hav i balans samt levande kurs och skärgård*, *Levande sjöar och vattendrag* samt *Ingen övergödning*. För att uppnå målen är det viktigt att minska

fosforläckaget till akvatiska miljöer (Sveriges regering, 2009). En betydande del av Sveriges fosforutsläpp kommer från jordbruket varför det är angeläget att vidta åtgärder inom det området (Bergström, et al., 2007).

Fosfor når marken via bland annat atmosfäriskt nedfall och via gödning med stallgödsel eller mineralgödsel (Bergström, et al., 2007). I mineralgödsel ingår fosfat utvunnet ur fosforrika mineral runt om i världen. Mineralerna är en icke-förnyelsebar resurs som finns i begränsad mängd (Steen, 1998) och det är därför viktigt att ta tillvara på den fosfor som finns i marken. Att förhindra fosforläckage är en viktig del i arbetet (Bergström, et al., 2007).

För att kunna minska fosforläckaget är det viktigt att veta vilka faktorer som påverkar transporten av fosfor genom marken, men också vara medveten om var de största läckagen sker (SNV, 1997). I den här rapporten har det undersökts om det finns något samband mellan åkerjordars kolhalt och dess innehåll av fosfor för att försöka ta reda på om åkerjordar med hög halt organiskt material kan vara en viktig källa till fosforläckage. Arbetet har baserats på analysdata av 130 svenska åkerjordar som är belägna runt om i landet, från Skåne till Norrland och som innefattar både organogena jordar och mineraljordar med olika halter av organiskt material.

2 Syfte

Syftet med arbetet har varit att undersöka om åkerjordar med höga halter av organiskt material innehåller mer fosfor jämfört med mineraljordar med låga kolhalter utifrån de analysdata som funnits att tillgå. Dessutom har målsättningen varit att undersöka om kolrika åkerjordar levererar mer fosfor per år än vad växterna kan ta upp och på så vis utgör en källa för fosforläckage.

Då arbetet inleddes ställdes tre frågeställningar upp;

1. Finns det ett samband mellan koncentrationer av olika fosforfraktioner och kolhalter?
2. Hur mycket vattenlöslig fosfor finns i de olika jordarna?
3. Hur stora är halter av vattenlöslig fosfor, utbytbar fosfor, förrådsfosfor och organisk fosfor i jordar som har hög kolhalt?

Syftet med frågeställning 2 är att undersöka hur många av arkivjordarna som kan ge upphov till stort fosforläckage till vattendrag via markvattnet, och alltså inte via transport av jordpartiklar.

Utifrån frågeställningarna skrevs tre hypoteser;

1. Koncentrationen av vattenlöslig fosfor, utbytbar fosfor samt förrådsfosfor ökar med kolhalten i marken
2. Halten utbytbar organisk fosfor och organisk förrådsfosfor ökar också med kolhalten i marken
3. Halten vattenlöslig fosfor är korrelerad med halten utbytbar fosfor

3 Bakgrund

3.1 Fosfor

3.1.1 Förekomst i marken

Fosfor är i vissa ekosystem en begränsande tillväxtfaktor och cirkulationen av fosfor beror främst på förlopp som sker i biosfären. Förekomsten av fosfor i litosfären är nämligen låg (endast 0,1 %) och till skillnad från exempelvis kol och kväve förekommer fosfor endast försumbart i gasform (Quiquampoix & Mousain, 2005) vilket innebär att organismer måste ta upp den fosfor de behöver från marken eller vattnet omkring sig (Turner, 2005). Många växter använder sig av mykorrhiza för att få tillgång till en större jordvolym att ta upp fosfor från (Quiquampoix & Mousain, 2005).

Fosforhalten i marken beror på olika faktorer och den är oftast högre i unga ovittrade jordar. Totalfosforhalten ökar med ökad halt organiskt material och med ökad lerhalt (Bergström, et al., 2007). Den påverkas bland annat av tillförseln och nedbrytningshastigheten av organiskt material, på hur mycket av fosfor i marken som är växttillgänglig och på hur mycket som immobiliseras av markens mikroorganismer (Tisdale & Nelson, 1975). I jordar med låg fosfatlöslighet utgör den organiska fosfor en viktig källa till växtnäring (Quiquampoix & Mousain, 2005).

I en del av dagens analysmetoder mäts fosfor med hjälp av kolorimetrisk detektion. Denna metod kan dock ge en felaktig bild av markens innehåll av de olika fosforfraktionerna eftersom den i vissa situationer kan överskatta och i andra situationer underskatta halten organisk fosfor. Därför kan andra metoder som kromatografisk

separation eller separation genom elektrofores komma att bli mer aktuella i framtiden (McKelvie, 2005).

3.1.2 Indelning av markens fosfor

Klassiskt indelas fosfor i marken i en organisk fraktion (all fosfor som är bunden till kolbaserade molekyler) och en oorganisk fosfatfraktion (löst, adsorberad, komplexbunden eller i fosfatmineral). Halten oorganisk fosfor är oftast högre än den organiska fraktionen, undantaget rent organogena jordar. Den organiska fosforhalten är generellt störst i matjorden eftersom det där sker en anrikning av organiskt material (Quiquampoix & Mousain, 2005).

Det finns dock tillfällen då en annan indelning av fosfor lämpar sig bättre, exempelvis vid beskrivning av hur näringsämnet används av växter och mikroorganismer. Fosfor kan då delas in i fraktionerna enzymatisk hydrolyserbar fosfor, löst fosfor och membrangenomtränglig fosfor (Quiquampoix & Mousain, 2005). I det här arbetet har dock indelningen i organisk respektive oorganisk fosfor använts.

3.1.3 Oorganisk markfosfor

Oorganisk fosfor kan förekomma löst i marklösningen, adsorberat till järn (Fe)- och aluminium(Al)-oxider samt som utfällningar med löst Fe^{3+} och Al^{3+} eller kalciumjoner, Ca^{2+} (Eriksson, et al., 2011). Fosfor ingår i mineraler som exempelvis apatit och frigörs då dessa vittrar. Växter tar främst upp fosfor i form av divätefosfat, H_2PO_4^- och även till viss del i form av vätefosfat, HPO_4^{2-} . De båda jonerna finns lösta i marklösningen och vilken form som dominerar beror till stor del på pH-värdet i marken (Tisdale & Nelson, 1975). Vid pH 7,2 finns det lika mycket H_2PO_4^- som HPO_4^{2-} i marklösningen. Vid ett lägre pH ökar koncentrationen av H_2PO_4^- och vid ett pH över 7,2 dominerar HPO_4^{2-} . Fosfor är mest tillgängligt vid ett pH omkring 6–7. Vid ett pH på 2,1 kan fosfor förekomma som H_3PO_4 och vid pH-värde omkring 12 som formen PO_4^{3-} (Eriksson, et al., 2011).

I sura jordar (pH <5,5) fixeras fosfatjonerna främst till lösta Al- och Fe-joner så att svårslösliga komplex bildas och fosfatjonerna blir då inte tillgängliga för växterna. I alkalina jordar med pH över 7 kan fosfor fixeras till Ca. Vid högt pH-värde ökar ofta mängden lösta kalciumjoner

samt lösligheten av HPO_4^{2-} vilket resulterar i att fosfor kan fällas ut som kalciumfosfat (Tisdale & Nelson, 1975).

Bindningen av fosfor i marken beror förutom adsorption och utfällning även på mängd och typ av lermineral. Mängden och finkornigheten av CaCO_3 påverkar också hur fosfor binds. Typen av lermineral spelar roll genom att en del lermineral innehåller mer Fe- och Al-hydroxider vilka genom sin partiella positiva laddning kan binda till sig lösta fosfatjoner. På samma sätt kan leror innehållande Ca^{2+} adsorbera mer fosfat än leror med envärda katjoner som exempelvis natrium, Na^+ (Tisdale & Nelson, 1975).

Andra faktorer som påverkar bindningen av fosfor är bland annat tiden. Ju längre tid markpartiklarna och fosfor har kontakt med varandra desto mer svåröslig blir fosfor i marken (Tisdale & Nelson, 1975).

3.1.4 Organisk markfosfor

Det finns olika typer av organiska föreningar innehållande fosfor varav tre huvudgrupper kan urskiljas; inositolfosfater, fosfolipider och nukleinsyra (Quiquampoix & Mousain, 2005). Inositolfosfater är en grupp fosfatmonoestrar som består av kolhydraten inositol och som har en eller flera fosfatjoner bundna till sig (Celi & Barberis, 2005). Inositolerna med flest fosfatjoner är de som är mest stabila i marken (Quiquampoix & Mousain, 2005). Mängden och halten inositolfosfat kan variera men det är ofta den vanligaste formen av organisk fosfor och kan utgöra mer än 80 % av markens totala organiska fosforhalt. Denna grupp är mer motståndskraftig mot mineralisering än de andra huvudgrupperna av organisk fosfor och anses vara relativt otillgänglig för växterna. Vid lågt pH bildar inositolfosfat olösliga salter och vid höga pH-värden kan utfällning med Ca ske (Quiquampoix & Mousain, 2005). Monofosfatestrar av inositolfosfat adsorberas troligen till järnoxider på samma sätt som fosfatjoner (Celi & Barberis, 2005). Fosfolipider är fosfatdiestrar som utgör en relativt liten del av markens organiska material (i genomsnitt 1 %) och tros omsättas relativt snabbt i jorden (Quiquampoix & Mousain, 2005). Även nukleinsyror är fosfatdiestrar som mineraliseras snabbt och sedan kan bindas i marken. I marken dominerar som nämnts ovan inositolfosfat medan fosfolipider är den dominerande formen i växtdelar och nukleinsyra utgör största delen av organisk fosfor i exempelvis svampar och bakterier (Turner, 2005).

En marks fosforleverande förmåga påverkas av mängden fosfor men också av hur lätttröglig fosfor i marken är (Celi & Barberis, 2005). Mängden fosfor som frigörs som fosfatjoner styrs bland annat av nedbrytningshastigheten av det organiska materialet. Organisk fosfor kan brytas ner på olika sätt, antingen med hjälp av olika enzymer som fosfataser, nukleaser och fytaser eller på abiotisk väg. Abiotisk nedbrytning kan ske huvudsakligen med fotolys eller hydrolys. Vilken av reaktionstyperna som sker beror till stor del på vilken typ av organisk fosforförening som bryts ner och vart den befinner sig. Nedbrytningshastigheten av organisk fosfor kan hämmas av att de organiska föreningarna är kemiskt eller fysiskt stabiliserade (Baldwin, et al., 2005). Stabilisering kan också ske genom att organisk fosfor binds direkt till ytan på det organiska materialet eller genom indirekt bindning till ytan med hjälp av bi- eller trivalenta katjoner vilka fungerar som bryggor. Förekomsten av fosfor i marken verkar främst avgöras av adsorption. Det beror på att markens mineral, främst kolloider har en stor specifik yta samt har förmågan att binda till sig anjoner genom variabla positiva laddningar (Celi & Barberis, 2005).

Hur snabbt och hur mycket organisk fosfor som adsorberas till markpartiklar beror på strukturen hos den organiska fosformolekylen, främst mängden fosforgrupper och dess molekylstorlek, men även egenskaper hos marklösningen och markens mineraler. I sura jordar sker adsorptionen främst till Fe- och Al-oxider medan den i neutrala och basiska jordar i huvudsak sker till lermineral och organiskt material (Celi & Barberis, 2005).

Organisk fosfor kan även förekomma komplexbundet eller som utfällningar i marken, antingen med Fe eller Al eller med Ca. För den här typen av bindningssätt har främst mängden fosfatgrupper i den organiska molekylen betydelse. Redoxpotentialer i marken påverkar också lösligheten hos fosfor. Om det råder syrefria förhållanden kan Fe(III) reduceras till Fe(II) vilket gör att Fe-oxider löses upp och organisk fosfor kan frigöras. Detta sker då partikelbunden fosfor transporteras genom vattendrag och innebär att fosfor som tidigare var stabiliserad frigörs och kan mineraliseras och bidra till övergödningsproblem (Celi & Barberis, 2005).

Enkla organiska fosforföreningar tas upp snabbt i mikrober igen efter frigörelse. Det är förklaringen till varför de föreningarna förekommer i låga koncentrationer i marklösningen (Celi & Barberis, 2005).

3.1.5 Fosforförluster till vattendrag

Då fosfor transporteras från mark till vattendrag är regn den drivande faktorn vid upplösning och i form av transportmedel. Fosfor kan läcka till vattendrag via dräneringsvatten efter en längre tid i jorden (Parvage, et al., 2011) eller utan att hinna reagera med marken, exempelvis då gödsel läggs på mark och sedan lakas ut i makroporer utan större kontakt med markpartiklarna. Fosfor kan också transporteras i markprofilen genom inre erosion i form av partikelbunden fosfor. Vattensystem är mycket känsliga för överskott av fosfor även om det inte är helt klart exempelvis hur organisk fosfor påverkar övergödningen av akvatiska system. I en del fall spelar också atmosfäriskt nedfall av fosfor i form av damm stor roll i mark- och vattensystem (Turner, 2005).

Hur mycket organisk fosfor som kan förloras från marken via utlakning beror bland annat på mängden organisk fosfor i marken. Andra faktorer så som dynamiken av fosforfrigörelse under året, hydrologi, klimat och markanvändning påverkar också risken för läckage. Även i vilken form fosfor förekommer i marklösningen spelar roll för risken för läckage till vattendrag och därmed övergödning, eftersom vissa former av fosfor är mer rörliga än andra på grund av att de binds olika hårt i marken. Det gäller både organisk och oorganisk fosfor (Turner, 2005).

Fosfatjoner är generellt relativt orörliga i markprofilen på grund av starka bindningar beskrivna ovan medan organisk fosfor i form av sockerfosfater och fosfatdiestrar bara binds svagt till markpartiklar och kan därför röra sig nedåt i marken. På så sätt kan delar av den organiska fosforfraktionen lättare läcka ut till vattendrag via avrinning och bidra mer till övergödningproblemen. Det har visats att dräneringsvatten som har mer kontakt med markpartiklar också innehåller högre halter av organisk fosfor (Turner, 2005). Den lättrorliga organiska fosfor kan dock brytas ned, vilket innebär att den omvandlas till mer svårrorlig fosfat. Detta kan motverka risken av läckage av lättrorlig organisk fosfor. Hur situationen ser ut i verkligheten beror dock på faktorer som exempelvis hur mycket och hur snabbt vattenflödet genom marken är.

Om det faller regn på en torr jord kan mycket vatten transporteras snabbt genom marken och fosfor hinner inte brytas ner. Det gäller särskilt jordar innehållande mycket makroporer, som exempelvis många leror. Alla former av organisk fosfor är inte svagt bundna i marken; inositolfosfat är en form som binds hårt till markpartiklar. Den kan dock, precis som ortofosfat, läcka i partikelbunden form (Turner, 2005).

För att uppskatta hur stor risken är för fosforläckage från en jord till vattendrag har Pöthig *et al.* (2010) utarbetat en metod som är oberoende av vilken typ av jord som undersöks. Jordar med över 0,5 mg vattenlöslig fosfor/100 g jord klassas som jordar med hög risk för fosforläckage då det tyder på en hög fosformättnadsgrad. Djodjic *et al.* (2004) poängterar dock att det är viktigt att veta hur fosfor rör sig i marken för att uppskatta risken för läckage.

3.2 Organiskt material

3.2.1 Funktioner i marken

Markens organiska material består av levande markorganismer, förna och humifierat organiskt material. Det har en viktig funktion i marken som förråd av näringsämnen, främst vad gäller kol, kväve, fosfor och svavel och jordar med hög halt organiskt material har ofta en god vattenhållande förmåga (Eriksson, *et al.*, 2011). Näringsinnehållet i jordar med mycket organiskt material beror bland annat på mängden mineralämnen i jorden och sammansättningen av det organiska materialet. Organogena jordar består av torv- och gyttjejordar. En organogen torvjord innehåller minst 30 viktsprocent organiskt material medan motsvarande siffra för en organogen gyttjejord är 6 viktsprocent eller mer. I organogena jordar kan det relativt lätt uppstå anaeroba förhållanden och jordarna har ofta lågt pH vilket medför att rotdjupet kan bli begränsat (Berglund, 2008).

Mängden organiskt material i marken beror på hur mycket som tillförs via förnproduktionen och hur snabbt materialet bryts ned. Omsättningshastigheten påverkas bland annat av markens fuktighet, temperatur samt av näringsinnehållet i det organiska materialet. Om det finns gott om tillgänglig näring i det initiala skedet av förnans nedbrytning kan mikroorganismerna tillväxa snabbt och nedbrytningshastigheten i marken går då snabbare. Markorganismernas

aktivitet påverkas förutom av markens näringsinnehåll också av faktorer som pH-värde och toxiska föreningar (Eriksson, et al., 2011).

Markens organiska material påverkar tillgängligheten och lösligheten av fosfor. Vid mineralisering av organiskt material omvandlas organiska former av växtnäring till oorganiska former och näringen blir på så vis växttillgänglig (Eriksson, et al., 2011). Den koldioxid som frigörs vid mineraliseringen bildar tillsammans med markvattnet kolsyra, H_2CO_3 (Tisdale & Nelson, 1975). Kolsyra är en svag syra (Chang, 2010) som kan bidra till upplösningen av en del primära mineral och därmed även öka lösligheten av fosfor. Effekten tros vara störst i basiska till svagt sura jordar. Det kan också bildas komplex mellan fosfor och humus vilka är lättare att ta upp för växter, och humusämnen kan även kapsla in seskvioxider vilket hindrar fosfatjoner att fixeras till dessa (Tisdale & Nelson, 1975).

3.2.2 Stabiliseringsmekanismer

Det finns tre huvudmekanismer som stabiliserar organiskt material i marken; biokemisk stabilitet mot nedbrytning, kemisk bindning till markpartiklar och spatial otillgänglighet för enzymer och mikroorganismer. Ju stabilare det organiska materialet är desto svårare är det för markorganismerna att bryta ner det, varför stabiliseringsmekanismerna påverkar hur mycket fosfor som mineraliseras i marken (Eriksson, et al., 2011).

Vad gäller biokemisk stabilitet beror den på det organiska materialets sammansättning. Ju mer lättnedbrytbara föreningar, så som enkla sockerarter och kväverika föreningar materialet innehåller desto snabbare kan markorganismerna bryta ner det. Om lignininnehållet är stort går omsättningen däremot långsamt. Nedbrytningen av förna går ofta snabbt i början då mängden lättomsättbara föreningar är stor men med tiden ökar den relativa mängden stabila föreningar varpå hastigheten av förnenedbrytningen avtar (Eriksson, et al., 2011).

Kemisk stabilisering innebär att det organiska materialet till viss del är skyddat mot nedbrytning genom att det adsorberas till ytorna på exempelvis seskvioxider. Seskvioxider innehåller precis som organiskt material variabla laddningar men dess ytor är oftast positivt laddade vid markens normala pH-värde. Om de funktionella grupperna i det

organiska materialet är protonerade blir de negativt laddade och komplexbinds då relativt hårt till oxidytorna (Eriksson, et al., 2011).

Den tredje stabiliseringsmekanismen, spatial otillgänglighet kan uppkomma i lerjordar där humusämnen och lerpartiklar binds till varandra i små porer. På så vis blir det organiska materialet svåråtkomligt för markorganismerna (Eriksson, et al., 2011). En annan typ av fysiskt skydd som kan förekomma är då strukturella kolhydrater (som cellulosa, hemicellulosa och pektin) (Fogelfors, 2001, pp. 85-86) ligger inlindade i svårnedbrytbara ligninmolekyler (Eriksson, et al., 2011).

3.3 Mineralisering

Hur mycket fosfor som frigörs under mineraliseringen beror på C/P-förhållandet, C/N-förhållandet, materialets lignininnehåll, temperatur, markfukt samt hur mycket, hur aktiva och vilken typ av mikroorganismer marken innehåller. Markens mikroorganismer kan förutom att mineralisera näringsämnen även immobilisera dem, vilket innebär att oorganiska föreningar omvandlas till organiska (Oberson & Joner, 2005). Immobiliseringen beror på mikrofloras och det organiska materialets sammansättning samt olika faktorer som påverkar markorganismernas tillväxtförmåga (Eriksson, et al., 2011).

De mikroorganismer som deltar i mineraliseringen av fosfor är främst bakterier, svampar, protozoer, en del nematoder samt alger. Av dessa utgör bakterier och svampar den största mängden varav svampar dominerar sett till vikten medan bakterier dominerar i antal (Oberson & Joner, 2005). Seeling & Zasoski (1993) har visat att mängden organisk fosfor är den dominerande filtrerbara fosforfraktionen i fertil jord och blir odetekterbar då jorden steriliserats.

Mineralisering berör i huvudsak tre olika källor till organisk fosfor; organisk fosfor från mikroorganismer, från markens organiska material samt från färskt organiskt material (som exempelvis växtdelar och stallgödsel). Mineralisering av fosfor kan ske på två sätt. Det kan ske via kolmineralisering, varvid oorganisk fosfor frigörs från organiskt material när det organiska materialet tas upp av mikrober och kolet oxideras, vilket är en process som drivs av mikroorganismernas energibehov. Det kan också ske via frigörandet av oorganisk fosfor med hjälp av exoenzymatisk hydrolys vilket styrs av mikrobernas enzymutsöndring för

att tillgodose behovet av fosfat. Om fosforinnehållet i det organiska materialet är mindre än innehållet i mikroorganismerna kommer det inte ske någon nettomineralisering av fosfor utan en immobilisering (Oberson & Jøner, 2005).

4 Material och metoder

Arbetet har till stor del bestått av att sammanställa analysdata från 130 arkivjordar som tidigare har blivit insamlade och analyserade. Arbetet inkluderar också en litteraturstudie som har baserats på material hämtat från främst böcker och artiklar.

Analysdata av arkivjordarna består av följande: vattenlöslig fosfor (P_{water}), utbytbar eller växttillgänglig fosfor (P-AL), förrådsfosfor (P-HCl), organisk utbytbar fosfor ($P_{\text{org-AL}}$) samt organisk förrådsfosfor ($P_{\text{org-HCl}}$). Fosfor har analyserats med hjälp av ICP samt via kolorimetrisk metod både med avseende på P-AL och P-HCl. Med ICP mäts både den organiska och den oorganiska fosforhalten medan den kolorimetriska metoden endast mäter lösningens oorganiska fosforhalt. Skillnaden mellan ICP och kolorimetrisk mätt halt ger $P_{\text{org-AL}}$ respektive $P_{\text{org-HCl}}$.

Det har inte funnits några mätvärden på totalfosfor. I den här studien har därför halten förrådsfosfor antagits motsvara markens totala fosforhalt. Enligt SNV (1999) frigör HCl-metoden 80-90 % av markens totala fosforinnehåll. Sammanställningen av analysdata har gjorts med hjälp av Microsoft Excel 2010.

Alla mätningar utom P_{water} var från början angivna i enheten mg P/100 g jord. Vattenlöslig fosfor var istället mätt per volym jord (mg P/100 ml jord) och var därför tvungen att räknas om till koncentration per vikt jord. Uträkningen gjordes på följande sätt:

$$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ ml}$$

$$\rho = \text{g jord/cm}^3 \text{ jord} = \text{g jord/ml jord}$$

$$P_{\text{water}} \text{ per vikt jord} = \frac{\text{mg P}}{100 \text{ ml jord} * \frac{\text{g jord}}{\text{ml jord}}} = \frac{\text{mg P}}{100 \text{ g jord}}$$

De olika fosforhalterna har relaterats till jordarnas kolhalt. Kolhalten är ett mått på jordarnas innehåll av organiskt material eftersom kol är det grundämne som främst bygger upp organiskt material. I de analysvärden som framtagits tidigare har jordarnas mullhalt mätts. Mullhalt innebär humifierat organiskt material i matjorden och innehåller i genomsnitt 58 % kol (Eriksson, et al., 2011). För att få fram jordarnas motsvarande kolhalt har mullhalten därför multiplicerats med 0,58. Mullhalten har räknats ut från organiskt kol mätt med WR-12 Carbon Determinator.

För att undersöka om det är någon skillnad mellan fosforhalterna i mullrika åkerjordar och rena mineraljordar delades arkivjordarna in i grupper utefter kolhalt. Den första gruppen utgörs av jordar med 0-3 % kol, den andra gruppen 3-6 % kol och den tredje gruppen >6 % kol. Enligt klassificeringen av matjord motsvarar det följande tre jordartsbenämningar; mullfattiga till måttligt mullrika mineraljordar, mullrika mineraljordar samt mycket mullrika mineraljordar till mulljordar (Eriksson, et al., 2011, p. 25). Utifrån en sammanställning av SNV (1997) innehåller omkring 93 % av Sveriges åkerjordar 6 % kol eller mindre och 7 % av jordarna har högre kolhalter än 6 %.

Slutligen har de olika koncentrationerna av fosfor räknats om till motsvarande mängd fosfor per hektar. I Sverige uppgår matjordens djup oftast till plöjningsdjupet, vilket i de flesta fall ligger mellan 20-30 cm (Eriksson, et al., 2011). Vid beräkning av volym jord per hektar har därför matjordens djup antagits vara 25 cm. Efter beräkning av mängd fosfor per hektar har sedan slutsatser kunnat dras om jordarnas förmåga att leverera fosfor i förhållande till växternas upptag. Omräkningen från mg P/100 g jord till kg P/ha har gjorts enligt följande beräkning:

$$\text{Kilogram P per hektar} = \frac{\text{Horisontens djup(m)} * \text{hektar(m}^2) * \rho\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \text{konc P}\left(\frac{\text{mg P}}{\text{kg jord}}\right)}{1\ 000\ 000}$$

Räkneexempel:

1 hektar= 10 000 m²

Horisontens djup= 25 cm= 0,25 m

Skrymdensitet, $\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3 = 1,5 * 10^3 \text{ kg/dm}^3 = 1,5 \text{ ton/m}^3$

P-AL= 6,9 mg P/100 g jord= 69 mg P/kg jord

1 kg= 1000 000 mg

Volym jord= 0,25 m * 10 000 m²= 2 500 m³

Vikt jord= $2500 \text{ m}^3 * 1,5 * 10^3 \text{ kg/m}^3 = 3\,750\,000 \text{ kg/m}^3$

Mängd P per volym jord:

$$69 \frac{\text{mg P}}{\text{kg jord}} * 3\,750\,000 \frac{\text{kg jord}}{\text{m}^3} = 258\,750\,000 \frac{\text{mg P}}{\text{m}^3} = 258,75 \frac{\text{kg P}}{\text{m}^3}$$

4.1 Laborationsmetoder

4.1.1 Vattenlöslig fosfor

Vattenlöslig fosfor är analyserad enligt van der Paaus extraktionsmetod och ger ett mått på hur mycket fosfor som finns i marklösningen. Metoden mäts på volymbasis och fungerar oavsett vilken typ av jord det är, undantaget jordar med mer än tio procents innehåll av järn(III)oxid, Fe_2O_3 . Jordprovet filtreras genom ett 2 mm såll och fuktas under 22 timmar varpå fosfor extraheras genom att jordprovet skakas under en timme tillsammans med avjoniserat vatten i ett förhållande om en del jordprov och 60 delar vatten. Fosforkoncentrationen mäts genom kolorimetrisk analys enligt Murphy och Riley och anges ofta som ett Pw-värde med enheten mg P_2O_5 per liter torr jord (Paauw, 1971).

4.1.2 Utbytbar eller växttillgänglig fosfor

Genom metoden, som utvecklades av Egnér analyseras utbytbar fosfor. Med hjälp av en blandning av ammoniumlaktat(AL)-lösning och ättiksyra (0,1M NH_4 -laktat + 0,4M HOAc) extraheras den fosfor i jordprovet som anses vara växttillgänglig. Extraktets pH är justerat till 3,75 vilket gör att även kalciumbunden fosfor löses upp vid analysen. I kalkrika jordar leder Egnérs AL-metod därför till en överskattning av mängden utbytbar fosfor och på sådana jordar används därför ofta andra analysmetoder. Provets fosforkoncentration bestäms med kolorimetrisk analys (Ottabong, et al., 2009). Analysdata med erhållna P-AL-värden delas in i fem olika klasser (Eriksson, et al., 2011) och används för att göra en bedömning av markens gödslingsbehov (Ottabong, et al., 2009).

4.1.3 Förrådsfosfor

Koncentrationen förrådsfosfor har analyserats enligt Kungliga Lantbruksstyrelsens kungörelse (1965). Provet tas in och torkas varpå det

sållas genom en 2 mm såll för att urskilja finjorden. Till finjorden sätts sedan 2,00 M saltsyra och blandningen skakas. pH-värdet är mycket lågt vilket gör att även hårt bunden fosfor som inte är växttillgänglig frigörs. Extraktionsmetoden löser inte upp alla fosforföreningar, till exempel vissa mineraler (SNV, 2005). Innehållet av fosfor bestäms sedan med kolorimetrisk analys (KLS, 1965). Markens koncentration av förrådsfosfor kan delas in i fem olika klasser med motsvarande P-HCl-värde. Värdet används vanligen inte vid rådgivning men kan däremot vara användbart då markens fosforbalans beräknas (Jordbruksverket, 2012).

4.1.4 Kolorimetrisk och ICP-analys av fosfor

Löst och filtrerbar fosfor i vattenextrakt mäts ofta med någon kolorimetrisk metod eller med hjälp av spektrometrisk metod (Inductively Coupled Plasma, ICP) efter att lösningen filtrerats genom ett filter (Morleghem, et al., 2011).

I en kolorimetrisk analys bildas någon typ av färgat komplex mellan en blandreagens innehållande molybdat och oorganisk filtrerbar fosfor i lösningen (McKelvie, 2005). Oftast krävs en sänkning av lösningens pH-värde för att det färgade komplexet ska kunna bildas. För att bestämma koncentrationen av fosfor mäts sedan den färgade lösningens absorbans (Morleghem, et al., 2011).

Genom ICP-bestämningen fås ett mått på totalhalten filtrerbar fosfor i provet. För denna analysmetod löses hela provet upp i 7 M salpetersyra. Därefter mäts koncentrationen av fosfor på en viss våglängd med hjälp av spektrometri (Morleghem, et al., 2011).

Skillnaden mellan metoderna är att enbart halten oorganisk fosfor bestäms med kolorimetrisk analys medan både oorganisk och organisk fosfor bestäms med ICP. Skillnaden ger ett mått på halten organisk fosfor (Morleghem, et al., 2011). En nackdel med den kolorimetriska metoden är att polyfosfat, som tillhör den oorganiska fosforfraktionen inte reagerar och bildar färgkomplex med molybdat och därför inte detekteras då absorbansen mäts. Polyfosfat kan då felaktigt räknas som organisk fosfor. För att klargöra hur mycket som faktiskt är organisk fosfor är det viktigt att analysera mängden polyfosfat (McKelvie, 2005), något som dock inte har gjorts i den här studien. En annan felkälla som finns vid kolorimetrisk analys är att partikelbunden fosfor kan lösas upp och leda

till att den organiska fosforfraktionen underskattas medan den oorganiska delen överskattas (Morleghem, et al., 2011).

4.1.5 Markens kolhalt

Arkivjordarnas mullhalt har bestämts utifrån organiskt kol mätt med en LECO WR-12 Carbon Determinator. Den totala kolhalten i jordprovet fås genom att analysera 0,2-0,5 g jord tillsammans med bland annat en katalysator bestående av Fe vilken påskyndar förbränningen av oorganiskt material. För att analysera halten organiskt kol behandlas jordprovet med spädd HCl, 1:1 HCl:H₂O. På det sättet löses karbonatkol upp och det kol som kvarstår i provet är organiskt kol. Kolet som finns i jordprovet oxideras till CO₂, vilken i sin tur mäts med IR-detektion (LECO Corporation, 2007).

4.2 Enkel linjär regression

För att undersöka vilka samband det finns mellan variabler kan regressionsanalyser göras. I fallet med en enkel linjär regression antas det att det endast finns en förklarande variabel i ekvationen. Den förklarande, eller oberoende variabeln kallas för x-variabeln medan den beroende variabeln benämns y-variabeln. Ekvationen för enkel linjär regression ser ut som följer:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 * x_i + e_i$$

Ekvationen ger en rät linje. Symbolen e innebär den avvikelse som uppkommer från den räta linjen då y mäts. I modellen antas den avvikelsen vara normalfördelad och ha samma varians oavsett vilket värde x antar. Ett annat antagande som görs är att variabeln x är mätt utan eller med försumbart mätfel. (Olsson, et al., 2005)

R^2 -värdet, som också kan kallas determinationskoefficienten beskriver hur många procent av den beroende variabeln, y som förklaras av den oberoende variabeln, x . R^2 -värdet kan variera mellan 0 och 1 och ett r^2 -värde nära 1 innebär en hög korrelation mellan de båda variablerna medan ett värde nära 0 indikerar en väldigt låg korrelation (Sengupta & Jammalamadaka, 2003).

5 Resultat

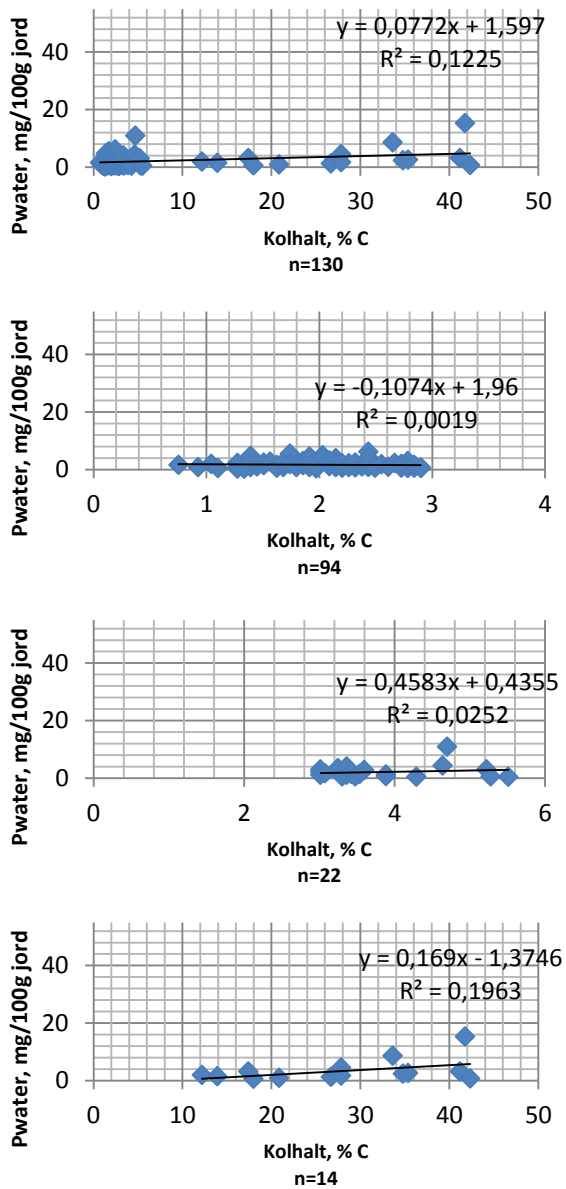
5.1 Vattenlöslig fosfor

Koncentrationerna vattenlöslig fosfor är relativt höga då den lägsta halten bland arkivjordarna är 0,24 mg P/100 g jord medan det högsta värdet uppgår till 15,2 mg P/100 g jord. Det kan jämföras med studien gjord av Parvage et al. (2011) där de flesta jordarna hade fosforhalter mellan 0 och 1,5 mg P/100 g jord. I den studien ingick däremot inga jordar med mycket hög halt organiskt material, då den högsta kolhalten var omkring 7 %. I det här arbetet har de flesta jordar koncentrationer under 3 mg P/100 g jord, något som också visas av att medelvärdet för alla 130 jordar uppgår till 1,99 mg P/100 g jord. All analysdata kan hittas i Appendix 1 och halterna vattenlöslig fosfor återfinns i tabell 3.

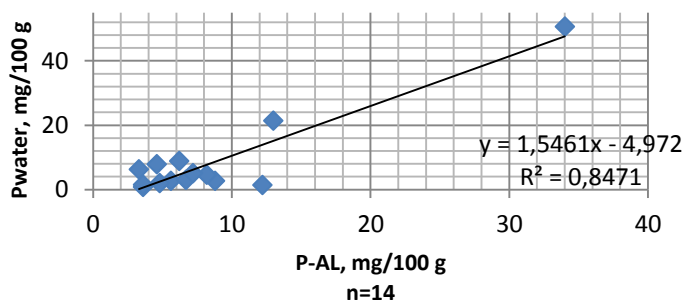
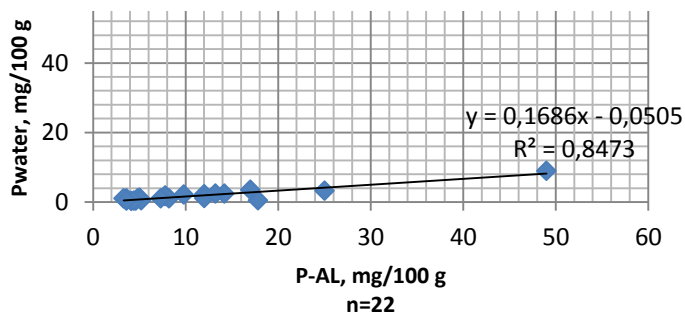
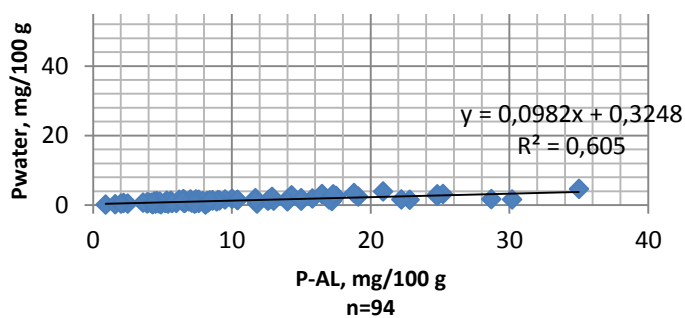
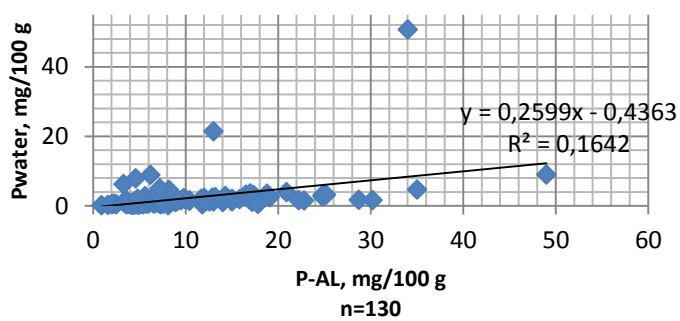
De jordar som har hög halt vattenlöslig fosfor har i flera fall också hög kolhalt. Det finns alltså en positiv korrelation mellan koncentrationen vattenlöslig fosfor och markens kolhalt, vilket framgår av figur 1. Då man studerar mineraljordarna med låg kolhalt, 0-3 % är fosforkoncentrationen låg och det finns inget samband med kolhalten. Arkivjordarna med 3-6 % kol har bara marginellt högre halt vattenlöslig fosfor än de med 0-3 % kol, och det finns ingen korrelationen med kolhalten. För jordarna med över 6 % kolinnehåll syns däremot ett starkare samband mellan fosforkoncentrationen och kolhalten med ett r^2 -värde på 0,19.

I arbetet har det också undersökts om det finns någon korrelation mellan halten vattenlöslig fosfor och halten P-AL. Figur 2 visar att det finns ett samband mellan arkivjordarnas innehåll av vattenlöslig fosfor och P-AL. Liknande samband har även observerats av Parvage *et al.*

(2011). Då jordarna med 0-3 % kol studeras framgår det att korrelationen mellan vattenlöslig fosfor och P-AL är hög eftersom P-AL till 60 % förklarar jordarnas innehåll av vattenlöslig fosfor. Korrelationen är ännu starkare när kolhalten i jordarna ökar, då r^2 -värdet för jordarna med 3-6 % kol och >6 % kol uppgår till 0,84.



Figur 1. Koncentrationen av vattenlöslig fosfor för alla arkivjordar samt för respektive kolhaltsgrupp (0-3 %, 3-6 % och >6 %).

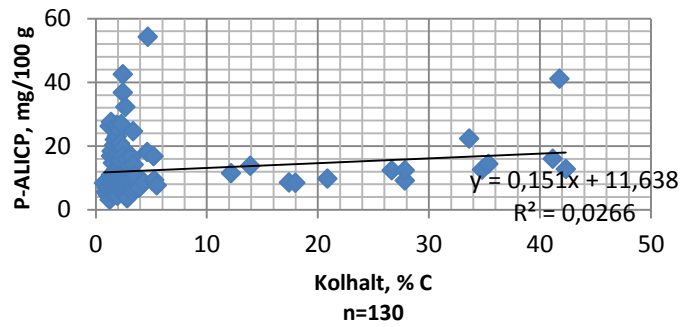
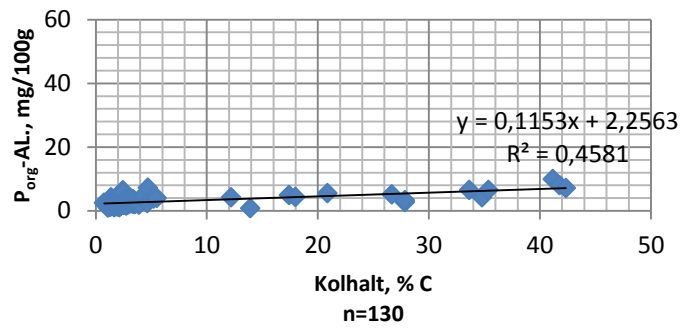
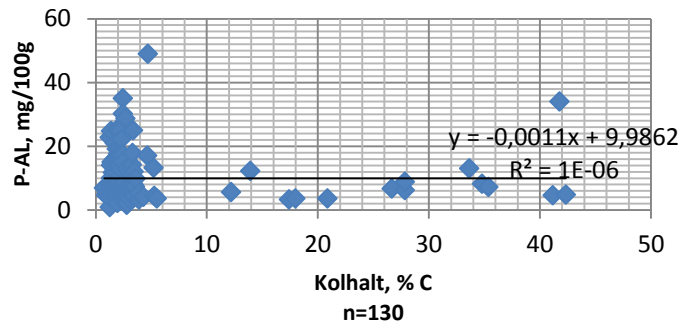


Figur 2. Förhållande mellan arkivjordarnas innehåll av vattenlöslig fosfor och utbytbar fosfor för alla arkivjordar samt för respektive kolhaltsgrupp (0-3 %, 3-6 % och >6 %).

5.2 Utbytbar fosfor

Halterna utbytbar fosfor mätt med kolorimetriskt metod är i nivå med vad som har uppmätts i andra studier, vilket bland annat framgår av studien av Parvage *et al.* (2011). Där har ett samband observerats mellan halten utbytbar fosfor och kolhalt, något som inte har konstaterats i den här studien (figur 3). Alla koncentrationer av utbytbar fosfor hittas i Appendix 1, tabell 3 och 4. Då AL-extraktet analyserats med ICP har den totala fosforkoncentrationen mätts ($P-AL_{ICP}$). Halten $P-AL_{ICP}$ ökar med kolhalten men det finns ingen korrelation mellan de båda variablerna (figur 3). Skillnaden mellan halten fosfor analyserad med ICP och den kolorimetriska metoden ger halten organisk utbytbar fosfor. Tabell 1 visar hur stor andel av $P-AL_{ICP}$ som utgörs av organisk utbytbar fosfor. Jordarna med högre kolhalt har större andel organisk utbytbar fosfor. Då alla arkivjordar studeras framgår det att det finns ett relativt starkt samband mellan kolhalten och jordarnas innehåll av organisk utbytbar fosfor då r^2 -värdet ligger på 0,458 (figur 3).

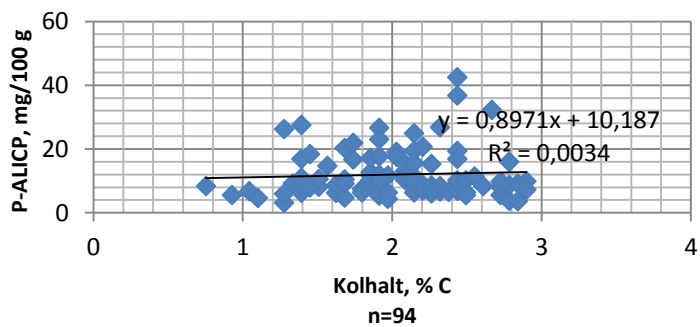
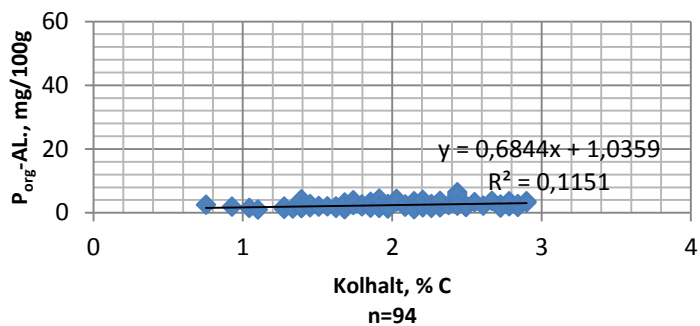
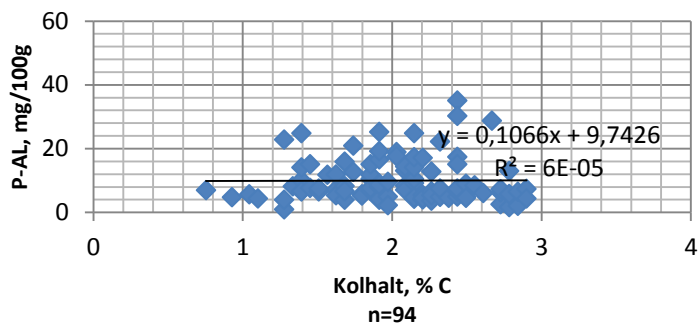
Mineraljordarna med 0-3 % kol levererar ungefär lika mycket utbytbar fosfor som jordarna med 3-6 % kol och inom gruppen med lägst kolhalt finns stor variation i fosforkoncentration (figur 4). Då halten $P-AL_{ICP}$ analyserats är korrelationen låg både för jordarna med 0-3 % kol och med 3-6 % kol även om halten fosfor ökar med kolhalten i den sistnämnda gruppen (figur 4 respektive 5). Koncentrationen organisk utbytbar fosfor visar däremot en korrelation med kolhalten då den förklaras till 11 % av kolhalten för gruppen med 0-3 % kol, och till nästan 30 % för gruppen med 3-6 % kol. De mycket kolrika jordarna med >6 % kol är den enda gruppen där koncentrationen $P-AL$ till viss del är korrelerad med kolhalten, då r^2 -värdet ligger på 0,137 (figur 6). Samma mönster kan ses då $P-AL_{ICP}$ studeras. Korrelationen med kolhalten uppgår till 28 % men värdet på halterna och spridningen bland halterna är fortfarande högre i gruppen med 0-3 % kol. Det kan dock ses ett starkt samband mellan halten organisk fosfor och kolhalt bland jordarna med >6 % kol. Då varje jordgrupp studeras för sig framgår det att när kolhalten i arkivjordarna blir högre ökar innehållet av halten utbytbar fosfor allt mer, vilket också kunde ses då alla jordar studerades samtidigt i figur 3.



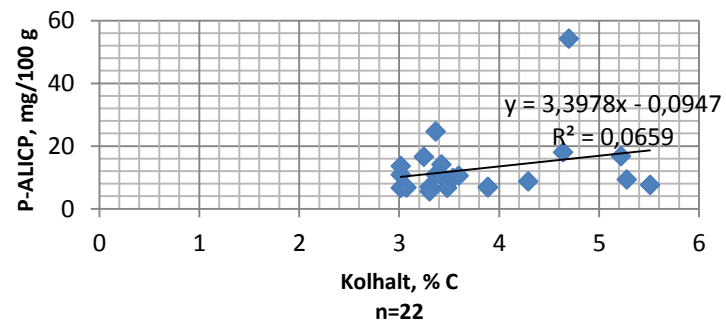
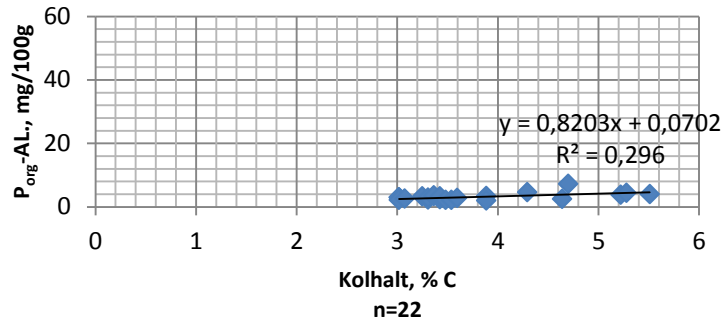
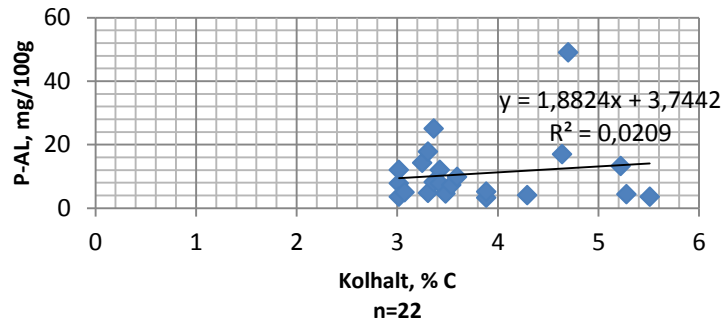
Figur 3. Koncentration av kolorimetrisk, organisk respektive ICP-analyserad utbytbar fosfor för alla arkivjordar

Tabell 1. Andelen utbytbar organisk fosfor av den totala utbytbara fosforhalten för respektive grupp jordar. Procenten är baserad på medelvärden.

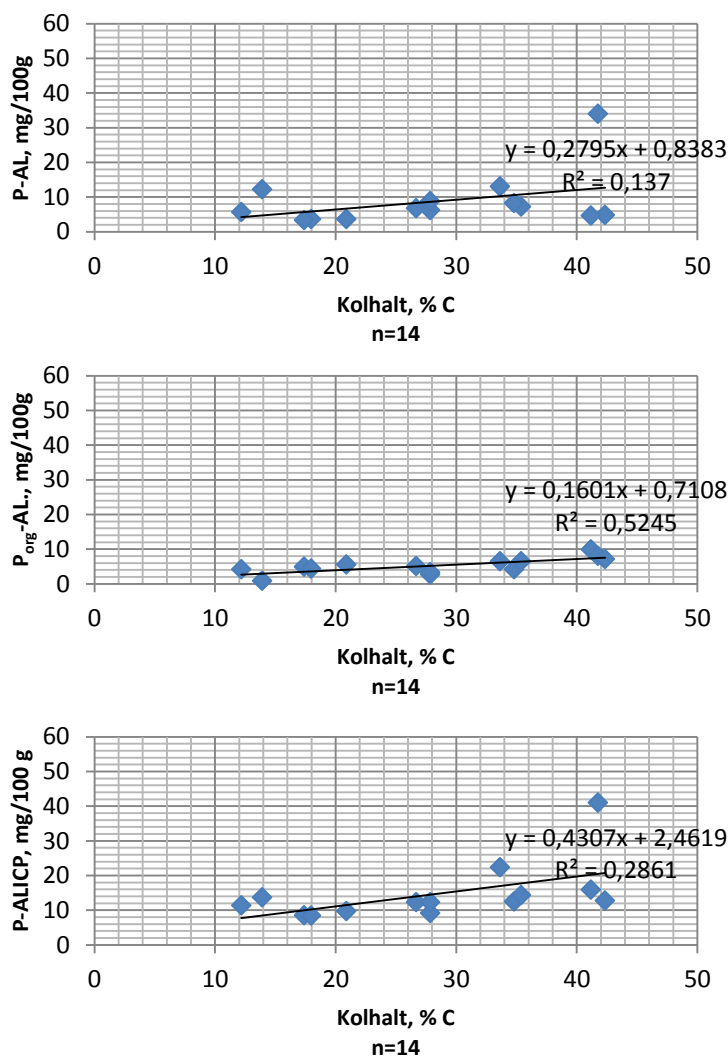
Kolhalt	\bar{x} , $P_{org-AL} / P-AL_{ICP}$
0-3 % C	24 %
3-6 % C	30,5 %
>6 % C	39,4 %



Figur 4. Koncentration av kolorimetrisk, organisk respektive ICP-analyserad utbytbar fosfor för jordarna med 0-3 % C.



Figur 5. Koncentration av kolorimetrisk, organisk respektive ICP-analyserad utbytbar fosfor för jordarna med 3-6 % C.



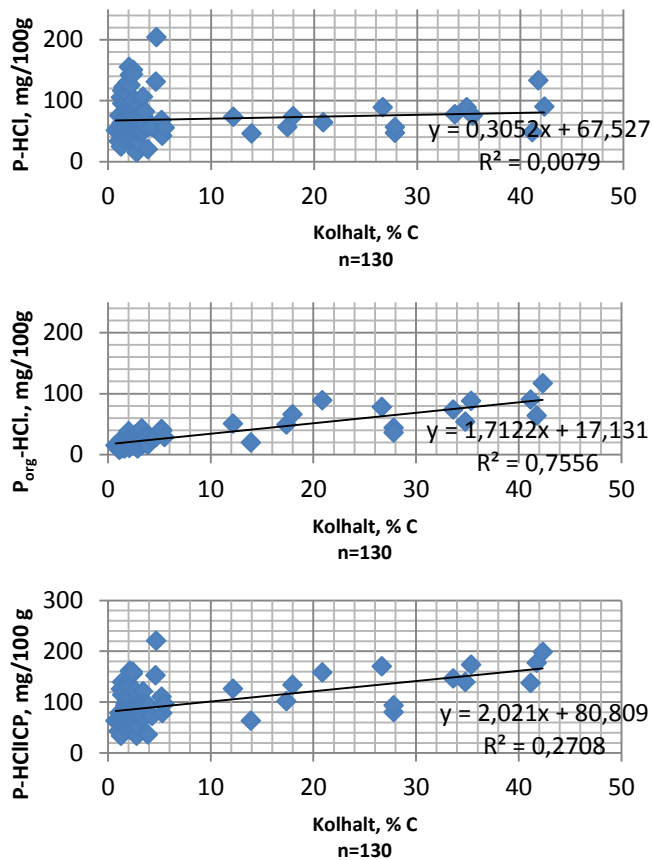
Figur 6. Koncentration av kolorimetrisk, organisk respektive ICP-analyserad utbytbar fosfor för jordarna med >6 % C.

5.3 Förrådsfosfor

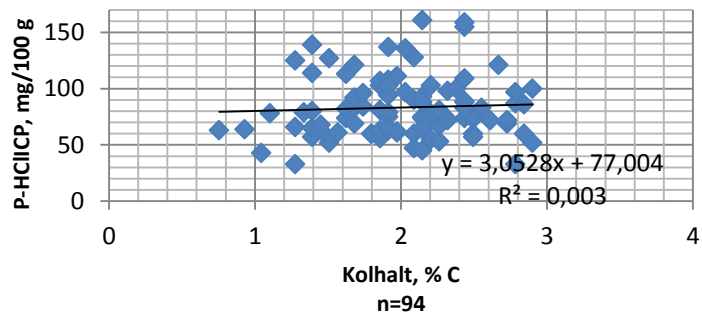
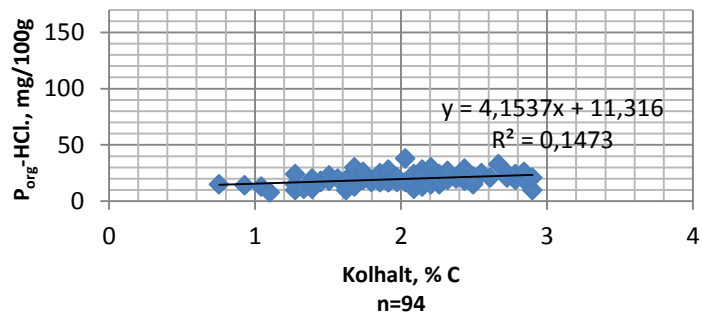
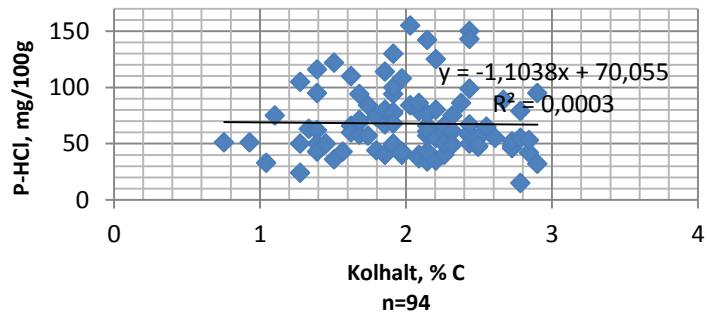
För oorganisk förrådsfosfor som är analyserad kolorimetriskt ökar fosforkoncentrationen något då kolhalten ökar och halterna varierar mellan nära 0 mg P/100 g jord och 200 mg P/100 g jord (figur 7). Dock finns ingen korrelation mellan variablerna. Den totala halten förrådsfosfor i HCl-extraktet, P-HCl_{ICP}, ökar också med kolhalten och där finns däremot ett relativt starkt samband då r^2 -värdet ligger på 0,27. För halten organisk förrådsfosfor syns en tydlig ökning och ett starkt

samband med kolhalten. Koncentrationerna av de olika fraktionerna förrådsfosfor återfinns i Appendix 1, tabell 3 och 4.

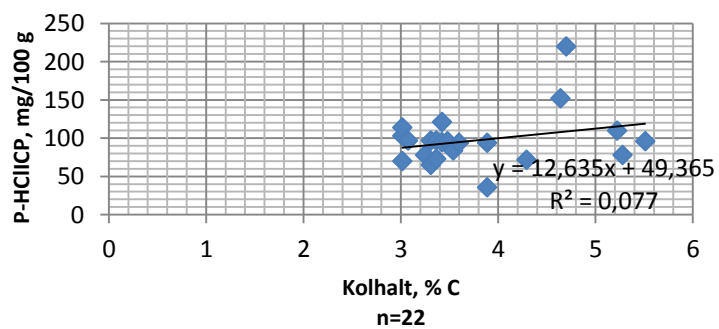
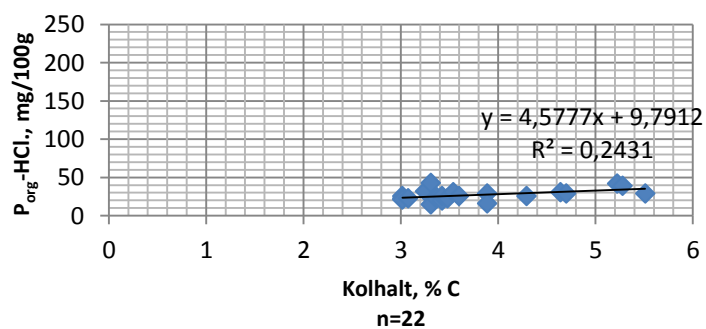
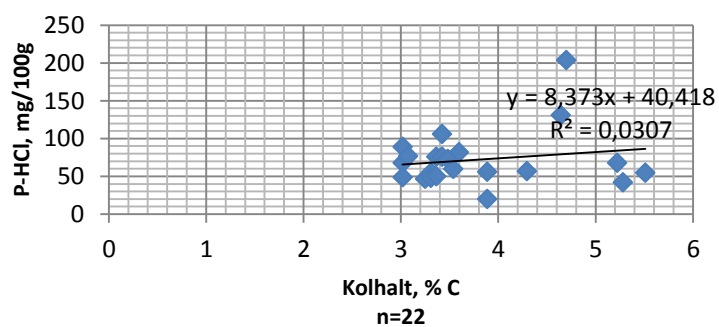
Den oorganiska förrådsfosfor i HCl-extraktet, P-HCl, visar stor spridning inom grupperna 0-3 % kol och 3-6 % kol och variablerna är inte korrelerade med varandra (figur 8 respektive figur 9). Värdena på P-HCl_{ICP} är inte heller korrelerade med kolhalten men däremot syns ett samband mellan halten organisk förrådsfosfor och kolhalt. Det sambandet blir starkare ju högre kolhalten är, vilket också syns då gruppen med kolhalt >6 % studeras (figur 10). För jordarna med >6 % kol finns ett samband mellan kolhalt och koncentrationen av P-HCl vilket inte funnits vid lägre kolhalter, och korrelationen mellan kolhalt och P-HCl_{ICP} är också stark.



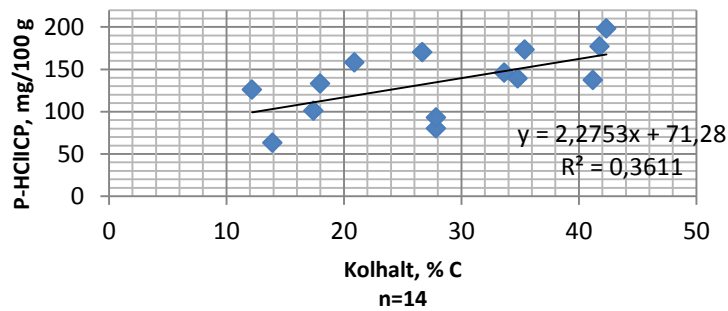
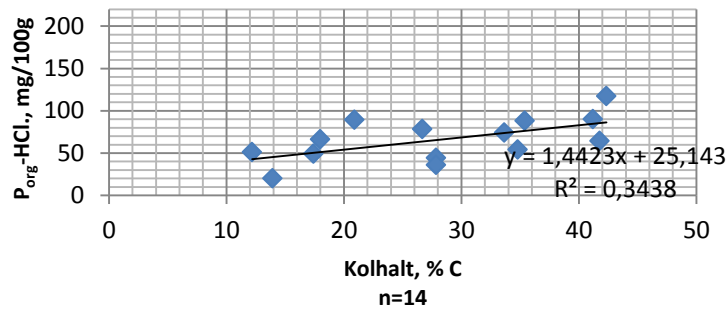
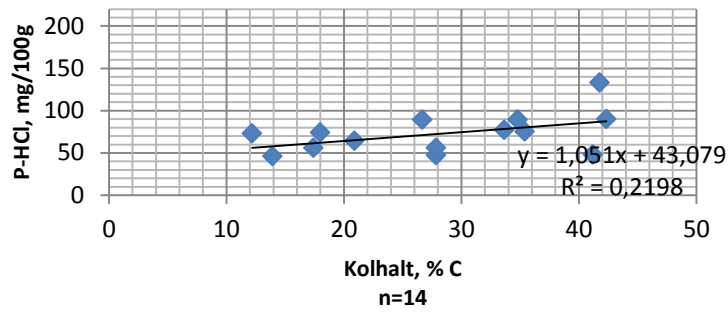
Figur 7. Koncentration av kolorimetrisk, organisk respektive ICP-analyserad förrådsfosfor för alla arkivjordar



Figur 8. Koncentration av kolorimetrisk, organisk respektive ICP-analyserad förrådsfosfor för jordarna med 0-3 % C.



Figur 9. Koncentration av kolorimetrisk, organisk respektive ICP-analyserad förrådsfosfor för jordarna med 3-6 % C.



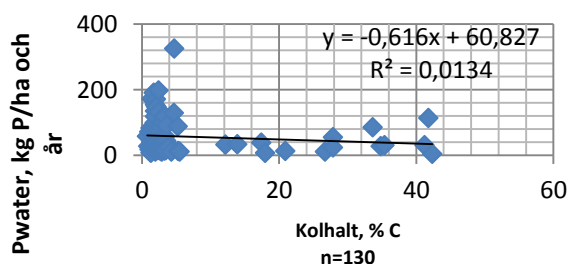
Figur 10. Koncentration av kolorimetrisk, organisk respektive ICP-analyserad förrädsfosfor för jordarna med >6 % C.

5.4 Mängd fosfor per hektar

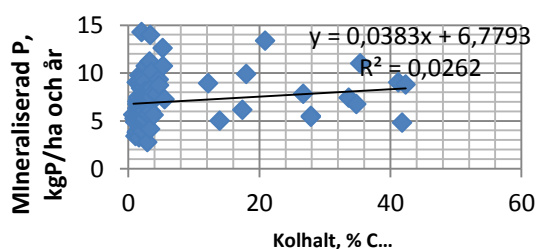
Mängden fosfor per hektar har beräknats för att kunna relatera jordarnas leverans av fosfor till grödorna. På så sätt kan risken för läckage uppskattas. De beräknade mängderna för varje jord hittas i Appendix 1, tabell 4.

Mängden vattenlöslig fosfor per hektar är höga och uppgår till flera tiotals, i många fall hundratals, kilo per hektar och år (figur 11). Dock finns inget samband med kolhalten vilket framgår av de mycket låga r^2 -värdena. Mängderna fosfor som levereras är lägre ju högre kolhalten är, till skillnad från då koncentrationen av vattenlöslig fosfor studeras (se figur 1).

I genomsnitt kan det tänkas att mineraliseringen av markens totala fosforinnehåll uppgår till 1-2 % per år. För att få reda på hur mycket fosfor arkivjordarna kan leverera har mängden organisk förrådsfosfor per hektar och år räknats fram utifrån P_{org} -HCl (tabell 3 och 4), och därefter har en mineralisering på 1 % av mängden organisk förrådsfosfor korrelerats med jordarnas kolhalt. Av figur 12 framgår att arkivjordarna levererar mellan 3-15 kg fosfor per hektar och år. Mineraliseringen ökar något då kolhalten ökar men den mineraliserade mängden förklaras inte av kolhalten. De största mängderna mineraliseras i jordar med låg kolhalt. Där hittas dock även den minsta mängden mineraliserad fosfor, vilket antyder att spridningen i fosformineralisering bland jordarna med låg kolhalt är större än ökningen som observeras för kolrika jordar.



Figur 11. Mängd vattenlöslig fosfor i relation till kolhalt. Baserad på kolorimetriskt analyserad vattenlöslig fosfor.



Figur 12. Mängd mineraliserad fosfor i relation till kolhalt. Baserad på 1 % mineralisering av mängden organisk förrådsfosfor.

6 Diskussion

För arbetet i helhet kan det sägas att skillnaderna i fosforinnehåll mellan jordarna med 0-3 % C och 3-6 % C generellt var små. De största skillnaderna kunde observeras mellan mineraljordarna (0-3 respektive 3-6 % C) och de mycket kolrika jordarna (>6 % C). En del av förklaringen kan vara att i mineraljordarna med 0-6 % C varierar kolhalten mellan 0,75 % - 5,5 % kol medan kolhalten i gruppen >6 % C sträcker sig från 12,2 % - 42,3 % kol. Det är alltså en klar skillnad i hur mycket kol som dominerar jordarna, vilket också ger tydliga skillnader i flera av resultaten.

Bland de mycket kolrika jordarna finns det särskilt en jord som ofta utmärker sig väldigt mycket i fosforkoncentration jämfört med de andra jordarna (kolhalt 41,76 %). Eftersom arbetet endast består av att sammanställa tidigare framtagna laborationsresultat är det svårt att säga vad ett sådant avvikande värde kan bero på. Det går inte att utesluta att provet har felhanterats på något sätt. Till exempel kan jorden med avvikande värde ha fått torka länge varpå mineralisering kan ha skett under tiden jorden befunnit sig i labbet. Det skulle kunna öka exempelvis koncentrationen vattenlöslig fosfor i provet.

Då resultaten från jordarna med >6 % kol studeras är det viktigt att komma ihåg att gruppen bara innehåller 14 jordar. För att analysera korrelationer med enkel linjär regression antar man att stickprovet är normalfördelat, och det är tveksamt om ett stickprov på endast 14 prov kan anses vara normalfördelat. Därför bör resultaten från denna grupp tolkas med försiktighet. För framtida studier hade det varit fördelaktigt att ta fler jordprover för att få större stickprov.

Den korrelation som finns mellan vattenlöslig fosfor och jordarnas kolhalt (figur 1) verkar till stor del bero på den höga koncentrationen

vattenlöslig fosfor som finns i jordarna med kolhalt >6 %, vilket kan ses då de olika grupperna studeras var för sig. Det är först för dessa mycket kolrika jordarna som det finns ett samband mellan kolhalten och fosforinnehållet. Studien av Parvage *et al.* (2011) visar att det finns ett samband mellan koncentrationen vattenlöslig fosfor och kolhalt även om kolhalterna inte uppgår till 40 %. Den högre halten vattenlöslig fosfor som observerats i kolrika jordar verkar logisk eftersom det där kan ske större mineralisering på grund av att de jordarna innehåller mer organiskt material. I den här studien har inte halten organisk vattenlöslig fosfor kunnat studeras eftersom det inte funnits analysdata på detta. I ett fortsatt arbete är det något som hade varit intressant att studera.

Enligt Pöthig *et al.* (2010) är risken för fosforläckage till vattendrag stor för jordar med över 0,5 mg vattenlöslig fosfor per 100 g jord. Figur 1 visar att de flesta av arkivjordarna har en fosforhalt som överstiger detta värde och därför kan klassas som högriskabla jordar vad gäller fosforläckage. Däremot finns det flera faktorer som påverkar det faktiska läckaget, som jordarnas fosformättnadsgrad och dess adsorptionsförmåga.

Det finns ett starkt samband mellan halten vattenlöslig fosfor och P-AL, vilket är logiskt eftersom om det finns mer utbytbar fosfor på markpartiklarna borde även mer fosfor kunna levereras till vattenfasen. Genom att mäta P-AL-värdet för en jord verkar man alltså kunna göra en realistisk uppskattning av hur mycket vattenlöslig fosfor jorden leverar.

Det finns ingen korrelation mellan kolhalten och P-AL då alla jordar studeras, åtminstone inte vid kolorimetrisk analys. Halterna är lika höga eller högre inom jordarna med 0-3 % kol som för jordarna med >6 % kol. Samma trend ses vid P-HCl. Då P-AL och P-HCl analyserade med ICP korreleras med kolhalten framgår det att halten utbytbar fosfor respektive förrådsfosfor istället ökar med kolhalten. För P-HCl är korrelationen mellan fosforkoncentration och kolhalt relativt stark men för P-AL finns dock ingen korrelation varför kolhalten inte är den direkta förklaringen till ökningen av koncentrationen fosfor. Att det trots allt blir olika mönster beroende på vilken analysmetod som används kan tyda på att kolorimetrisk analys inte ger en verklig bild av jordarnas fosforkoncentration. Parvage *et al.* (2011) har sett en stark korrelation mellan P-AL och kolhalten i sin studie. Där ingår dock inga jordar med mycket hög kolhalt, vilket ytterligare stärker uppfattningen om att AL-

och HCl-extraktion med kolorimetrisk analys fungerar bra för mineraljordar men inte är lika representativ för jordar med mycket hög kolhalt. Eftersom den kolorimetriska analysmetoden endast detekterar den reaktiva fosfor i provet missar den huvuddelen av den organiska fosfor. Organogena jordar byggs till stor del upp av organiskt material och har större innehåll av organisk fosfor både i utbytbar form och förrådsform, vilket också har visats i den här studien (figur 3 och 7 samt tabell 1). Den organiska fosforfraktionen domineras dock ofta av inositolfosfat vilken anses relativt motståndskraftig mot mineralisering. Det är därför viktigt att betänka att inte all organisk fosfor mineraliseras och blir växttillgänglig. För att få en bättre uppfattning om de totala mängderna som mineraliseras hade det varit intressant att analysera de olika fraktionerna av total organisk fosfor. Det är ändå möjligt att det kan finnas mer växttillgänglig fosfor i de kolrika jordarna än vad den kolorimetriska analysmetoden detekterar. Det kan därför ifrågasättas om AL- och HCl-extraktion med kolorimetrisk analys egentligen ger en verklig bild av fosforkoncentrationen för jordar med hög kolhalt. Kanske borde analysen av AL- och HCl-extraktet göras med hjälp av ICP för sådana jordar, eller är det möjligt att använda andra analysmetoder såsom separation genom kromatografi eller elektrofores vilket McKelvie (2005) diskuterar.

Det finns ingen korrelation mellan P-HCl och kolhalt för mineraljordarna, däremot är korrelationen stark för de mycket kolrika jordarna. Det beror troligtvis på att sådana jordar domineras av organiskt material, vilket löses upp av HCl så att organisk fosfor frigörs. Det är dock tänkbart att organisk fosfor som extraherats med HCl inte automatiskt bryts ner totalt till ortofosfat. Den kan vara kvar i organiskt bunden form vilket skulle kunna förklara varför det för jordarna med >6 % kol är så stor skillnad mellan $P-HCl_{ICP}$ och P-HCl mätt med kolorimetrisk analys (figur 7).

Då fosforkoncentrationerna räknas om till mängder är innehållet av vattenlöslig fosfor inte längre störst i jordarna med högst kolhalt. Istället minskar mängden ju högre kolhalten blir. Det beror troligen på att de mycket kolrika jordarna har mycket låg skrymdensitet, i genomsnitt $0,5 \text{ g/cm}^3$ jämfört mot mineraljordarnas medelvärde på $1,3 \text{ g/cm}^3$. Det omvända förhållandet visar att det är viktigt att även studera mängd fosfor som levereras från jordar och inte bara fokusera på

koncentrationer. Det är trots allt mängder som tas upp av grödorna och som kan läcka ut till vattendrag.

Mängden vattenlöslig fosfor som levereras av jordarna är mycket hög, för mineraljordarna rör det sig i flera fall om mellan 100-200 kg P/ha och år. Det kan relateras till att en gröda i genomsnitt behöver omkring 15-25 kg P/ha och år (Jordbruksverket, 2012). Även flera av de mycket kolrika jordarna levererar mer fosfor än vad en gröda kan ta upp. De stora mängderna vattenlöslig fosfor tyder på att frigörandet av fosfor från markpartiklarna inte borde vara den begränsande faktorn för en grödas fosforupptag. Det skulle kunna vara så att det finns andra faktorer som påverkar uppkomsten av fosforbrist hos en planta i större utsträckning än den tillgängliga mängden. Det är till exempel tänkbart att rötternas förmåga att nå fram till den vattenlösliga fosfor kan vara en begränsande faktor. Det borde då vara viktigt för en planta att få en god etablering och utveckla ett stort rotsystem. Plantans fosforupptag skulle också kunna påverkas av förhållanden då den vattenlösliga fosfor blir otillgänglig för rötterna, som till exempel om vattnet binds så hårt till markpartiklar att rötterna inte förmår ta upp det.

Att mineraliseringen av fosfor ökar när kolhalten ökar verkar logiskt eftersom det då finns mer material som kan mineraliseras. Dock levererar mineraljordarna de största mängderna mineraliserad fosfor, trots att halterna är högre bland de mycket kolrika jordarna. Det kan troligtvis återigen härledas till den låga skrymdensiteten bland jordarna med hög kolhalt. Den låga korrelationen mellan mängd mineraliserad fosfor och kolhalt visar att kolhalten inte är den faktorn som direkt påverkar hur mycket som mineraliseras. Det är troligt att faktorer som mängden och typen av mikroorganismer samt olika parametrar som påverkar deras aktivitet har stor betydelse för mineraliseringen.

Den här studien har inte undersökt själva läckaget av fosfor från jordarna varför slutsatser endast kan dras om risken för läckage. För att kunna göra uppskattningar om det verkliga läckaget hade exempelvis jordarnas förmåga att adsorbera fosfor och fosformättnadsgraden behövt studeras. Arbetet har baserats på kolhalt och fosforhalter i matjorden, varför alvens betydelse för läckagerisk och för jordarnas fosforlevererande förmåga inte kan kommenteras. De stora mängderna vattenlöslig fosfor indikerar ändå att risken för fosforläckage kan vara stor från de undersökta jordarna. Eftersom mängderna är så pass stora

bland mineraljordarna är det tänkbart att det där är störst risk för läckage, vilket är allvarligt eftersom mineraljordar utgör den största delen av Sveriges odlade åkermark. Det tyder på att kolrika jordar kanske trots allt inte är en stor källa för fosforläckage, åtminstone inte jämfört med mineraljordar. Dock innehåller mineraljordarna mer ortofosfat än de kolrika jordarna, vilken ofta är relativt svårörlig i marken. Organisk fosfor består till stor del av inositolfosfat som också är svårörlig, men även av sockerfosfat och fosfodiesterar vilka är mycket mer lättörliga former. Det är därför tänkbart att en del av den organiska fosfor lättare transporteras till vattendrag och på så vis i större utsträckning bidrar till övergödning. De lättörliga formerna har dock också lättare att mineraliseras och omvandlas till svårörlig ortofosfat. En viktig faktor är alltså var själva mineraliseringen sker. Det är även viktigt att veta vilka fosforfraktioner den vattenlösliga fosfor består av för att kunna avgöra hur mycket av den fosfor som är direkt växttillgänglig. Det är svårt att förutspå för vilka jordar risken för läckage är störst eftersom det handlar om mycket komplexa system och fler studier skulle behövas för att kunna dra säkra slutsatser.

7 Slutsats

De största skillnaderna i fosforhalt och mängd finns mellan jordarna med 0-6 % kol och >6 % kol, troligtvis eftersom det organiska materialet då karakteriserar jordarna allt mer.

Arkivjordarna med hög kolhalt verkar leverera mer vattenlöslig fosfor. Baserat på koncentrationen vattenlösligfosfor kan de flesta av arkivjordarna klassificeras som jordar med hög risk för fosforläckage. Dock saknas analysvärden på hur mycket av denna fraktion som är organisk och oorganisk fosfor, varför det inte går att säga hur mycket som av fosfor som faktiskt är reaktiv eller direkt kan tas upp av växter. Halten vattenlöslig fosfor är korrelerad med P-AL vilket tyder på att man med hjälp av jordens P-AL-värde även kan uppskatta halten vattenlöslig fosfor.

P-AL och P-HCl ökar inte med kolhalten om kolorimetrisk analys används. Däremot syns en ökning när halterna analyseras med ICP. Det förklaras av att ICP analyserar både den organiska och oorganiska fosforhalten medan den kolorimetriska metoden endast analyserar halten oorganisk fosfor. Jordarna med mycket hög kolhalt innehåller högre halt organisk utbytbar fosfor som kan mineraliseras. Resultatet tyder på att den kolorimetriska metoden inte är lämplig för organogena jordar eftersom den inte ger en verklig bild av mängden fosfor som är eller lätt kan bli växttillgänglig.

Mineralisering i arkivjordarna frigör mellan 3-15 kg P/ha och år och i vattenfasen finns i vissa fall upp emot 200 kg P/ha och år. Det kan jämföras med en grödas behov på 15-25 kg P/ha och år. Detta tyder på att tillgången på växttillgänglig fosfor i marken inte är en begränsande faktor för grödan.

Trots att de mycket kolrika arkivjordarna har högst koncentration vattenlöslig fosfor levererar mineraljordarna en större mängd. Det skulle kunna innebära att mineraljordarna utgör en större källa för fosforläckage. Det finns dock många faktorer som påverkar hur stort det faktiska läckaget blir varför det är svårt att bedöma i vilken typ av jordar risken för läckage är störst.

8 Tackord

Jag vill tacka min handledare Holger Kirchmann som har bidragit med mycket kunskap och goda råd under arbetets gång. Jag vill också tacka min mamma och mina vänner för korrekturläsning, konstruktiva diskussioner och moraliskt stöd.

9 Referenser

- Baldwin, D. S., Howitt, J. A. & Beattie, J. K., 2005. Abiotic Degradation of Organic Phosphorus Compounds in the Environment. i: B. L. Turner, E. Frossard & D. S. Baldwin, red. *Organic Phosphorus in the Environment*. Oxfordshire: CABI Publishing, pp. 75-88.
- Berglund, K., 2008. Torvmarken, en resurs i jordbruket igår, idag och även imorgon?. i: L. Runefelt, red. *Svensk mosskultur*. Stockholm: Kungl. Skogs- och Lantbruksakademin, pp. 483-498.
- Bergström, L. o.a., 2007. *Fosfor från Jordbruksmark till Vatten - tillstånd, flöden och motåtgärder i ett nordiskt perspektiv*, Uppsala: SLU.
- Celi, L. & Barberis, E., 2005. Abiotic Stabilization of Organic Phosphorus in the Environment. i: B. L. Turner, E. Frossard & D. S. Baldwin, red. *Organic Phosphorus in the Environment*. Oxfordshire: CABI International, pp. 113-132.
- Chang, R., 2010. *Chemistry*. 10:e red. New York: McGraw-Hill Companies.
- Djodjic, F., Börling, K. & Bergström, L., 2004. Phosphorus Leaching in Relation to Soil Type and Soil Phosphorus Content. *Journal of Environmental Quality*, 33(2), pp. 678-684.
- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M., 2011. *Marklära*. Lund: Studentlitteratur.
- Fogelfors, H. (., 2001. *Växtproduktion i jordbruket*. Borås: Natur och Kultur.
- Jordbruksverket, 2012. *Riktlinjer för gödsling och kalkning*, u.o.: Jordbruksverket.
- KLS, 1965. *Kungliga Lantbruksstyrelsens kungörelse med (5) bestämmelser för undersökning av jord vid statens lantbrukskemiska kontrollanstalt och lantbrukskemisk kontrollstation och lantbrukskemisk station med av staten fastställda stadgar*, u.o.: Kungliga Lantbruksstyrelsens Kungörelser m.m., Nr 1.
- LECO Corporation, 2007. *Carbon and Sulfur Determination - LECO Induction Furnace Instruments*. [Online]
Available at: <http://www.leco.com>
[Använd 15 Maj 2012].
- McKelvie, I. D., 2005. Separation, Preconcentration and Speciation of Organic Phosphorus in Environmental Samples. In: B. L. Turner, E. Frossard & D. S. Baldwin, eds. *Organic Phosphorus in the Environment*. Oxfordshire: CABI Publishing, pp. 1-74.

- Morlegghem, C. v. o.a., 2011. Effect of Organic P Forms and P Present in Inorganic Colloids on the Determination of Dissolved P in Environmental Samples by the Diffusive Gradient in Thin Films Technique, Ion Chromatography, and Colorimetry. *Analytical Chemistry*, 83(13), pp. 5317-5323.
- Oberson, A. & Joner, E. J., 2005. Microbial Turnover of Phosphorus in Soil. i: B. L. Turner, E. Frossard & D. S. Baldwin, red. *Organic Phosphorus in the Environment*. Oxfordshire: CABI Publishing, pp. 133-164.
- Olsson, U., Englund, J.-E. & Engstrand, U., 2005. *Biometri, Grundläggande biologisk statistik*. Lund: Studentlitteratur.
- Ottabong, E., Börling, K., Kätterer, T. & Mattsson, L., 2009. Compability of the ammonium lactate (AL) and sodium carbonate (Olsen) methods for determining available phosphorus in Swedish soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 59(4), pp. 373-378.
- Paauw, F. v. d., 1971. An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus. *Plant and Soil*, 34(2), pp. 467-481.
- Parvage, M. M., Kirchmann, H., Kynkäänniemi, P. & Ulén, B., 2011. Impact of horse grazing and feeding on phosphorus concentrations in soil and drainage water. *Soil Use and Management*, 27(3), pp. 367-375.
- Pöthig, R., Behrendt, H., Optiz, D. & Furrer, G., 2010. A universal method to assess the potential of phosphorus loss from soil to aquatic ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(2), pp. 497-504.
- Quiquampoix, H. & Mousain, D., 2005. Enzymatic Hydrolysis of Organic Phosphorus. i: B. L. Turner, E. Frossard & D. S. Baldwin, red. *Organic Phosphorus in the Environment*. Oxfordshire: CABI Publishing, pp. 89-112.
- Seeling, B. & Zasoski, R. J., 1993. Microbial effects in maintaining organic and inorganic solution phosphorus concentrations in a grassland topsoil. *Plant and Soil*, 148(2), pp. 277-284.
- Sengupta, D. & Jammalamadaka, S. R., 2003. *Linear Models: An Integrated Approach*. Singapore: World Scientific Publishing Co..
- SNV, 1997. *Förluster av fosfor från jordbruksmark, SNV Rapport 4731*, Stockholm: Naturvårdsverket.
- SNV, 1997. *Tillståndet i svensk åkermark och gröda, SNV Rapport 4778*, Stockholm: Naturvårdsverket.
- SNV, 1999. *Åkermarkens matjordstyper, SNV Rapport 4955*, Stockholm: Naturvårdsverket.
- SNV, 2000. *Tillståndet i svensk åkermark och spannmål, SNV Rapport 5062*, Stockholm: Naturvårdsverket.
- SNV, 2005. *Fosforförluster från mark till vatten, SNV Rapport 5507*, Stockholm: Naturvårdsverket.
- Steen, I., 1998. Phosphorus availability in the 21st century - Management of a non-renewable resource. *Phosphorus & Potassium*, Issue 217, pp. 25-31.
- Sveriges regering, 2009. *Regeringens proposition 2009/10:155, Svenska miljömål - för ett effektivare miljöarbete*, Stockholm: Sveriges regering.
- Tisdale, S. L. & Nelson, W. L., 1975. *Soil fertility and fertilizers*. 3d ed. New York: Macmillan Publishin Co., Inc.

Turner, B. L., 2005. Organic Phosphorus Transfer from Terrestrial to Aquatic Environments. i: B. L. Turner, E. Frossard & D. S. Baldwin, red. *Organic Phosphorus in the Environment*. Oxfordshire: CABI Publishing, pp. 269-294.

10 Appendix 1

Tabell 2. Analysdata samt beräknad inverterad skrymdensitet

Mullhalt, %	C-halt, %	Skrymdensitet, g*cm ⁻³	Beräknad 1/skrymdensitet, cm ³ *g ⁻¹	Pwater, mg*100ml ⁻¹
1,3	0,754	1,5	0,667	2,34
1,6	0,928	1,5	0,667	1,14
1,8	1,044	1,5	0,667	2,88
1,9	1,102	1,7	0,588	0,72
2,2	1,276	1,5	0,667	0,36
2,2	1,276	1,4	0,714	0,96
2,2	1,276	1,5	0,667	3,36
2,3	1,334	1,4	0,714	0,36
2,4	1,392	1,3	0,769	3
2,4	1,392	1,5	0,667	6,9
2,4	1,392	1,4	0,714	1,56
2,4	1,392	1,4	0,714	1,14
2,4	1,392	1,4	0,714	3,24
2,5	1,45	1,6	0,625	1,56
2,5	1,45	1,4	0,714	2,46
2,6	1,508	1,3	0,769	1,8
2,6	1,508	1,4	0,714	3,24
2,7	1,566	1,3	0,769	3,42
2,8	1,624	1,2	0,833	1,08
2,8	1,624	1,2	0,833	1,8
2,8	1,624	1,3	0,769	0,66
2,9	1,682	1,3	0,769	1,98

2,9	1,682	1,3	0,769	0,96
2,9	1,682	1,4	0,714	2,7
2,9	1,682	1,3	0,769	3,18
3	1,74	1,4	0,714	7,62
3	1,74	1,4	0,714	2,52
3,1	1,798	1,5	0,667	1,8
3,1	1,798	1,4	0,714	1,14
3,2	1,856	1,3	0,769	2,46
3,2	1,856	1,3	0,769	1,8
3,2	1,856	1,3	0,769	2,58
3,2	1,856	1,4	0,714	2,76
3,2	1,856	1,4	0,714	3,96
3,3	1,914	1,3	0,769	5,4
3,3	1,914	1,4	0,714	2,7
3,3	1,914	1,4	0,714	2,22
3,3	1,914	1,3	0,769	1,32
3,3	1,914	1,4	0,714	6,18
3,3	1,914	1,3	0,769	2,46
3,3	1,914	1,4	0,714	4,74
3,3	1,914	1,4	0,714	1,14
3,3	1,914	1,3	0,769	2,34
3,4	1,972	1,3	0,769	0,48
3,4	1,972	1,3	0,769	2,76
3,4	1,972	1,3	0,769	1,09
3,5	2,03	1,4	0,714	6,84
3,5	2,03	1,5	0,667	6
3,6	2,088	1,5	0,667	2,88
3,6	2,088	1,4	0,714	1,56
3,6	2,088	1,1	0,909	3,42
3,6	2,088	1,3	0,769	2,76
3,7	2,146	1,3	0,769	2,22
3,7	2,146	1,4	0,714	1,14
3,7	2,146	1,5	0,667	5,88
3,7	2,146	1,2	0,833	2,22
3,7	2,146	1,4	0,714	2,1
3,7	2,146	1,5	0,667	2,64
3,7	2,146	1,3	0,769	2,04

3,8	2,204	1,3	0,769	1,26
3,8	2,204	1,3	0,769	0,66
3,8	2,204	1,3	0,769	1,86
3,8	2,204	1,3	0,769	2,7
3,9	2,262	1,3	0,769	2,34
3,9	2,262	1,1	0,909	0,84
3,9	2,262	1,3	0,769	2,7
3,9	2,262	1,2	0,833	1,08
4	2,32	1,1	0,909	0,66
4	2,32	1,4	0,714	1,44
4	2,32	1,4	0,714	3,18
4,1	2,378	1,3	0,769	1,26
4,2	2,436	1,3	0,769	7,92
4,2	2,436	1,3	0,769	1,08
4,2	2,436	1,1	0,909	2,1
4,2	2,436	1,3	0,769	5,28
4,2	2,436	1,4	0,714	1,2
4,2	2,436	1,3	0,769	2,76
4,2	2,436	1,3	0,769	2,7
4,3	2,494	1,1	0,909	1,14
4,3	2,494	1,3	0,769	1,8
4,3	2,494	1,3	0,769	0,66
4,4	2,552	1,3	0,769	2,34
4,5	2,61	1,3	0,769	1,08
4,6	2,668	1,3	0,769	2,88
4,7	2,726	1,1	0,909	0,54
4,7	2,726	1,2	0,833	2,22
4,7	2,726	1,5	0,667	2,22
4,8	2,784	1,2	0,833	3,42
4,8	2,784	1,4	0,714	0,54
4,8	2,784	1,3	0,769	1,08
4,9	2,842	1,2	0,833	0,66
4,9	2,842	1,2	0,833	1,8
5	2,9	1,1	0,909	0,48
5	2,9	1,3	0,769	0,84
5,2	3,016	1,2	0,833	2,46
5,2	3,016	1,3	0,769	3,9

5,2	3,016	1,1	0,909	1,26
5,3	3,074	1,3	0,769	2,1
5,6	3,248	1,4	0,714	4,86
5,7	3,306	1,3	0,769	1,8
5,7	3,306	1,1	0,909	0,6
5,8	3,364	1,1	0,909	1,26
5,8	3,364	1,2	0,833	4,74
5,9	3,422	1,2	0,833	1,68
5,9	3,422	1,1	0,909	2,34
6	3,48	1,3	0,769	0,66
6,1	3,538	1,3	0,769	1,8
6,2	3,596	1,3	0,769	3,66
6,7	3,886	1,1	0,909	1,32
6,7	3,886	1,4	0,714	0,96
7,4	4,292	1,2	0,833	0,48
8	4,64	1,2	0,833	5,16
8,1	4,698	1,2	0,833	13
9	5,22	1,2	0,833	3,54
9,1	5,278	1,1	0,909	0,54
9,5	5,51	1	1,000	0,48
21	12,18	0,7	1,429	1,32
24	13,92	1	1,000	1,38
30	17,4	0,5	2,000	1,56
31	17,98	0,6	1,667	0,3
36	20,88	0,6	1,667	0,54
46	26,68	0,4	2,500	0,48
48	27,84	0,5	2,000	2,22
48	27,84	0,6	1,667	0,96
58	33,64	0,4	2,500	3,42
60	34,8	0,5	2,000	1,14
61	35,38	0,5	2,000	1,26
71	41,18	0,4	2,500	1,26
72	41,76	0,3	3,333	4,56
73	42,34	0,3	3,333	0,18

Tabell 3. Analysdata samt beräknad P_{water}

Beräknad P _{water} , mg*100g ⁻¹ jord	P-AL, mg*100g ⁻¹	Organisk P-AL, mg*100g ⁻¹	P-HCl, mg*100g ⁻¹	Organisk P-HCl, mg*100g ⁻¹
1,560	6,9	2,5	51	15
0,760	4,7	1,9	51	14
1,920	5,6	1,5	33	13
0,424	4,3	1	75	8
0,240	0,9	1,2	24	10
0,686	3,9	1,8	50	15
2,240	22,8	1,9	105	24
0,257	8,1	1,3	63	11
2,308	10	2,3	62	16
4,600	24,8	4,2	116	18
1,114	6,5	1,5	95	20
0,814	6,6	1,5	50	11
2,314	14	1,8	43	18
0,975	7,6	1,7	50	18
1,757	15	2,7	50	17
1,385	6,5	1,9	122	23
2,314	7,4	2,1	36	18
2,631	11,7	2	43	20
0,900	7,1	1,9	66	18
1,500	5,3	1,9	60	19
0,508	11,8	1,5	110	10
1,523	8,2	1,7	69	18
0,738	3,9	1,1	58	13
1,929	6,6	1,6	71	19
2,446	15,8	3,2	94	30
5,443	20,9	3,9	84	19
1,800	12,6	2,4	57	26
1,200	5,6	2,6	74	18
0,814	5,2	2	44	17
1,892	10,4	1,6	67	21
1,385	6,7	1,7	114	20
1,985	7,6	1,7	40	17
1,971	11,7	3,4	80	25
2,829	15	2,3	41	17
4,154	25,2	2,4	130	17
1,929	8,6	2,8	50	28

1,586	7,9	1,8	47	18
1,015	3,9	1,7	49	20
4,414	16,5	2,6	94	17
1,892	9	2,8	77	18
3,386	19,1	4,4	100	20
0,814	4,2	2,2	78	24
1,800	8,6	1,5	68	17
0,369	4,9	1,3	108	17
2,123	9,5	2,7	40	21
0,838	2,2	1,6	43	21
4,886	18,8	4,3	84	17
4,000	17,5	3,5	155	38
1,920	13	1,9	40	11
1,114	8,3	2	79	17
3,109	14,3	2,2	86	18
2,123	7	2,6	37	24
1,708	9,1	1,7	66	15
0,814	4,2	3,6	76	28
3,920	24,8	2,8	142	22
1,850	10,4	2,6	34	13
1,500	14	1,9	57	17
1,760	17,2	2,3	61	20
1,569	4,6	1,1	43	23
0,969	4	2,5	80	20
0,508	5,4	4	55	30
1,431	4,4	1,7	35	21
2,077	17	2,1	125	15
1,800	6,5	1,9	40	15
0,764	3,6	1,5	60	24
2,077	12,7	2,7	66	17
0,900	5,3	2	50	19
0,600	4,8	1,8	61	19
1,029	7,4	1,7	49	24
2,271	22,2	3,7	75	27
0,969	4,5	2,4	86	20
6,092	35	6,4	150	19
0,831	4,9	2,2	50	24
1,909	6,5	2,9	57	29
4,062	17,3	4,2	143	23

0,857	7,4	3,6	60	26
2,123	30,2	5,7	99	18
2,077	15	2,5	67	20
1,036	4,8	1,8	55	22
1,385	8,9	1,9	47	15
0,508	4,5	2,3	48	16
1,800	8,4	3,3	65	25
0,831	6	2,2	55	21
2,215	28,7	3,7	89	33
0,491	2,5	2,5	48	24
1,850	6,2	2,5	46	25
1,480	7,2	1,6	52	21
2,850	12,9	3,6	79	23
0,386	1,6	2	15	19
0,831	5,7	3,3	55	24
0,550	2	1,8	42	19
1,500	6,4	2,7	53	26
0,436	7,3	3,6	95	10
0,646	4,3	3,2	32	21
2,050	7,8	3	68	26
3,000	12	3	89	23
1,145	3,6	2,1	49	21
1,615	5	2,5	77	23
3,471	14,2	3,3	47	32
1,385	4,8	2,2	55	43
0,545	17,8	2,8	48	15
1,145	8,2	3,4	50	25
3,950	25	3,6	76	23
1,400	12	2,3	76	20
2,127	7,8	3,3	106	26
0,508	4,6	2,1	73	23
1,385	7,3	2,1	60	31
2,815	9,8	2,7	82	26
1,200	3,3	3,4	56	29
0,686	5,2	1,9	20	16
0,400	4,1	4,6	57	26
4,300	17	2,4	131	31
10,833	49	7,2	204	29
2,950	13,2	3,8	68	42

0,491	4,4	4,4	42	39
0,480	3,6	4	55	29
1,886	5,6	4,2	73	51
1,380	12,2	0,8	46	20
3,120	3,3	4,9	56	49
0,500	3,6	4,3	74	66
0,900	3,6	5,5	64	89
1,200	6,7	5,1	89	78
4,440	6,2	2,7	47	44
1,600	8,8	3,3	56	36
8,550	13	6,5	77	74
2,280	8,2	4,2	89	54
2,520	7,2	6,5	75	88
3,150	4,6	9,9	48	90
15,200	34	8	133	64
0,600	4,8	7,1	90	117

Tabell 4. Analysdata samt beräknad P_{water} , $P_{\text{org-HCl}}$ och mineralisering

$P\text{-AL}_{\text{ICP}}$, $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$	$P\text{-HCl}_{\text{ICP}}$, $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$	Beräknad P_{water} ($\text{kgP}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Beräknad $P_{\text{org-HCl}}$ ($\text{kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Beräknad mineralisering, % ($\text{kg P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{år}^{-1}$)
8,3	63	59	562,5	5,63
5,5	64	29	525	5,25
6,7	43	72	487,5	4,88
4,6	78	18	340	3,40
3,1	33	9	375	3,75
5,9	66	24	525	5,25
26,2	125	84	900	9,00
9,1	79	9	385	3,85
10,9	80	75	520	5,20
27,5	139	173	675	6,75
6,2	114	39	700	7,00
8,5	57	29	385	3,85
16,8	65	81	630	6,30
7,9	63	39	720	7,20
18,3	68	62	595	5,95
8,1	127	45	747,5	7,48
10,5	52	81	630	6,30
14,6	61	86	650	6,50

8,5	74	27	540	5,40
6,2	82	45	570	5,70
8,6	113	17	325	3,25
10,4	83	50	585	5,85
4,7	69	24	422,5	4,23
9,1	92	68	665	6,65
20,2	121	80	975	9,75
21,9	96	191	665	6,65
16,6	84	63	910	9,10
7,4	60	45	675	6,75
6,3	60	29	595	5,95
11,7	81	62	682,5	6,83
8,2	103	45	650	6,50
10,1	56	65	552,5	5,53
12,6	107	69	875	8,75
17,1	63	99	595	5,95
26,6	137	135	552,5	5,53
11,9	75	68	980	9,80
9,4	63	56	630	6,30
5,3	65	33	650	6,50
17,6	95	155	595	5,95
11,6	94	62	585	5,85
23	108	119	700	7,00
5,7	103	29	840	8,40
10,3	79	59	552,5	5,53
6,3	111	12	552,5	5,53
11,6	61	69	682,5	6,83
4,3	62	27	682,5	6,83
19	97	171	595	5,95
17,5	136	150	1425	14,25
13	47	72	412,5	4,13
10,2	90	39	595	5,95
15,2	128	86	495	4,95
11,2	60	69	780	7,80
11,3	75	56	487,5	4,88
7,8	93	29	980	9,80
24,9	161	147	825	8,25
10,2	45	56	390	3,90
15,5	74	53	595	5,95

19,3	88	66	750	7,50
6,3	65	51	747,5	7,48
6,9	73	32	650	6,50
8,7	78	17	975	9,75
7,1	55	47	682,5	6,83
20,7	103	68	487,5	4,88
8,5	53	59	487,5	4,88
6	80	21	660	6,60
15,2	81	68	552,5	5,53
6,8	67	27	570	5,70
6,6	73	17	522,5	5,23
8,3	72	36	840	8,40
26,8	98	80	945	9,45
6,5	100	32	650	6,50
42,4	155	198	617,5	6,18
6,8	74	27	780	7,80
9,2	88	53	797,5	7,98
19,3	159	132	747,5	7,48
10,1	89	30	910	9,10
36,7	109	69	585	5,85
16,8	83	68	650	6,50
6,4	73	29	605	6,05
10,1	60	45	487,5	4,88
5,5	57	17	520	5,20
11,3	83	59	812,5	8,13
8,3	72	27	682,5	6,83
32,2	121	72	1072,5	10,73
5,5	69	14	660	6,60
8	72	56	750	7,50
9,7	72	56	787,5	7,88
15,9	97	86	690	6,90
3,7	33	14	665	6,65
8,6	87	27	780	7,80
3,6	60	17	570	5,70
9,1	86	45	780	7,80
9,8	100	12	275	2,75
7,2	52	21	682,5	6,83
10,8	103	62	780	7,80
13,6	114	98	747,5	7,48

6,6	70	32	577,5	5,78
6,8	97	53	747,5	7,48
16,5	78	122	1120	11,20
7	97	45	1397,5	13,98
5,5	65	15	412,5	4,13
10,8	73	32	687,5	6,88
24,6	97	119	690	6,90
14,1	95	42	600	6,00
10,4	121	59	715	7,15
6,6	96	17	747,5	7,48
9,8	84	45	1007,5	10,08
10,5	94	92	845	8,45
7	94	33	797,5	7,98
6,8	36	24	560	5,60
8,7	72	12	780	7,80
18	152	129	930	9,30
54,2	220	325	870	8,70
16,7	110	89	1260	12,60
9,3	78	14	1072,5	10,73
7,6	96	12	725	7,25
11,4	126	33	892,5	8,93
13,7	63	35	500	5,00
8,5	101	39	612,5	6,13
8,4	133	8	990	9,90
9,7	158	14	1335	13,35
12,3	170	12	780	7,80
9,1	80	56	550	5,50
12,3	93	24	540	5,40
22,3	146	86	740	7,40
12,5	139	29	675	6,75
14,3	173	32	1100	11,00
15,9	137	32	900	9,00
41	177	114	480	4,80
12,7	198	5	877,5	8,78