



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för mark och miljö

Frigörelse av fosfor från färskt, fryst och torkat växtmaterial

– Ett laboratorieförsök för att öka förståelsen för fosfordynamiken inom växtodlingen

Release of phosphorus from fresh, frozen and dried plant materials

– A laboratory experiment for expanded knowledge of phosphorus dynamics in plant production

Jon Wessling

Magisteruppsats i markvetenskap
Agronomprogrammet – inriktning mark/växt

Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2015:04

Uppsala 2015

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

Jon Wessling

Frigörelse av fosfor från färskt, fryst och torkat växtmaterial
– Ett laboratorieförsök för att öka förståelsen för fosfordynamiken inom växtodlingen
Release of phosphorus from fresh, frozen and dried plant materials
– A laboratory experiment for expanded knowledge of phosphorus dynamics in plant production

Handledare: Holger Kirchmann, institutionen för mark och miljö, SLU
Examinator: Thomas Kätterer, institutionen för ekologi, SLU

EX0429, Självständigt arbete i markvetenskap - magisterarbete, 30 hp, Avancerad nivå, A1E
Agronomprogrammet – inriktning mark/växt 270 hp

Serienamn: Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU
2015:04

Uppsala 2015

Nyckelord: fosforförluster, fosforutlakning, frysning, tining, ytavrinning

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

Sammanfattning

Fosfor är den viktigaste faktorn för övergödning i sötvatten och bedöms även bidra till de kraftiga algbloomingarna i Östersjön. Dynamiken och förlustvägarna för fosfor som läcker från jordbruksmark till vattendrag är dock inte fullt förstådda. Det är känt sedan tidigare att fosfor kan läcka från växtmaterial i kontakt med vatten. Försök har visat att frysning av växtmaterial kan öka frigörelsen av fosfor. Försök med upprepade frys- och tö-cykler har visat att en stor andel av fosforinnehållet i växterna kan förloras. De flesta försök kring detta har dock gjorts i fält där många faktorer påverkar frigörelsen, så som väder och jordart.

Detta försök gjordes i en kontrollerad miljö utan jord närvarande. Istället för jord användes glaskulor som blandades med växtmaterialen i kärl för att möjliggöra homogen lakning med vatten genom blandningen av glaskulor och växtmaterial. I försöket användes rödklöver, rajgräs och torr halm som sönderdelades till ca 2 cm långa bitar. Från klöver och gräs togs prover ut som torkades i ett led och frystes i ett led. Växtmaterialet blandades med glaskulorna och inkuberades under 43 dagar. Vid 7 tillfällen under experimentet lakades proverna ut med vatten som sedan analyserades för oorganisk fosfor och totalt fosforinnehåll som frigjorts från växtmaterialet.

Resultaten visade att växtmaterialet frigjorde mellan 212 och 1216 mg fosfor per kg torrsubstans under den första dagen. Torkat växtmaterial frigjorde mest fosfor och färskt frigjorde minst den första dagen. Efter två dagar hade motsvarande 45-57 % av totala fosforinnehållet frigjorts från de torkade proverna. Från de frysta proverna var motsvarande siffra 34-35 % och från de färska endast 9-13 %. Efter de två första dagarna sjönk frigörelsen kraftigt i de torkade och frysta leden, medan de färska leden fortsatte att frigöra fosfor i en högre hastighet. Efter 43 dagar hade 57-69 % av fosforinnehållet frigjorts från de torkade proverna, 49-51 % från de frysta och 42-50 % från de färska proverna. Skillnaden mellan frysta och färska prover var inte signifikanta i slutet av försöket. I början av försöket frigjordes främst oorganisk fosfor, medan det under senare delarna av försöket frigjordes mer organisk fosfor, framförallt från klöver. Färskt gräs var ett undantag, där frigörelsen av oorganisk fosfor fortsatte att öka nästan till slutet av experimentet.

Beräkningar visade att resultaten översatta till fältförhållanden skulle kunna innebära att fosfor som frigörs från växtmaterial kan vara en betydande källa till fosforförluster i lantbruket. I en typisk blandvall skulle i värsta fall över 3 kg fosfor per hektar kunna frigöras under vintern efter frysning och vid ytavrinning från 10 % av arealen skulle frigörelse från fryst växtmaterial kunna bidra med över 0,2 kg fosforförluster per hektar från bevuxen åkermark.

Nyckelord: fosfor, fosforförluster, frigörelse, frysning, förluster, tining, växtmaterial

Abstract

Phosphorus is the single most potent contributor to eutrophication of freshwater and has also been shown to contribute to the toxic algae blooms in the Baltic sea. The dynamics and paths of losses of phosphorus from arable lands are not fully understood. It is known that phosphorus can be lost directly from plant material to water. In studies where plant material has been subjected to several freeze-thaw cycles, large amounts of phosphorus have been lost. Most studies have been conducted under field conditions, with many factors effecting the measured losses of phosphorus, such as weather and type of soil. This study was performed in a controlled environment without the presence of soil. Instead of soil, small glass beads were mixed with the plant materials in vessels, to make possible homogeneous leaching with water through the mixture of glass beads and plant materials.

In this study, clover, ryegrass and dry straw were cut to pieces, approximately 2 cm long. Fresh, frozen and dried plant material from clover and ryegrass were mixed with the glass beads and incubated though 43 days. Straw was only studied dried. At 7 occasions, the samples were leached with water. The leached water was then analyzed for inorganic and total phosphorus released from the plant materials.

The results showed that the plant materials released 212 to 1216 mg phosphorus per kg dry matter during the first day. Dried material released the largest and fresh material the least amounts of phosphorus. After two days, 45-57 % of phosphorus in the dried materials had been released, 34-35 % in frozen materials and 9-13 % in fresh materials. The release of phosphorus declined after the first two days in dried and frozen materials, while the release continued or increased from the fresh materials. After 43 days, 57-69 % of phosphorus in the dried materials had been released, 49-51 % from the frozen materials and 42-50 % from the fresh materials. Differences between frozen and fresh materials were not significant at the end of the experiment. In the beginning, primarily inorganic phosphorus was released, while later in the experiment, more organic phosphorus was released, especially from clover. Fresh grass on the other hand increased the release of inorganic phosphorus almost until the end of the experiment.

Calculations showed that if the results were scaled up to field conditions, the release of phosphorus from plant material during winter and spring in cold climate could contribute to significant losses of phosphorus from arable lands. In a worst case scenario, about 3 kg of phosphorus per hectare could be released from a ley with frozen grass and clover during the winter. If surface runoff would occur from 10 % of the surface, leaching from plant material could contribute with more than 0.2 kg of phosphorus loss per hectare of farmland.

Keywords: freezing, losses, phosphorus, plant material, residue, thawing

Populärvetenskaplig sammanfattning

Fosfor kan frigöras snabbt från växtrester efter frysning

Stora mängder fosfor kan frigöras direkt från växtmaterial vid nedbrytning visar en ny studie. Ungefär hälften av fosforinnehållet i växterna frigjordes under en dryg månad av nedbrytning. Om växtmaterialet dessutom varit fryst gick frigörelsen betydligt snabbare i början.

Inom jordbruket har man länge haft fokus på att minska utlakningen av kväve. Under senare år har det dock blivit allt tydligare att fosfor kan vara en viktigare faktor för övergödningen i sötvatten och under vissa förhållanden även i salt- och brackvatten. Det är svårt att bedöma var fosforutlakning sker och hur det ska förhindras inom jordbruket. Vid modellering av fosforutlakning är data kring markens egenskaper och gödsling viktiga för vilket resultat man får. Vilken roll frigörelse av fosfor direkt från växtmaterial till vattendrag, t.ex. vid ytavrinning, är inte väl känt. Tidigare studier har dock visat att omväxlande frysning och upptining av växtmaterial kan ge mycket stora förluster av fosfor.

I denna studie analyserades urlakade extrakt från klöver, gräs och halm under nedbrytning i ett laboratorieexperiment. För att undvika kemiska reaktioner mellan fosfor och jord genomfördes experimentet utan jord. Både färska, frysta och torkade prover ingick i studien, som pågick under totalt 43 dagar.

Resultaten visade att ungefär hälften av fosforinnehållet i färsk och fryst gräs och klöver kunde frigöras under en dryg månad, vilket i värsta fall skulle kunna motsvara 3 kg fosfor per hektar åkermark. Det är dock inte troligt att förluster i den skalan är vanliga, eftersom en stor del av fosfor kan bindas i jorden. Medelutlakningen från svensk åkermark som är ungefär 0,4 kg fosfor per hektar och år i jämförelse. I försöket gick dock frigörelsen mycket snabbare när växtmaterialet först varit fryst och detta kan medföra en betydande risk för fosforförluster om jordbruksmark översvämmas efter vintern, eftersom en stor andel av fosforinnehållet snabbt kan frigöras och lakas ut i tövattnet.

Studien föreslår inte några lösningar på problemen med fosforförluster, men pekar på områden för ytterligare forskning för att öka förståelsen för fosfors dynamik i jordbruksmark. Denna kunskap behövs för utvecklingen av nya åtgärder mot fosforläckage.

Innehållsförteckning

Förkortningar	7
1 Inledning	9
1.1 Problemställning	9
1.2 Projektets syfte	9
1.3 Hypoteser	10
2 Litteraturgenomgång	11
2.1 Fosfor – en komplicerad resurs	11
2.2 Fosforfrigörelse från växter	12
2.3 Fosfor i jord	14
2.4 Fosforutlakning	15
2.5 Fosfor i växter	12
3 Material och metoder	17
3.1 Försöksupplägg	17
3.2 Växtmaterial	17
3.2.1 Förhållande blad/stjälk för klöver	17
3.2.2 Torrsubstans	18
3.2.3 Vattenhållande förmåga	18
3.3 Inkubation	19
3.4 Extraktion	20
3.5 Analyser	20
3.5.1 Oorganisk fosfor	20
3.5.2 Analys av totalfosfor och övriga ämnen	21
3.5.3 Beräkning av organisk fosfor	21
3.6 Statistiska metoder	21
4 Resultat	22
4.1 Fosforfrigörelse vid nedbrytning av växtmaterial utan jord	22
4.2 Färskt växtmaterial	22
4.3 Fryst växtmaterial	27
4.4 Torkat växtmaterial	29
4.5 Jämförelse mellan färskt, fryst och torkat växtmaterial	30
4.6 Jämförelse mellan frigörelse av organisk och oorganisk fosfor samt kumulativa data	31
4.7 Frigörelse av kalium	36
4.8 Frigörelse av svavel	38

5	Diskussion	40
5.1	Relevans för praktiskt lantbruket	40
5.1.1	Sönderdelning av växtmaterial	41
5.1.2	Vattendränkning av växtmaterial före lakning	41
5.1.3	Skillnad mellan klöver och gräs	42
5.1.4	Kvantifiering av fosforfrigörelse	42
5.2	Frysning och torkning av växtmaterial – effekter och mekanismer	43
5.3	Kommentarer om experimentet	44
5.4	Ytterligare kunskapsbehov	44
6	Slutsatser	46
	Referenslista	47

Förkortningar

ATP	Adenosin-tri-fosfat
DNA	Deoxiribonukleinsyra
ICP	Inductively coupled plasma, analysmetod för grundämnen
oorg-P	Oorganisk fosfor, löst reaktiv fosfor, PO ₄ -fosfor
org-P	Organisk fosfor
P	Fosfor
p	Signifikansvärde
PO ₄	Fosfat, löst reaktiv fosfor
tot-P	Totalfosfor
TS	Torrsubstans

1 Inledning

1.1 Problemställning

De bakomliggande faktorerna som påverkar frigörelse och utlakning av fosfor från jordbruksmark är inte fullt förstådda. En stor del av fosforutlakning tenderar ofta att ske från små delar av jordbruksmarken under en mycket begränsad tid av året. Det är svårt att identifiera platser där särskilda insatser behövs för att begränsa utlakningen eftersom orsakerna kan vara många.

I ett odlingssystem kan nedbrytning av skörderester leda till en frigörelse av näringsämnen under höst och vinter och därigenom kan marken åter tillföras fosfor, som tidigare har tagits upp av grödan. Detta flöde kan vara av stor betydelse för utlakning men kunskapen om skörderesternas effekt på fosforläckage från marken är mycket begränsad.

De åtgärder som hittills gjorts för att minska fosforläckaget, så som begränsning av höga fosforgivor, har inte räckt till och därför är det relevant att undersöka den potentiella fosforfrigörelsen som kan ske från skörderester under hösten för att avgöra om dessa kan bidra med signifikanta fosformängder.

1.2 Projektets syfte

Syftet med detta arbete är att undersöka hur fosforfrigörelsen från olika växtmaterial sker under kontrollerade förhållanden vid nedbrytning utan inblandning i jord. I projektet ska dynamiken i fosforfrigörelse och förhållandet mellan oorganisk och organisk fosfor studeras. Målet är en bättre förståelse för fosforfrigörelse från olika skörderester och deras potentiella effekt som fosforkälla vid utlakning.

1.3 Hypoteser

- Klöver- och gräsplantor samt halm avger en del av sitt fosforinnehåll under hösten och vintern när dessa dör av, fryser och bryts ned.
- Den oorganiska andelen fosfor förväntas vara större än den organiska vid nedbrytningen eftersom fosfor kan snabbt frigöras från vissa molekyler som innehåller fosfatjoner, såsom ATP (adenosin tri phosphate).
- Frigörelsen av oorganisk fosfor förväntas vara störst vid de första extraktionerna för att sedan avta. Frigörelsen av organisk fosfor förväntas vara låg i början för att sedan öka på grund av mikrobiell aktivitet för att senare sjunka igen när fosforhalten i substratet blivit för låg.
- Den totala mängden fosfor som frigörs förväntas vara relaterad till fosforinnehållet i växtmaterialet.

2 Litteraturgenomgång

2.1 Fosfor – en komplicerad resurs

Fosfor är ett livsnödvändigt grundämne som finns i alla levande organismer. Fosfor är huvudkomponenten i cellernas system för att överföra energi och det är även en viktig komponent i DNA och i cellmembraner. Hos djur och människor finns fosfor till störst del i skelett och tänder i form av svårlösliga kalciumfosfater. Det största användningsområdet för fosfor är som gödselmedel inom lantbruket för att ersätta den fosfor som förs bort med grödorna. Till Sveriges totala jordbruksareal tillförs i genomsnitt 13 kg fosfor per hektar och år (SCB, 2012) och cirka 12 kg förs bort med skörden. Resterande 1 kg ackumuleras i marken. Endast 3 kg per ha tillförs genom mineralgödsel, resten är återcirkulation av stallgödsel och slam.

Fosfor har på senare tid fått allt större uppmärksamhet, i allmänhet p.g.a. eutrofieringen av åar, sjöar och hav i östersjöregionen och i synnerhet p.g.a. kraftiga algbloomningar som orsakar syrebrist och bottendöd i delar av Östersjön. Kväve och fosfor är de två näringsämnen som brukar anses vara begränsande i vattenbaserade ekosystem. Förhållandet mellan dessa avgör vilket av dem som styr tillväxten av plankton. En kväve-fosfor-kvot (N/P-kvot) på 16 (molförhållande) anses vara optimalt för tillväxten av plankton (Redfield, 1964). När N/P-kvoten inte är optimal anses det element som det är underskott av vara begränsande för tillväxten. Sötvatten i Sverige har vanligtvis en N/P-kvot över 16 vilket innebär att fosfor är begränsande. Även i norra Östersjön är fosfor begränsande då den tenderar att binda till det järn som förs ut från skogs- och myrmarker. I södra Östersjön är det dock kväve som är begränsande, vilket är anledningen till att man tidigare satsat mycket hårt på att minska kvävetillförseln. Trots dessa kraftiga åtgärder finns problemen med algbloomning kvar. Det har visat sig bero på att cyanobakterier, som kan utnyttja molekylärt kväve från luften, konkurrerar ut andra alger och tillväxer mycket kraftigt när kväve-fosforkvoten är låg (Moisander et al., 2003). Denna insikt har lett till flera olika krafttag för att minska fosfortillförseln till Östersjön.

Den första gemensamma satsningen på att förbättra Östersjöns ekologiska status trädde i kraft 1980 med Helsingfors-Konventionen, eller HELCOM. Konventionen omfattade flera olika områden bl.a. eutrofiering, utsläpp av giftiga ämnen, båttransporter, fiske och skydd av den biologiska mångfalden i Östersjön. År 2005 sattes BSAP (Baltic Sea Action Plan) till verket med målet att Östersjön skall vara i god ekologisk status år 2021. För att nå detta mål räknar man med att fosfortillförseln till Östersjön måste minska med 42 % jämfört med 2005 års nivå (HELCOM, 2015). För Sveriges del innebär detta att vi åtagit oss att minska vår årliga belastning av fosfor till Östersjön med 290 ton av totalt 860 ton per år. Denna siffra justerades upp till 530 ton för Sveriges del år 2013. Mellan 2000 och 2006 minskade fosforbelastningen med 30 ton från Sverige och föreslagna åtgärder beräknas ge ytterligare 61 tons minskning. Detta innebär att ytterligare åtgärder behövs för att minska belastningen. (Naturvårdsverket, 2008).

Omfattande åtgärder mot fosforförluster har även föreslagits av Vattenmyndigheterna som en del av arbetet med vattendirektivet, där målet är att miljö kvalitetsnormerna för vatten ska vara uppnådda till år 2021 (Vattenmyndigheten, 2014).

Cirka 32 % av fosfor som på olika sätt tillförs svenska sjöar och vattendrag beräknas komma från jordbruksmark, denna siffra varierar regionalt mellan 6 och 57 % beroende på vilken del av Sverige man tittar på. Den lokala variationen är givetvis ännu större. Om man endast beaktar det antropogena bidraget blir jordbrukets andel högre, ca 45 % (Brandt et al., 2008).

2.2 Fosfor i växter

Fosfor är ett makronäringsämne som normalt utgör ca 0,2 % av torrvikten i växter och ingår i många olika organiska föreningar med många olika funktioner (Fogelfors, 2001). I växter finns fosfor i oxiderad form, ester bunden till olika organiska molekyler. De vanligaste formerna för fosfor i växter är:

- Oorganisk fosfat
- Monostrar: mononukleotider, sockerfosfater, ATP, m.fl.
- Distrar: fosfolipider, DNA, RNA
- Inositolfosfater: fytinsyra

Den vanligast förekommande fosforföreningen är troligtvis inositolfosfaten fytinsyra, åtminstone i växternas frön där den i t.ex. vetekärnor kan uppgå till närmare 90 % av det totala fosforinnehållet (Webster, 1970). Detta bekräftas även av Turner et al. (2002), som fann att de dominerande organiska fosforföreningarna i marken är inositolfosfater i allmänhet och fytinsyra i synnerhet. Fosfor förekommer även som oorganiska fosfatjoner i växterna, främst i de vegetativa delarna, då den förmodligen mellanlagras i denna form under tillväxten. Denna andel kan motsva-

ra över 50 % av totala fosforinnehållet i vissa växter, exempelvis lusern (Webster, 1970).

2.3 Fosforfrigörelse från växter

Vid torkning och frysning av växtceller förstörs delar av cellmembranen och cellväggarna vilket leder till att cellinnehållet kan läcka ut ur cellen när den utsätts för lakning, t.ex. vid regnfall och snösmältning. Vid frysning av växtmaterial bildas iskristaller i cellvätskan som kan punktera cellmembranen. Omfattningen av denna sönderfrysning beror dock på växtmaterialet, då t.ex. fleråriga växter ofta har mekanismer för att sänka fryspunkten i cellvätskan, eller på andra sätt kan skydda cellerna under minusgrader (Levitt, 1980). Det gäller dock bara de delar som måste överleva till nästan år, bl.a. rötter, skott och tillväxtpunkter. Den största delen av den ovanjordiska biomassan dör under vintern och kan därmed vara en källa till den potentiella utlakningen av näringsämnen.

Torkning av växtrester innan skörd på hösten sker huvudsakligen för spannmålsrester. Detta gör det intressant att studera effekterna av torkningen på frigörelsen av fosfor från halm.

Växtrester är något som förekommer vid all typ av odling, i spannmål- och oljeväxter i form av stubb och halm, vid vallodling i form av återväxt efter senaste skörden. Vid gröngödsling och vid odling av fånggrödor lämnas all producerad biomassa kvar för att den ska brytas ner och förse nästkommande gröda med näring. Mängden växtrester och fosforinnehållet varierar med olika grödor och produktionsätt. Biomassa kan innehålla betydande mängder växtnäringsämnen som riskerar att lakas ut under vintern och våren. I försök visade Aronsson et al. (2007) att en ekologisk växtföljd med gröngödsling på lerjord läckte betydligt mer fosfor än en konventionell växtföljd och en ekologisk växtföljd med stallgödsel. I ett tidigare försök av Bergström et al. (2006) på lättare jord kom man dock fram till att medelutlakningen av fosfor från en växtföljd med gröngödsel inte behöver vara större än från en utan gröngödsling.

Vid ett flertal studier har det visat sig att stora förluster av fosfor kan ske under vintern när växtrester omväxlande fryser och tinar. I en studie av Timmons et al. (1970), där proverna frystes tre gånger och utlakades efter varje frysning, uppmättes en total förlust av 2405 mg fosfor per kg TS från lusern och motsvarande 2527 mg fosfor per kg TS från ängsgröe. Detta motsvarade 50-80 % av totala innehållet av fosfor i materialet. Sturite et al. (2007) undersökte hur mycket av växtens innehåll av fosfor och kväve som kunde behållas i skott och rötter under vintern. Man samlade upp läckagevatten som passerade den ovanjordiska biomassan av olika vallväxter, men inte rötterna. Halterna av fosfor varierade från 0 mg per

liter under hösten till 1,9 mg per liter under våren. Förlusterna av fosfor från ovanjordisk biomassa var i genomsnitt 34 % under vintern.

I en studie av Bundy et al. (2007) analyserades löslig reaktiv fosfor (LRP) samt total löslig fosfor (TLP) i lusern och gräs. Resultaten visar att frigörelsen av löslig fosfor från lusern ökade efter frysning och uppnår ca 20 % jämfört med mindre än 5 % från det färska materialet. Om materialet dessutom tinades ordentligt efter frysningen blir frigörelsen ännu större, ca 40 %. I studien tittade man även på halterna av fosfor i ytavrinning efter ett simulerat regn. Några dagar efter att vallväxterna på platsen bekämpats kemiskt uppmättes fosforhalter mellan 1,4 och 1,8 mg P/l. Det simulerade regnet motsvarade 75 mm per timme.

Norska studier av Bechmann et al. (2005) visar att utfrysningens omfattning beror på hur många gånger växtmaterialet utsätts för tö-frys-cykler, där varje cykel ökar utfrysningen. I det norska försöket med rajgräs varierade fosforutfrysningen från ca 30 % av det totala fosforinnehållet vid en frys-tö-cykel till mer än 90 % vid 8 frys-tö-cykler. Detta innebär att riskerna för utfrysning blir större under vintrar med temperaturer som växlar mellan plus- och minusgrader många gånger är än om det är minusgrader konstant under en lång period. I försök med avrinning från jord med fånggröda respektive bar jord efter frysning uppmättes fosforhalter om 17,9 mg P/l efter fånggröda och 3,25 mg P/l från bar jord. Innan frysning var motsvarande siffra 0,49 och 1,72 mg P/l. Innan frysning var koncentrationen lägre i proven med fånggröda och efter frysning var halterna av fosfor högre.

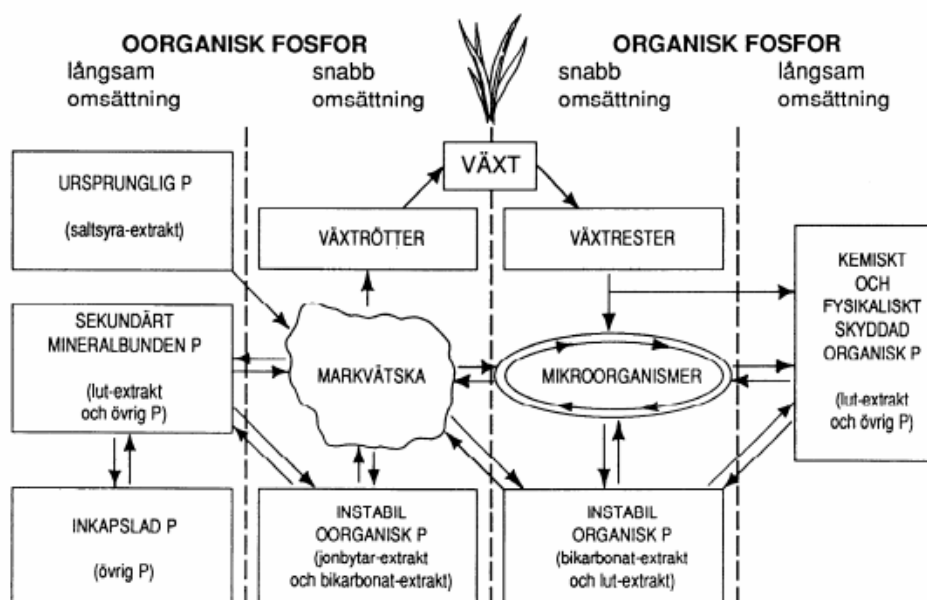
2.4 Fosfor i jord

Fosfor finns ofta i ganska stora mängder i jorden, dock är den allra största delen av fosfor bunden på olika sätt. Fosfor i marken kan delas in i tre grupper (Ivarsson, 1988) vilket visas i figur 1. Den första gruppen består av dels primära mineral med fosfor, t.ex. apatit, dels sekundära fosformineral, järn-, aluminium- och kalciumfosfater samt slutligen fosfat adsorberad till lermineraler, aluminium- och järnoxider. De sekundära fosformineralerna uppstår genom att löst fosfat-fosfor binds kemiskt till järn eller aluminium vid lågt pH eller till kalcium vid högt pH. Den adsorberade delen av fosfor i marken binds till ytor som har positiv laddning, eftersom fosfatjonen har negativ laddning.

Den andra gruppen består av fosfor bundet till organiskt material, såsom levande biomassa, humus, löst organisk fosfor och fosfor i organiskt material under nedbrytning.

Den tredje gruppen är löst fosfat i form av $H_2PO_4^-$ eller HPO_4^{2-} beroende på pH-värdet. Det är denna form av fosfat som kan tas upp av växter (Havlin et al., 1999), men även den form som det finns absolut minst av i jorden.

Flödena mellan dessa olika grupper och mängden av fosfor i respektive grupp beror mycket på vilken jord man studerar. I jordar med högt pH kan sekundära kalciumfosfater bildas eftersom Ca finns i överskott medan det i jordar med lågt pH kan bildas järn- eller aluminiumfosfater istället eftersom tillgängligheten av Fe och Al ökar med lägre pH. Alla jämvikter med fosfor är starkt förskjutna till de olösliga eller svårlösliga formerna, vilket gör att koncentrationen av löslig PO_4 -fosfor i markvätskan normalt är mycket låg och sällan överstiger $10\mu M$ eller $0,31\text{ mg P/l}$ (Bieleski, 1973). Detta bekräftas av många svenska försök. Bergström et. al. (2006) uppmätte i en siltjord årsmedelkoncentrationer i dräneringsvattnet på $0,03\text{--}0,12\text{ mg P/l}$ beroende på behandling. Aronsson et. al. (2007) uppmätte i ett liknande försök med en lerjord årsmedelkoncentrationer på mellan $0,05$ och $0,5\text{ mg P/l}$.



Figur 1. Fosfors kretslopp i jorden. (Ivarsson, 1988)

2.5 Fosforutlakning

Fosforutlakning från jordbruksmark beror på många olika faktorer; jordart, fosforinnehåll, struktur, dränering, gröda, gödsling, mm.

Fosforutlakningen från jordbruksmark i Sverige är i genomsnitt $0,4\text{ kg P/ha}$ och år (Ulén et al., 2000) sett över en period av ca 20 år. Utlakningen kan dock variera med årsmånen över landet och mellan olika fält, vilket visas i en rapport från Naturvårdsverket (Johnsson et al., 2008) där utlakningen beräknades med hjälp av simuleringsmodeller. Till exempel beräknades utlakningen från en sandjord i Mä-

lardalen till 0,09 kg P/ha och år medan utlakningen från en lerjord i samma område var 0,8 kg P/ha och år. Skillnaden mellan olika regioner var också stor där utlakning från korn i västsvenska slättbygden beräknades till ca 2 kg P/ha och år uppdelat i ytavrinning och utlakning. Motsvarande siffra för östsvenska slättbygden blev 0,6 kg P/ha och år. Lägsta läckaget fanns i regioner med låg avrinning och lätta jordar.

För att bedöma risken för fosforförluster behövs tämligen avancerade och detaljerade modeller, då förlustvägarna är många och kan variera mellan fält. Modeller för fosforindexberäkningar har utvecklats både i Danmark och i Norge. I Sverige har en modell tagits fram som är mer komplicerad än de Danska och Norska modellerna, men också kan ge mer information om förlustvägarna (Alström & Wedding, 2012).

Modellerna använder fyra faktorer för att beräkna ett index för fosforförluster: Klimatfaktorer, källfaktorer, transportfaktorer och transportvägar.

1. Klimatfaktorer har att göra med nederbörd och temperatur, där tjälad mark är en viktig faktor.
2. Källfaktorer kan vara fosforinnehåll, gödsling, odlad gröda, m.fl. Det Norska indexet tar även hänsyn till utfrysning av fosfor från vintergrön mark.
3. Transportprocesser är ytavrinning, yterrosion, infiltration samt makroporflöde.
 - a. Ytavrinning hanterar löst fosfor från t.ex. gödsel, eller utfrysad fosfor från växtmaterial.
 - b. Yterrosion hanterar erosion och suspension av partiklar som innehåller fosfor.
 - c. Infiltration hanterar vattenflöde genom homogen jord och hur fosfor kan frigöras och fastläggas i jorden.
 - d. Makroporflöde är vattenflöde genom sprickor och andra större porer. Detta sker främst vid vattenmättade förhållanden och kan leda till inre erosion av lerpartiklar.
4. Transportvägar hanterar avstånd till vattendrag, topografi, täckdikning, yt-vattenbrunnar, skyddszoner, mm. Bland annat tas hänsyn till om det finns områden där partiklar kan sedimentera.

Den svenska modellen har hittills endast använts i mindre typområden för utvärdering av metoden, men modellen kan bli ett viktigt prioriteringsverktyg för att bedöma var i landskapet olika åtgärder mot fosforläckage behövs.

3 Material och metoder

3.1 Försöksupplägg

Försöket lades upp med tre olika växtmaterial: rödklöver, rajgräs och vetehalm. Rödklöver och rajgräs utsattes för tre behandlingar vardera vilket motsvarar 6 led. Halmen hade en behandling, torkad. Två led utan växtmaterial inkluderades som referenser. Detta ger totalt 9 olika led i försöket. För varje led gjordes tre upprepningar. Totalt 27 prov ingick i försöket. Ingen indelning i block gjordes.

3.2 Växtmaterial

Två växtmaterial, rödklöver och rajgräs, samlades in från närliggande fältodlingar den 18/9 2008 från en vall vid Kungsängen i Uppsala. Dessa material behandlades med frysning och torkning. Ca 1/3 frystes in direkt vid -20°C , 1/3 torkades vid 40°C under ett dygn och de färska proven placerades i kyl vid 2°C i en plastpåse. Torkad vetehalm togs från institutionens verksamhet och härstammar från fältförsök. Den behandlades inte ytterligare. Samtliga prover klipptes senare ner till ca 2 cm långa bitar. Klöver separerades i blad och stjälkar och de flesta blad behölls intakta.

3.2.1 Förhållande blad/stjälk för klöver

Viktförhållandet mellan klöverns blad och stjälkar beräknades. Uppgiften behövdes för att uppnå samma förhållande mellan klöverns blad och stjälkar i de olika experimenten. Detta gjordes genom att representativa prov togs ut från den frysta och färska klöverna varpå blad och stjälkar separerades. Därefter vägdes stjälkar och blad separat och förhållandet beräknades. Vid inkubationen användes samma viktförhållande i de tre behandlingarna: fryst, färsk och torkad.

3.2.2 Torrsubstans

Två bestämningar av torrsubstans (TS) gjordes vid olika tillfällen. Då vägdes ca 5 g färskt respektive fryst samt ca 1 g torrt växtmaterial in i deglar med känd vikt. Tre upprepningar gjordes för varje växtmaterial. För klöver utnyttjades informationen om blad-/stjälkförhållandet genom att motsvarande andel blad och stjälek vägdes in. Proverna torkades vid 105°C i ett dygn varefter deglarna vägdes igen och viktförlust samt TS-halt beräknades. Resultatet visas i Tabell 1.

3.2.3 Vattenhållande förmåga

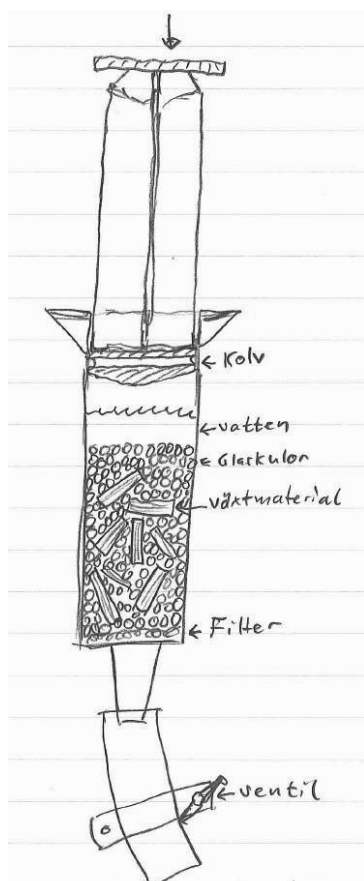
Den vattenhållande förmågan för de torkade växtmaterialen bestämdes, se avsnitt 3.4. för ytterligare beskrivning. Bestämningen gjordes genom att montera en slang med slangklämma i botten på en tratt försedd med ett filter av glasull. Tratten ställdes i en E-kolv som vägts tillsammans med glasfiltret. Tratten fylldes sedan med ca 1 g torrt växtmaterial och 35 ml vatten. Ett urglas lades ovanpå för att minimera avdunstning. Efter ca 1,5 timme, när växtmaterialet var vattenmättat, släpptes vattnet ur i E-kolven som därefter vägdes. Utifrån detta kunde mängden vatten som tagits upp av växtmaterialet beräknas. De torkade proverna höll kvar 3-4 ml vatten, men eftersom extraktionstiden var kortare än 1,5 timme bedömdes att 2 ml extra vatten till de torra proven vid första extraktionen skulle räcka.

Tabell 1. Sammansättning av växtmaterialen som användes i denna studie

Karakteristika	Klöver	Gräs	Halm
Fosfor (mg/kg TS)	3704	4707	672
Standardavvikelse	22	89	11
Svavel (mg/kg TS)	2359	3344	852
Standardavvikelse	30	44	1
Kalcium (mg/kg TS)	16116	6434	2742
Standardavvikelse	162	141	73
Magnesium (mg/kg TS)	1639	2779	802
Standardavvikelse	37	2	14
Kalium (mg/kg TS)	35182	34642	6686
Standardavvikelse	828	794	24
TS-halt (%)			
Färsk	15,8	21,0	-
Fryst	17,6	22,7	-
Torkad	90,1	92,7	94,7

3.3 Inkubation

Då syftet med detta försök var att studera frigörelsen av fosfor från olika växtmaterial utan inblandning i jord, inkuberades proven så att ämnena kunde lakas ut. För detta togs 100 ml sprutor till vilka växtmaterial blandades med glaskulor tillfördes. Ca 60 g glaskulor av 5 mm diameter användes i varje spruta vilket motsvarade ca 40 ml (figur 2). Detta gjordes för att garantera syresättning vid nedbrytning och för att förhindra en klumpbildning, men även för att ge en jämnare vatten genomströmning vid extraktionen. Glaskulor är inerta och påverkar inte växtmaterialet kemiskt. I botten på sprutan fästes en kort slangstump med en skruvklämma för att ge möjlighet att styra vattenflödet vid extraktionen. Underst i sprutan placerades ett filter av glasull för att förhindra att större partiklar följde med vid extraktionerna. Växtprover klipptes till ca 2 cm längd innan de blandades med glaskulorna i sprutorna. Mängden växtmaterial var ungefär 1 gram torrs substans i varje spruta vilket innebär att de färska proverna vägde ungefär 5 gram. Sprutorna ställdes i stora glasbägare. Proverna inkuberades vid 15°C i konstantskåp.



Figur 2. Principskiss över spruta med glaskulor och växtmaterial (Jon Wessling, 2015).

3.4 Extraktion

Extraktionerna skedde vid sju tillfällen; dag 0, 1, 6, 14, 21, 29 och 43. Vid extraktionen fylldes sprutorna med 50,0 ml avjoniserat vatten. Vid första extraktionen tillsattes 2 ml mer vatten till de torra proverna för att kompensera för att de torkade leden absorberade mer vatten än övriga led, se avsnitt 3.2.3. om vattenhållande förmåga. Efter 45-60 minuter trycktes extraktet försiktigt ur sprutan med kolven. Det var luften som inestängdes i sprutan som tryckte ut vätskan och någon fysisk kontakt mellan glaskulorna och kolven skedde inte. För att möjliggöra beräkning av mängden fosfor i provet beräknades provets volym genom vägning. Extraktet hölls i centrifugrör med känd vikt som sedan vägdes. Det antogs att extraktets densitet var 1000 g/l.

3.5 Analyser

3.5.1 Oorganisk fosfor

För att analysera innehållet av oorganisk fosfor användes askorbinsyrametoden (Murphy & Riley, 1962) där fosforkoncentrationen bestämdes med fotospektrometri. Metoden är mycket känslig och används även för att bestämma fosfatkoncentrationen i havsvatten. Ingredienserna i reagenset är ammonium-molybdat, kalium-antimon-tartrat, askorbinsyra och svavelsyra. Molybden och antimon reagerar med fosfat och bildar fosfo-molybdensyra, som i sin tur reduceras till molybdenblått av askorbinsyran. Styrkan på denna färg är proportionell mot koncentrationen av löst reaktiv fosfor i provet och mättes vid 880 nm med en fotospektrometer. Denna metod ska vara linjär inom koncentrationsintervallet 0,15-1,30 ppm PO_4^- . När analyserna började utföras verkade dock så höga koncentrationer som 1,2 ppm inte ge helt linjära samband mellan koncentration och absorbans. Därför valdes högsta acceptabla absorbans till motsvarande 0,8 ppm PO_4^- , vilket innebar att prover med högre värden fick analyseras på nytt efter ytterligare utspädning. Inför varje analystillfälle tillverkades ett antal standardlösningar med kända fosforkoncentrationer från 4 ppm PO_4^- förrådslösning. Från dessa lösningar framställdes en kalibreringskurva för fotospektrometern. Lösningarna innehöll 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 och 0,8 ppm PO_4^- . För att underlätta användandet av kalibreringskurvorna subtraherades absorbansen för koncentrationen 0 ppm från alla punkter i kurvan. Det gjorde att en rät linje som skar både x- och y-axeln vid 0 kunde anpassas till kurvan och därmed fick linjen en enkel ekvation av formen $y=k*x$. Genom att multiplicera absorbans med k-värdet erhöles koncentrationen.

För att minska risken för att starkt färgade prover skulle påverka analysresultatet gjordes en blank till varje prov innehållande samma mängd växtextrakt samt ett icke fullständigt reagens innehållande endast svavelsyra och ammonium-

molybdat, spätt med vatten till samma koncentration som det fullständiga reagenset. Absorbansen som uppmättes i blankproven subtraherades från provernas absorbans för att kompensera för färg som inte härstammar från reaktionen med fosfor, enligt metodinstruktionen. För de flesta av blankproven med ofullständig reagens var absorbansen så låg att dessa inte gick att skilja från standard-blanken. En fördel med detta tillvägagångssätt var att tolkningen av kalibreringskurvorna underlättades, då en korrigerad absorbans med värdet 0 motsvarade koncentrationen 0 ppm efter att blankvärdet subtraherats.

3.5.2 Analys av totalfosfor och övriga ämnen

Tio ml av varje extrakt sattes till ett 100 ml uppslutningsrör. Därefter tillsattes 10 ml salpetersyra (HNO_3) och proverna uppslöts vid 125°C under 2 timmar. Totalt varade uppslutningen ca 6 timmar på grund av programmerad uppvärmning och nedkylning av aggregatet. När proverna var uppslutna späddes de till 25 ml och analyserades med två upprepningar med ICP (Inductively Coupled Plasma) för totalinnehåll av P, S, Ca, Mg samt K (see Tabell 1).

För att kontrollera att mätningarna var korrekta gjordes standarder med 0,523; 1,31 samt 6,54 mg P/l där ett led uppslöts i salpetersyra, medan ett led inte uppslöts. Prover som inte uppslutits i salpetersyra visade i genomsnitt 22 % högre koncentration i analysen, trots att de hade späts till samma koncentration som de uppslutna proverna. För att korrigera för att ICP-analysen underskattade fosforinnehållet i uppslutna prover har samtliga uppmätta värden för total-P multiplicerats med en faktor 1,22.

3.5.3 Beräkning av organisk fosfor

Koncentrationerna av organisk fosfor beräknades som differens mellan koncentrationen oorganisk fosfor och totalfosfor för varje prov.

3.6 Statistiska metoder

För varje led och provtagning beräknades medelvärden och standardavvikelse för oorganisk fosfor, organisk fosfor samt totalfosfor. Standardavvikelse beräknades även för de kumulativa värdena.

För att jämföra de olika metoderna och materialen gjordes enklare T-test i Excel. Växtmaterial, metoder samt organisk respektive oorganisk andel fosfor jämfördes separat för att upptäcka signifikanta skillnader med 95% sannolikhet.

4 Resultat

4.1 Fosforfrigörelse vid nedbrytning av växtmaterial utan jord

De uppmätta fosforhalterna i den extraherade vätskan i försöket varierade mellan 3 och 27 mg tot-P l⁻¹ (totalfosfor per liter) vid den första extraktionen och vid de följande extraktionerna blev halterna generellt allt lägre. Till exempel så varierade halterna mellan 1 och 10 mg tot-P l⁻¹ vid extraktion nummer 3. Vid den första extraktionen noterades att koncentrationerna av totalfosfor från färskt gräs var mer än dubbelt så höga som från färsk klöver med 11,6 respektive 3,8 mg tot-P l⁻¹. Vid den andra extraktionen fanns inte någon skillnad mellan gräs och klöver.

För att sätta resultatet mer i ett sammanhang räknades halterna om till mängd frigjord fosfor i relation till mängden växtmaterial. Mängderna räknades sedan om till frigörelsehastighet genom att dividera den frigjorda mängden med antal dagar mellan extraktionerna. Endast totalfosfor kommenteras med statistiska jämförelser. Frigörelsehastigheten är beräknad på medelvärden av de tre upprepningarna för respektive led. Resultaten beskrivs först inom varje behandling, färskt, fryst och torkat. Sedan görs jämförelser mellan de olika behandlingarna och mellan organisk och oorganisk fosfor.

4.2 Färskt växtmaterial

Dag 1

Vid första extraktionen frigjordes 212 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ (milligram totalfosfor per kilogram torrsubstans och dag) från färskt klöver och 484 mg oorg-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ från gräs. Skillnaden var signifikant (p<0,001). Procentuellt motsvarar detta 6 % av det totala fosforinnehållet i klöver och 10 % av det totala fosforinnehållet i gräs.

Dag 1 till 2

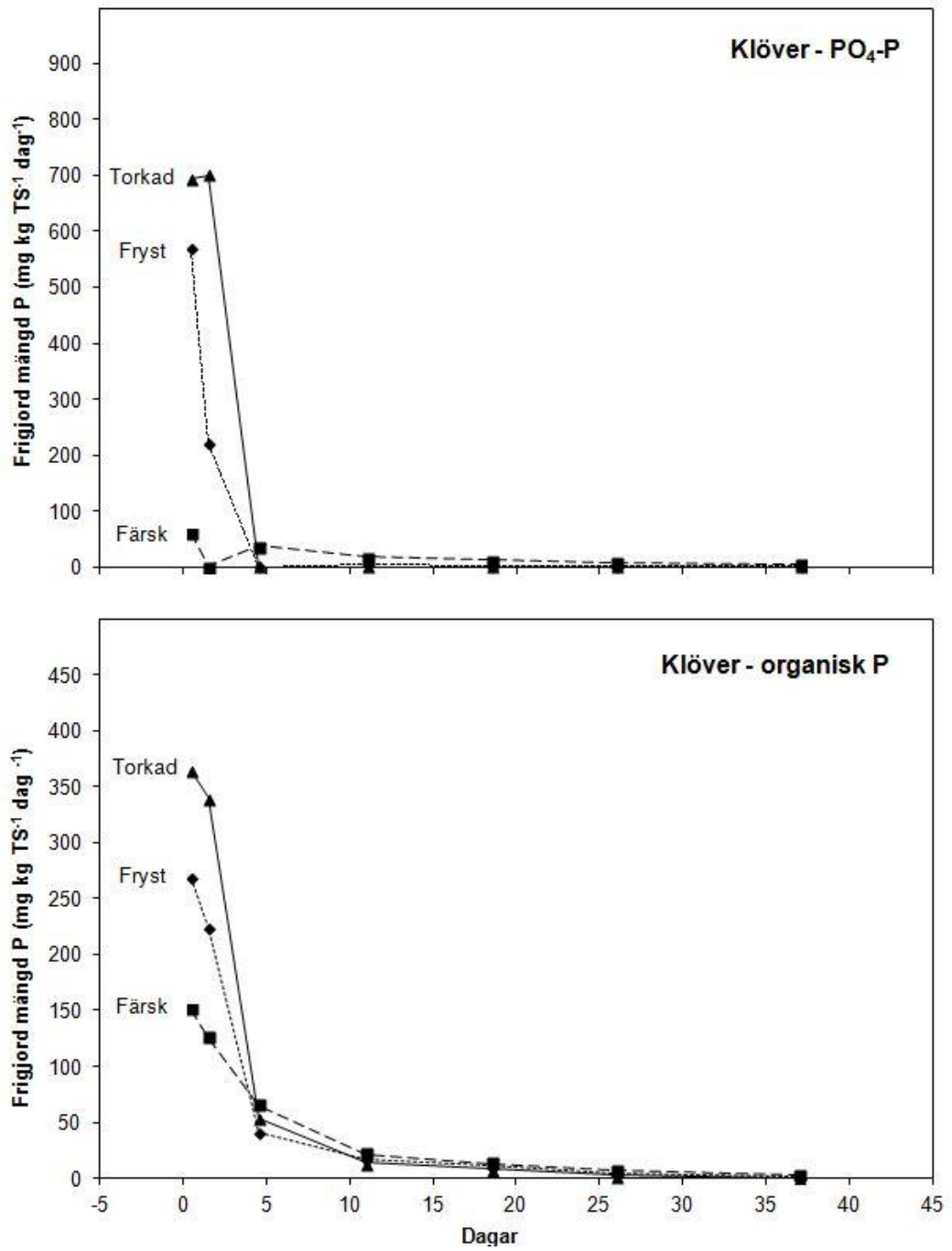
Efter dag 1 redovisas frigörelsen som hastighet genom att den frigjorda mängden fosfor delades med antal dagar som gått sedan den tidigare extraktionen. Från färskt klöver var frigörelsen 127 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ och 114 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ från gräs. Jämfört med dag 1 var frigörelsen alltså betydligt mindre. Frigörelsehastigheten för totalfosfor skiljde sig inte signifikant mellan klöver och gräs (p=0,69), men däremot var det stor skillnad i vilken form fosfor frigjordes från materialen. Från klöver frigjordes nästan uteslutande organisk fosfor, 126 mg org-P kg TS⁻¹ dag⁻¹, medan från gräs frigjorde ungefär lika mycket av båda formerna, 58 respektive 56 mg kg TS⁻¹ dag⁻¹ oorganisk och organisk fosfor (se Figur 3 och 4). Detta redovisas mer ingående i avsnittet Jämförelse mellan organisk och oorganisk fosfor och kumulativa data.

Den kumulativa frigörelsen efter dag 2 uppgick till 338 mg tot-P kg TS⁻¹ för klöver, 9 procent av totala innehållet och 598 mg tot-P kg TS⁻¹ för gräs, 13 procent av det totala innehållet. Skillnaden i frigjord mängd mellan gräs och klöver var signifikant (p=0,02).

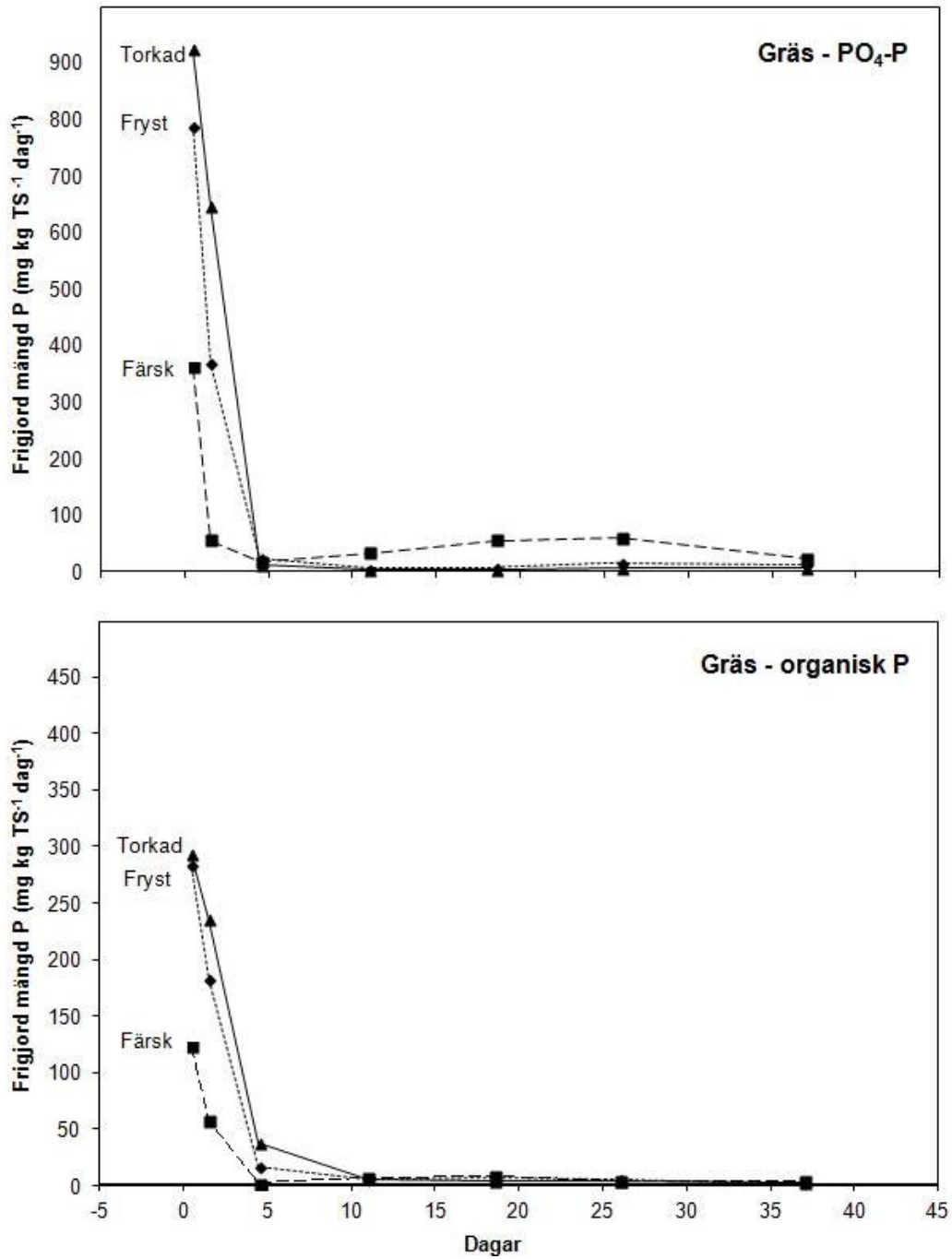
Dag 2 till 7

Mellan dag 2 och 7 var frigörelsehastigheten av totalfosfor från klöver ungefär densamma som mellan dag 1 och 2, 103 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Från gräs minskade frigörelsen markant ner till 19 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Frigörelsen av oorganisk fosfor från klöver, 38 mg oorg-P kg TS⁻¹ dag⁻¹, var högre än vid den tidigare extraktionen och stod för ungefär en tredjedel av den totala frigörelsen. Från gräs frigjordes nästan bara oorganisk fosfor under perioden, 17 mg oorg-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Från dag 2 ända till försökets slut fanns en tydlig trend att från färskt gräs frigjordes den största delen av P som oorganisk fosfor medan från färsk klöver frigjordes lika mycket oorganisk och organisk fosfor (Figur 3 och 4).

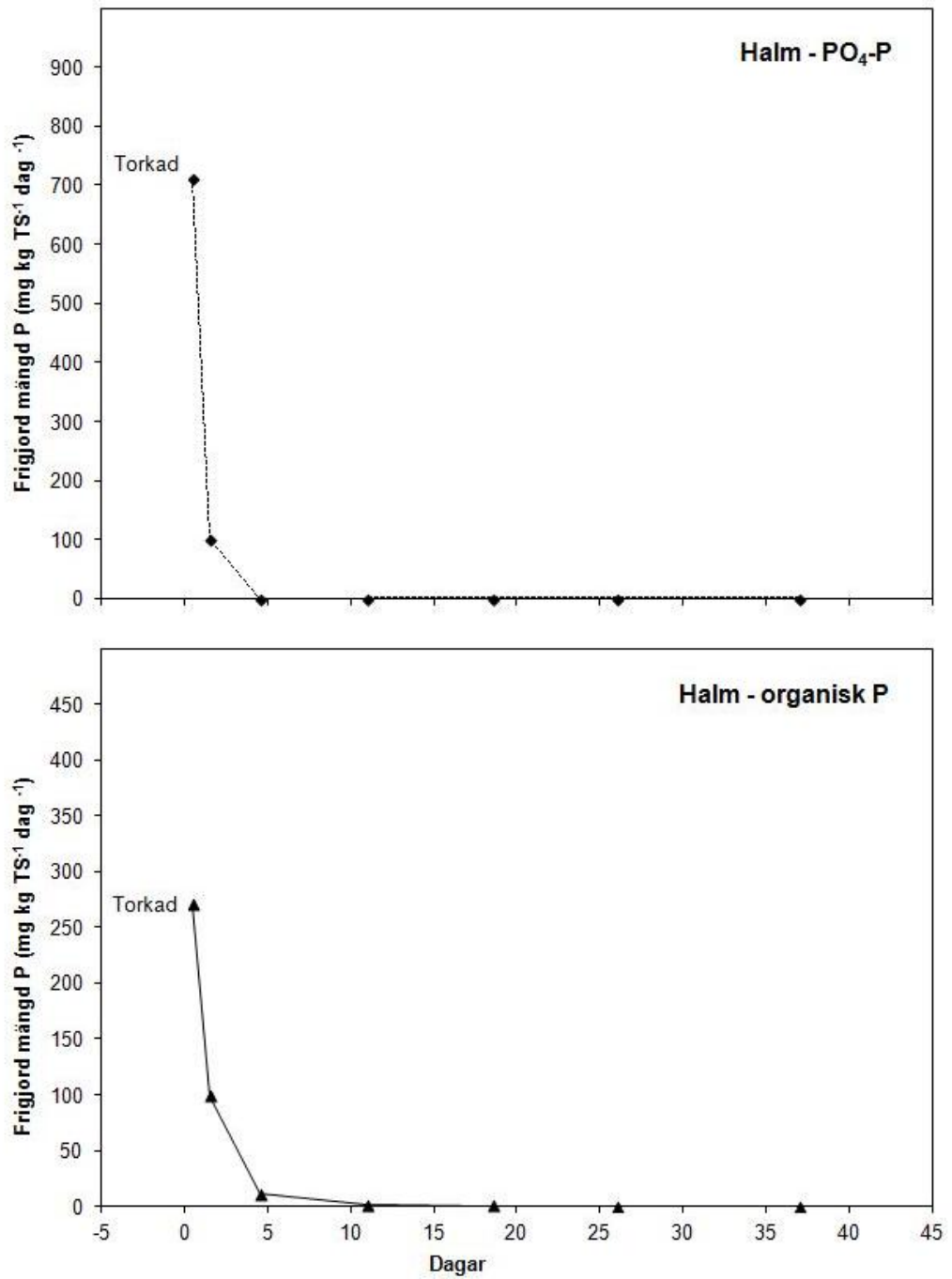
Den kumulativa frigörelsen från färsk klöver uppgick dag sju till 853 mg tot-P kg TS⁻¹ och från färskt gräs 695 mg tot-P kg TS⁻¹, vilket motsvarade 23 respektive 15 procent av det totala innehållet. I figur 3 och 4 kan man se att frigörelsen från klöver fortsatte i hög hastighet fram till dag 7, medan frigörelsen från gräs avstannade mellan dag 2 och 7.



Figur 3. Frigörelse hastighet av oorganisk och organisk fosfor från klöver vid nedbrytning utan jord.



Figur 4. Frigörelse hastighet av oorganisk och organisk fosfor från gräs vid nedbrytning utan jord.



Figur 5. Frigörelse hastighet av oorganisk och organisk fosfor från halm vid nedbrytning utan jord.

Efter dag 7

Mellan dag 7 och 14 var frigörelsen av totalfosfor från färsk klöver lägre än tidigare, med 39 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ och mellan dag 15 och 21 var den ännu lägre, 25 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Mellan dag 22 och 29 var frigörelsen från klöver 14 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ och vid försökets slut var den 8 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹.

Från gräs däremot, ökade frigörelsen av totalfosfor efter dag 7 på grund av högre frigörelse av oorganisk fosfor och låg kvar på en högre nivå ända till försökets slut. Dag 7 till 14 var frigörelsen 41 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹, dag 15 till 21 var frigörelsen 63 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ och dag 22 till 29 var frigörelsen 65 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Sista perioden, dag 30 till 43 var genomsnittliga frigörelsen av totalfosfor från färskt gräs 27 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Den högre frigörelsen från gräs uppmättes i alla tre upprepningar och variationskoefficienterna visar inte på någon tydlig variation mellan upprepningarna, utan varierade mellan 8 till 14 procent under hela tidsserien. För oorganisk fosfor finns inga signifikanta skillnader mellan färsk klöver och färskt gräs fram till dag 14, men efter denna tidpunkt frigör gräs signifikant mer oorganisk fosfor än klöver, vilket även syns tydligt i figur 6 och 7 med kumulativ frigörelse.

Den kumulativa frigörelsen av totalfosfor visade på stora skillnader mellan gräs och klöver under perioden dag 7 till dag 43. I figur 6 och 7 kan man se att frigörelsen från klöver avtog konstant med tiden men att den inte helt slutade. I slutet av försöket hade totalt 1571 mg tot-P kg TS⁻¹ frigjorts, vilket motsvarade 42 procent av det totala P-innehållet i materialet. För gräs framgår av figur 4 hur frigörelsen stannade av efter dag 2 för att sedan öka igen ända fram till dag 21. Efter dag 21 avtog frigörelsen igen och vid försökets slut hade 2355 mg tot-P kg TS⁻¹ frigjorts, vilket motsvarade 50 procent av det totala fosforinnehållet i gräs. Skillnaden mellan frigjord mängd fosfor från gräs och klöver dag 43 var signifikant ($p=0,00$).

4.3 Fryst växtmaterial

Dag 1

Vid första extraktionen frigjordes från de frysta leden med klöver 837 och från gräs 1070 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹, vilket var en signifikant skillnad. Detta motsvarade för båda materialen 23 % av det totala fosforinnehållet.

Dag 1 till 2

Mellan dag 1 och 2 minskade frigörelsehastigheten en hel del. Från klöver frigjordes 444 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ och från gräs 551 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Skillnaden mellan materialen var dock inte signifikant vad gäller totalfosfor.

Den kumulativa frigörelsen dag 2 uppgick till 1281 respektive 1621 mg tot-P kg TS⁻¹ för klöver och gräs. Skillnaden mellan gräs och klöver var inte signifikant (p=0,05). Detta motsvarar 35 procent av klöverns och 34 procent av för gräsets totala fosforinnehåll. Oorganisk fosfor stod för den största delen av frigörelsen från både klöver och gräs, 21 respektive 25 procent.

Dag 2 till 7

Mellan dag 2 och 7 var frigörelsen av totalfosfor mindre än 10 procent av frigörelsen mellan dag 1 och 2 från både fryst klöver och gräs. Från klöver frigjordes 41 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ och från gräs 40 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹, skillnaden var inte signifikant.

Eftersom frigörelsen var betydligt lägre mellan dag 2 och 7 blev inverkan på den kumulativa frigörelsen mindre. Dag sju var den kumulativa frigörelsen från klöver 1486 mg tot-P kg TS⁻¹ och från gräs 1818 mg tot-P kg TS⁻¹, vilket motsvarade 40 respektive 39 procent av det totala fosforinnehållet i materialen, vilket visas i figur 6 och 7. Oorganisk fosfor stod fortfarande för den största andelen från både klöver och gräs, 21 respektive 27 procent av totala innehållet. Klöver låg kvar på samma värde som dag två vilket visar att endast oorganisk fosfor frigjordes från klöver under denna period. Från gräs var frigörelsen jämnare fördelad mellan oorganisk och organisk fosfor och den kumulativa frigörelsen av organisk fosfor ökade till 12 procent, jämfört med 10 procent dag två, vilket var i paritet med ökningen av oorganisk fosfor från 25 till 27 procent av totala fosforinnehållet.

Efter dag 7

Efter dag 7 sjönk frigörelsehastigheten av totalfosfor från fryst klöver stadigt, från 21 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ mellan dag 7 och 14, till 1,5 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ mellan dag 30 och 43. Från fryst gräs ökade istället frigörelsehastigheten från 11 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ mellan dag 7 och 14, till 22 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ mellan dag 22 och 29. Den sista tidsperioden sjönk dock frigörelsen till 15 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Fryst gräs uppvisade alltså liknande dynamik som färskt gräs.

Den kumulativa frigörelsen av totalfosfor skiljde sig mellan gräs och klöver, även om skillnaderna var mindre framträdande än i de färska leden. I figur 6 och 7 kan man tydligt se hur klöver frigör en betydligt större andel fosfor som organisk, medan oorganisk fosfor dominerar hos gräs. I slutet av försöket hade 1805 mg tot-P kg TS⁻¹ frigjorts från fryst klöver, vilket motsvarade 49 procent av det totala fosforinnehållet i klöver. För gräs var motsvarande värde 2393 mg tot-P kg TS⁻¹ vilket motsvarade 51 procent av det totala fosforinnehållet. Skillnaden i frigjord mängd skiljde sig signifikant mellan gräs och klöver (p=0,01).

4.4 Torkat växtmaterial

Dag 1

Vid den första extraktionen frigjordes från de torkade växtmaterial 981 till 1216 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Detta motsvarade 25-29 % av den ursprungliga mängden fosfor i proverna för klöver och gräs, medan det för halm motsvarade 146 % av den ursprungliga uppmätta mängden fosfor. De höga värdena för halm beror på ett osäkert analysvärde av halmens totala fosforinnehåll, vilket kommenteras i diskussionsavsnittet. Inga signifikanta skillnader fanns mellan klöver och halm vad gäller frigjord mängd, däremot mellan gräs och halm respektive, gräs och klöver, där gräs hade ett högre medelvärde (se tabell 2).

Dag 1 till 2

Mellan dag 1 och 2 frigjordes fortsatt stora mängder fosfor från de torkade leden med klöver och gräs. 1040 och 883 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ frigjordes från klöver respektive gräs. Frigörelsen från halm var lägre vid den andra mätningen med 202 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Skillnaderna mellan alla tre material var signifikanta.

Den kumulativa frigörelsen från de torkade leden dag 2 var 2097 mg tot-P kg TS⁻¹ från klöver, 2099 mg tot-P kg TS⁻¹ från gräs och 1183 mg tot-P kg TS⁻¹ från halm. Ingen signifikant skillnad fanns mellan klöver och gräs ($p=0,98$), medan halm skiljde sig signifikant från både klöver och gräs ($p<0,001$).

Dag 2 till 7

Mellan dag 2 och 7 uppgick frigörelsen av totalfosfor till endast en tjugondel av den mellan dag 1 och 2, vilket liknar dynamiken hos de frysta materialen. Från klöver och gräs frigjordes 54 respektive 50 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ medan det från halm endast frigjordes 11 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹. Skillnaden mellan klöver och gräs var ej signifikant.

Den kumulativa frigörelsen ökade inte nämnvärt under perioden, eftersom frigörelsen var låg. Från torkad klöver var den 2367 och från gräs 2349 mg tot-P kg TS⁻¹, vilket motsvarade 64 respektive 50 procent av totala fosforinnehållet. Torkad halm hade dag 7 frigjort 1239 mg tot-P kg TS⁻¹ vilket på grund av en osäker analys av totalfosfor i halm inte relateras till totala fosforinnehållet.

Efter dag 7

Efter dag 7 fortsatte frigörelsen från de torkade materialen att sjunka och låg under 20 mg tot-P kg TS⁻¹ dag⁻¹ för samtliga material.

Den kumulativa frigörelsen av fosfor visade på stora likheter mellan alla tre material. Av figur 6 och 7 framgår det tydligt att nästan all frigörelse skedde under de första dagarna. De slutliga värdena på kumulativ frigörelse blev 2570 mg tot-P kg

TS⁻¹ från klöver, 2703 mg tot-P kg TS⁻¹ från gräs och 1262 mg tot-P kg TS⁻¹ från halm. Skillnaderna mellan klöver och gräs var inte signifikanta ($p=0,18$), men däremot mellan halm och övriga två ($p<0,01$). Detta motsvarade 69 procent för klöver, 57 procent för gräs. Den största skillnaden mellan materialen var att klöver frigjorde nästan lika mycket fosfor i oorganisk som organisk form, 38 respektive 32 procent av totala fosforinnehållet, medan gräs och halm frigjorde fosfor till större del som oorganisk, 39 respektive 18 procent organisk, av totala fosforinnehållet i gräs, vilket även visas i tabell 2.

4.5 Jämförelse mellan färskt, fryst och torkat växtmaterial

Generellt så visade de torkade leden mycket stor frigörelse av fosfor de första två dagarna av försöket, medan frigörelsen under resterande del av försöket var mycket liten. Den kumulativa frigörelsen var även störst från de torkade leden från både klöver, gräs och halm. Detta framgår i tabell 2 och 3.

Från de frysta materialen var frigörelsen dag 1 på samma nivå som från de torkade material, medan frigörelsen redan dag 2 avtog rejält. Efter dag 2 fortsatte frigörelsen på en något högre nivå än från de torkade leden, men denna frigörelse var så liten att den kumulativa frigörelsen i slutet blev lägre från de frysta än från de torkade materialen. Från de frysta materialen var den kumulativa frigörelsen av fosfor ungefär tio procentenheter lägre än från de torkade, trots att frigörelsen var mycket stor i början.

De färsk materialen hade lägst frigörelse i början av försöket jämfört med de andra behandlingarna, men under senare delen av försöket var frigörelsen betydligt större från de färsk leden. Fosfor fortsatte att frigöras i betydande mängd under hela försöket från både färsk klöver och gräs, vilket innebär att den kumulativa frigörelsen blev endast fem procentenheter lägre jämfört med fryst klöver och ungefär lika stor som från fryst gräs.

Skillnaden i frigörelse dag 1 mellan fryst och färsk klöver skiljde sig signifikant, ($p=0,001$) och desamma gällde fryst och färskt gräs ($p<0,001$). För kumulativ frigörelse dag 2 var skillnaden mellan färsk och fryst klöver också signifikant ($p=0,001$) och detsamma gällde gräs ($p<0,001$), vilket tas upp vidare i diskussionsavsnittet.

Tabell 2. Andelen av totalfosfor och fosforformer som frigjordes efter 2 respektive 43 dagars inkubation

Växtmaterial och behandling	Andelen av total P (%)					
	Dag 2			Dag 43		
	<i>Oorganisk</i>	<i>Organisk</i>	<i>Totalt</i>	<i>Oorganisk</i>	<i>Organisk</i>	<i>Totalt</i>
Klöver färsk	2	7	9	16	26	42
Klöver torkad	38	19	57	38	32	69
Klöver fryst	21	13	35	23	26	49
Gräs färskt	9	4	13	41	9	50
Gräs torkat	33	11	45	39	18	57
Gräs fryst	25	10	34	36	15	51

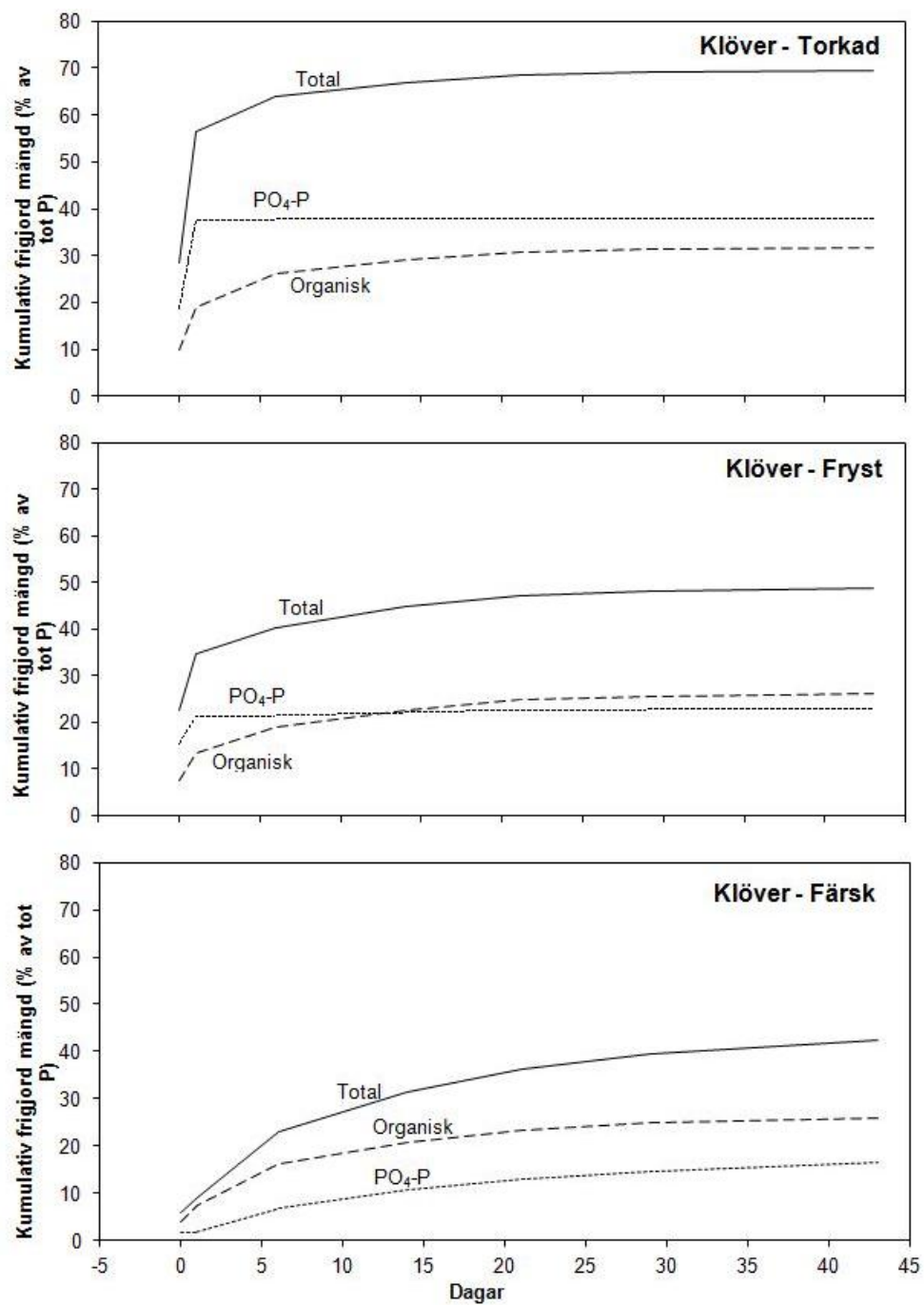
4.6 Jämförelse mellan frigörelse av organisk och oorganisk fosfor samt kumulativa data

I tabell 2 redovisas skillnaden i kumulativ frigörelse mellan oorganisk och organisk fosfor vid dag två och dag 43, i slutet av försöket. Siffrorna anger frigörelse i procent av det totala innehållet i växtmaterialet. I tabellen kan man utläsa att frigörelsen efter dag två från fryst och torkad klöver nästan enbart skedde i form av organisk fosfor, medan frigörelsen från fryst och torkat gräs hade liknande proportioner oorganisk och organisk fosfor som vid dag 2.

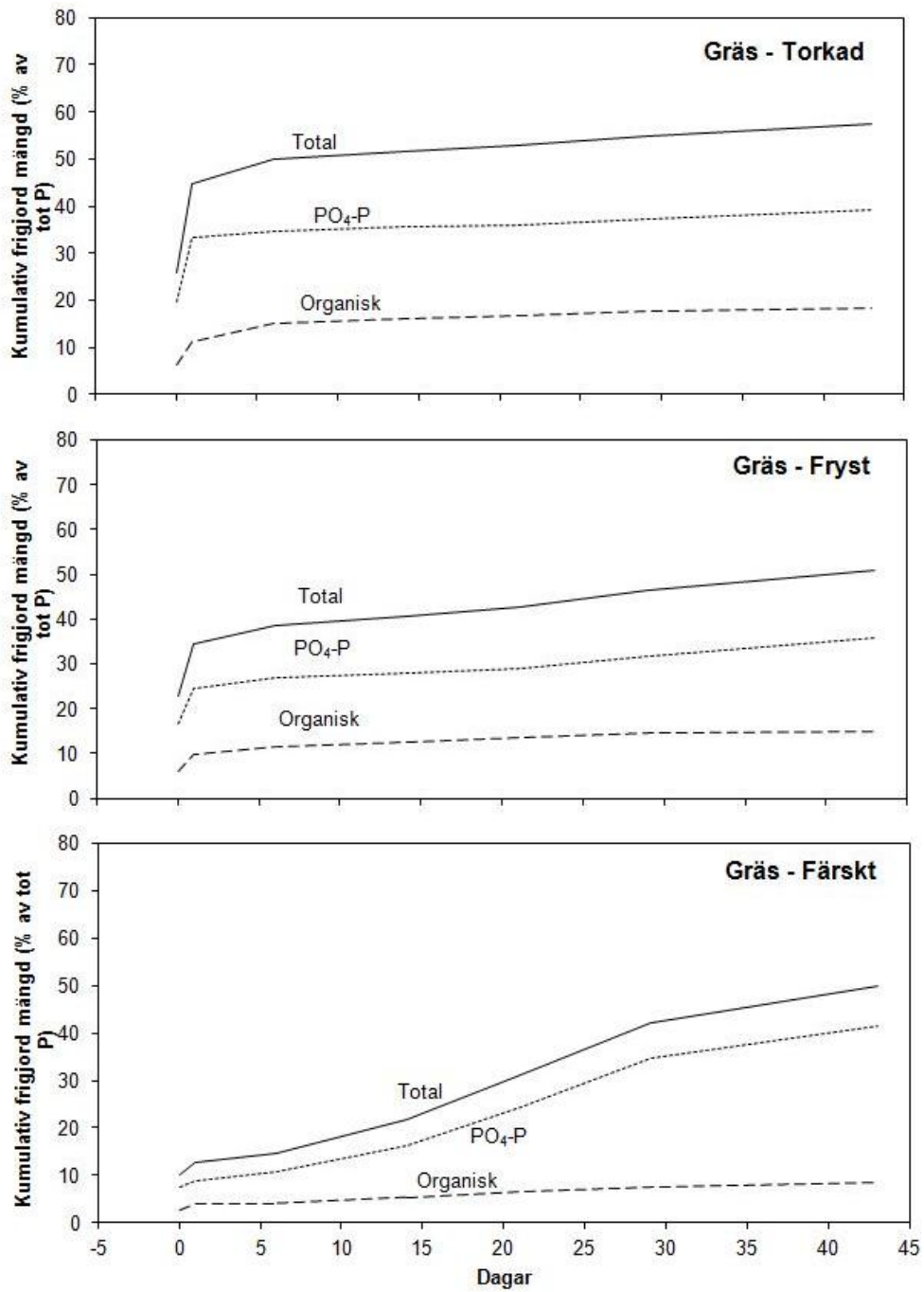
Färskt gräs frigjorde främst oorganisk fosfor mellan dag 2 och 43 och endast mindre mängd organisk fosfor. Detta syns tydligt i den nedersta bilden i figur 7 och det framgår även tidigare i figur 4. Färsk klöver frigjorde däremot både oorganisk och organisk fosfor fram till dag 43.

I figurerna 6 och 7, visas kumulativ frigörelse under hela försöket. Där framgår att klöver, både fryst och torkad, frigjorde ungefär två tredjedelar av fosfor i oorganisk form de första två dagarna, men denna andel minskade under försökets gång och redan efter dag 2 frigjordes nästan enbart organisk fosfor. Den totala frigörelsen var mycket låg i slutet jämfört med i början av försöket, vilket gör att den kumulativa frigörelsen till stor del återspeglas av de första två dagarna.

Från gräs, både fryst och torkat, var andelen oorganisk fosfor större än från klöver genom hela försöket. Från torkat gräs frigjordes ungefär lika mycket oorganisk som organisk fosfor efter dag två. Från fryst gräs frigjordes mer oorganisk fosfor än organisk även efter dag två.



Figur 6. Kumulativ frigörelse av fosfor från klöver över tid i procent av dess totala fosforinnehåll.



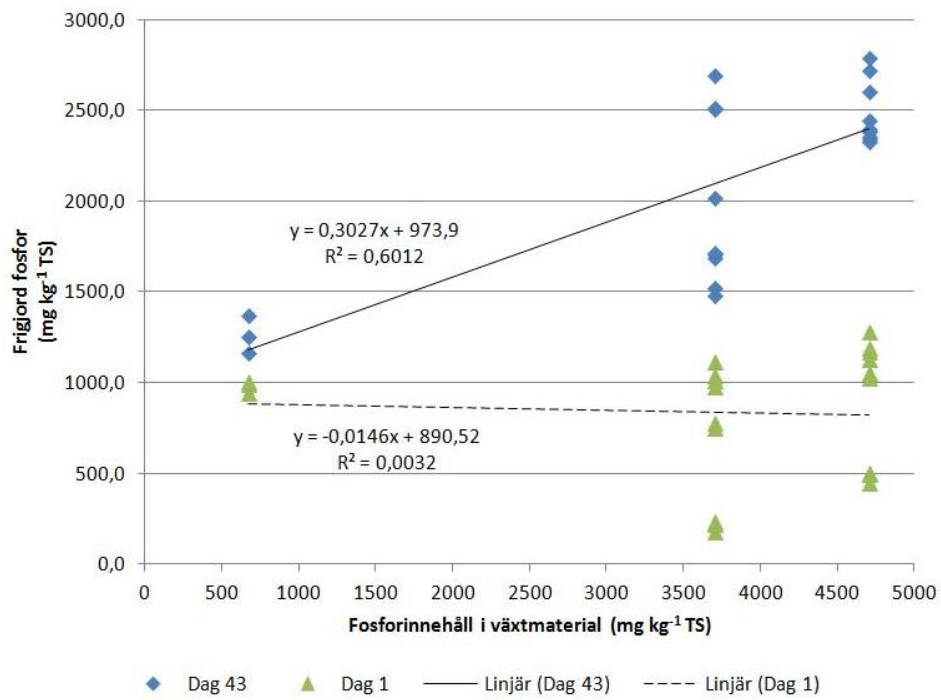
Figur 7. Kumulativ frigörelse av fosfor från gräs över tid i procent av dess totala fosforinnehåll.

Table 3. *Mängden totalfosfor som frigjordes efter 2 respektive 43 dagars inkubation, samt variationskoefficient (cv) mellan tre upprepningar.*

Växtmaterial och behandling	Mängd total P (mg kg tot-P TS ⁻¹)			
	Dag 2		Dag 43	
	Totalfosfor	cv (%)	Totalfosfor	cv (%)
Klöver färsk	338	23,5	1571	8,0
Klöver torkad	2097	4,1	2570	4,1
Klöver fryst	1281	14,3	1805	10,2
Gräs färskt	598	4,8	2355	1,6
Gräs torkat	2099	4,2	2703	3,5
Gräs fryst	1621	5,8	2393	1,9

Variationskoefficient (cv) beräknades för den kumulativa frigörelsen av totalfosfor. Variationskoefficienten visar hur stor standardavvikelsen är i relation till medelvärdet och gör det möjligt att jämföra variationen inom för olika medelvärden. Tabell 3 visar frigjord totalfosfor och den relativa variationen mellan upprepningarna. Tabellen visar att variationen mellan upprepningarna generellt minskade under försöket. Färsk klöver hade störst relativ variation dag två med 23,5 % som sjönk till 8 % dag 43. Motsvarande variationskoefficient för organisk fosfor från färskt gräs var 8,7 % dag två och hade ökat till 9,4 % dag 43 och var en av de få led där cv ökade.

I figur 8 redovisas förhållandet mellan fosforhalt i växtmaterialen och frigjord mängd fosfor. Det högsta fosforinnehållet representerar gräs och det något lägre klöver. Figuren visar att spridningen i frigjord fosfor är störst hos klöver, medan gräs hade mindre variation mellan behandlingarna. Två räta linjer har anpassats till serierna för att visa eventuella samband mellan fosforinnehåll och frigörelse. Linjerna visar att samband finns för total frigjord fosfor dag 43, medan sambandet mellan fosforfrigörelse och fosforinnehåll är svagt efter bara en dags mätning.



Figur 8. Samband mellan fosforinnehåll och kumulativ fosforfrigörelse efter dag 1 och dag 43.

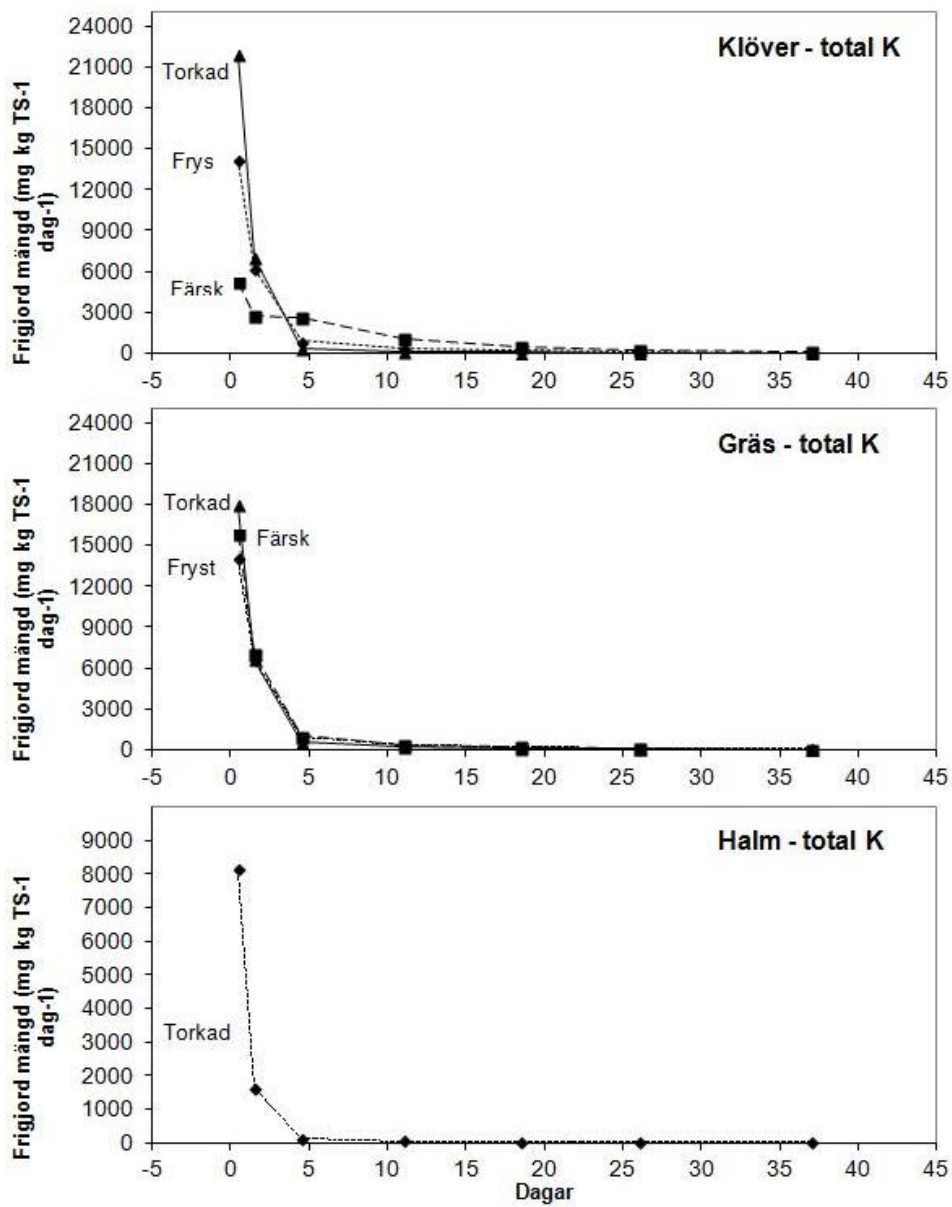
4.7 Frigörelse av kalium

Vid analyserna av totalfosfor analyserades även kaliuminnehållet som referens då kalium är mycket lättlösligt och därför kan ge förklaring till vissa mekanismer som påverkar frigörelsen av fosfor. Resultatet visas på samma sätt som för fosfor i form av frigörelsehastighet i figur 9 nedan. Dynamiken för frigörelsen liknar i stort frigörelsen av fosfor.

Frigörelsen vid första extraktionen varierade mellan 5188 och 21891 mg K kg TS⁻¹ för klöver men bara 13984 till 17924 mg K kg TS⁻¹ för gräs. I stora delar av försöket var variationen mellan behandlingarna mindre hos gräs än hos klöver. Från halm frigjordes 8118 mg K kg TS⁻¹. I tabell 4 visas hur stor andel av totala innehållet av kalium som lakades ut vid första extraktionen samt under hela försöket. Värdena är betydligt högre än för fosfor, där som mest 69 % av innehållet frigjordes från torkad klöver i slutet av försöket. Man kan även se att de färska proverna frigjorde störst andel av kaliuminnehållet, bortsett från halm, där värdena översteg det uppmätta totala innehållet i växtmaterialet. Detta skedde även vad gäller fosfor från halm. Någon källa till felet har inte hittats.

Tabell 4. Kumulativ frigörelse av kalium från klöver, gräs och halm efter 1 dag samt efter 43 dagar

Växtmaterial och behandling	Andel av K (%) dag 1	Andel av K (%) dag 43
Klöver färsk	14,7	101,4
Klöver torkad	62,2	91,5
Klöver fryst	40,3	90,2
Gräs färskt	45,7	98,7
Gräs torkat	51,7	86,4
Gräs fryst	40,4	89,3
Halm	121,4	163,0



Figur 9. Frigörelsehastighet av kalium från klöver, gräs och halm. Notera skillnaderna i skala.

4.8 Frigörelse av svavel

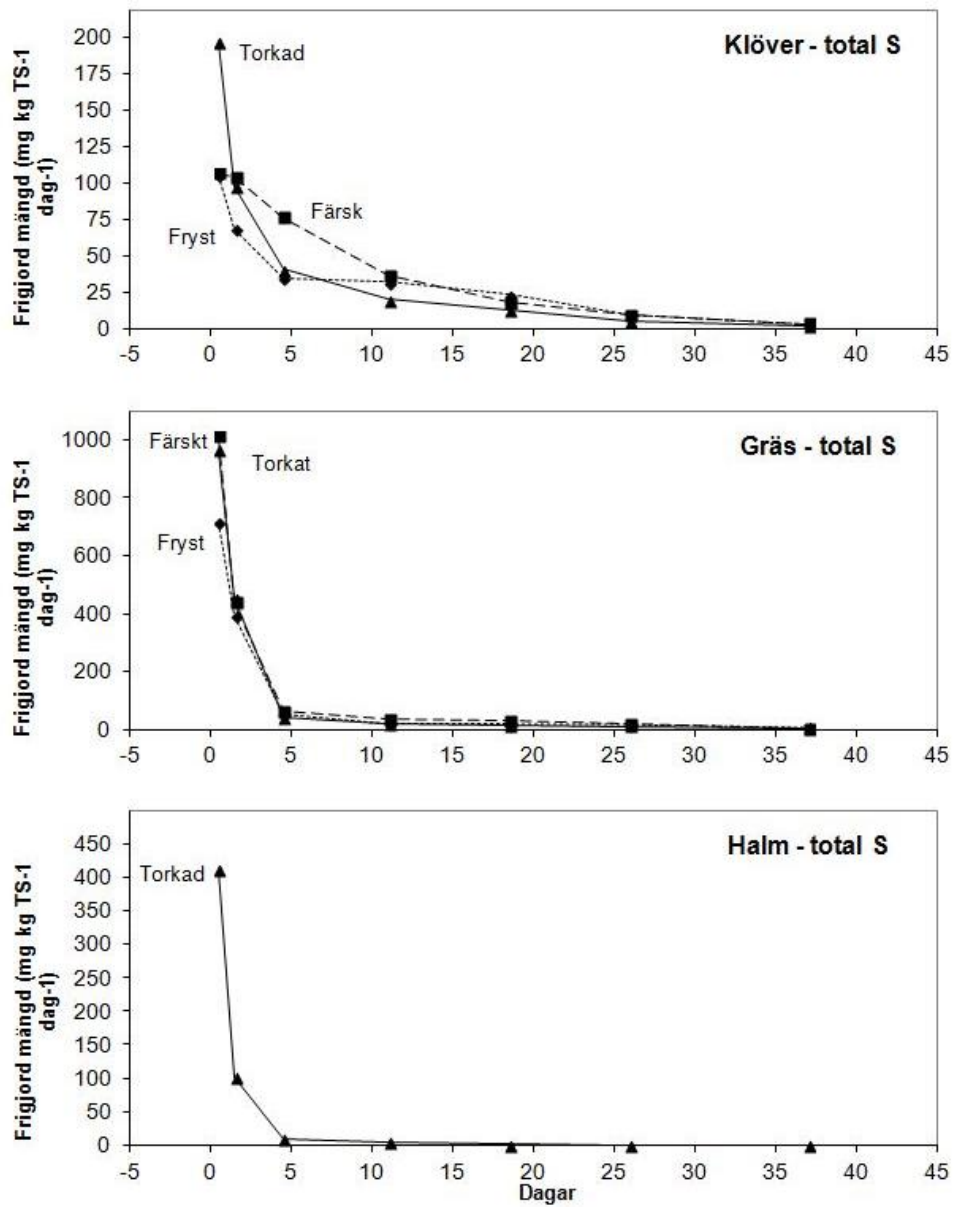
Innehållet av svavel analyserades, liksom för kalium, som en indikator för vad som hände i växtmaterialet under försöket. Svavel som frigjordes kunde både vara som sulfat och i organiskt bunden form. I försöket kunde inte formerna skiljas åt då bara totalhalter i extrakten analyserades.

Frigörelsen vid första extraktionen varierade mellan 105 och 197 mg S kg TS⁻¹ för klöver samt mellan 713 och 1012 mg S kg TS⁻¹ för gräs. Frigörelsen var alltså 5-10 gånger större från gräs vid första extraktionen.

Tabell 5 visar också den stora skillnaden mellan gräs och klöver vid den första extraktionen. Även i slutet av försöket fanns en tydlig skillnad mellan klöver och gräs. Vad gäller halm så var S utlakningen lika stor som från färskt gräs bland de testade materialen.

Tabell 5. Kumulativ frigörelse av svavel dag 1 och 43 från klöver, gräs och halm

Växtmaterial och behandling	Andel av S (%) dag 1	Andel av S (%) dag 43
Klöver färsk	4,5	47,7
Klöver torkad	8,3	34,9
Klöver fryst	4,5	37,3
Gräs färskt	30,3	74,7
Gräs torkat	28,7	59,9
Gräs fryst	21,3	57,5
Halm	48,3	71,5



Figur 10. Frigörelse hastighet av svavel från klöver, gräs och halm. Notera skillnaderna i skala.

5 Diskussion

Försöket visade att en stor andel av fosfor i växtmaterial kan frigöras när det finns vatten närvarande. Frigörelsen går särskilt snabbt i början om växtmaterialet varit fryst eller torkat, där 34-57 % av det totala fosforinnehållet frigjordes under de första två dagarna (medelvärden från tre upprepningar). Detta kan jämföras med 9-13 % hos de färska proverna. I försöken av Bundy et al. (2007) var frigörelsen lägre både från färska (3 %) och frysta proverna (18 %), men vid omväxlande frysning och upptining uppmättes i studien av Bundy et al. (2007) en frigörelse på 43 %, vilket faller inom det intervall som uppmättes i min studie. Även studien av Bechmann et al. (2005) visade på 30 procentiga förluster efter en frys-tö-cykel. Den totala mängden som frigjordes efter 43 dagar var signifikant ($p < 0,007$) större från de torkade proverna (57-69 %) än de frysta och färska (42-51 %), även om en större andel fosfor frigjordes i början av försöket från de frysta proverna. Detta kan jämföras med 50 till 80-procentiga förluster i försöken av Timmons et al. (1970). I flera av försöken som refereras till, som utförts under mer fältmässiga förhållanden, har koncentrationen av fosfor i extraktionsvätskan varit lägre än i detta försök. Studien av Bechmann et al. (2005) med fånggröda visade dock på liknande koncentrationer i lakvatten efter frysning.

5.1 Relevans för praktiskt lantbruk

Förlusterna av fosfor från jordbruksmark är i dagsläget inte ett ekonomiskt problem för jordbruket, då priserna på fosfor inte är tillräckligt höga för att motivera åtgärder enkom för att minska förlusterna. Däremot finns ett växande intresse från samhället att minska fosforförlusterna, både från jordbruk och andra källor som bidrar till övergödning till vattendrag och hav. Resultaten från denna studie kan bidra till ökad förståelse för sambanden kring fosforförluster från ovanjordisk biomassa.

I praktiskt lantbruk finns det många variabler som påverkar övervintrande grödor och det är svårt att direkt applicera resultaten från detta försök på situationer i

praktiken. I följande text diskuteras olika parametrar som kan påverka frigörelsen av fosfor från växtmaterial och även analys kring hur dessa kan skilja mellan detta laboratorieförsök och fältodling.

5.1.1 Sönderdelning av växtmaterial

Materialet sönderdelades till bitar av ca 2 cm längd, vilket normalt inte sker vid odling. Det är troligt att relativt sett mer fosfor frigjordes i början av försöket på grund av tillkommande snittytor, framförallt hos det färska materialet. Jämfört med hela den totala ytan av blad och stjälkar så utgör snitten visserligen en liten del. I diagrammet för frigörelsehastighet kan man se att de färska proverna hade en ganska snabb frigörelse av oorganisk fosfor första dagen men en mycket långsam frigörelse dag två. Det är möjligt att den oorganiska fosfor som frigjordes under dag ett till stor del orsakades av snitten i växtmaterialen.

Något som talar för att snittytor har en betydelse initialt var observationen att frigörelsen från gräs, som hade fler snittytor än klöver var betydligt högre än från klöver. Gräsbladen, som utgör huvuddelen av växten, hade fler snitt, medan klöver hade snitt mestadels genom stammarna, vilka utgjorde mindre än hälften av biomassan. Gräs hade alltså fler snittytor per viktenhet och därmed större exponering vid lakningen med vatten. Något som även stödjer denna teori är att halterna av både oorganisk fosfor, kalium och svavel var högre från färskt gräs än från färsk klöver vid den första extraktionen. Denna skillnad var tydligast för svavel, vilket kan bero på svavel är mindre rörligt i växten och att frigörelsen därmed gynnas extra mycket av många snittytor. Med denna metod föreligger förmodligen en risk att frigörelsen från gräs överskattas, framförallt i början av försöket när frigörelsen är som störst.

Söderklippning eller delning av färskt växtmaterial sker vid några tillfällen i praktiskt lantbruk. Det ena tillfället är vid klippning eller putsning av betesvallar, vilket trasar sönder växtmaterialet på liknande sätt och lämnar växtmaterialet på markytan utan inblandning. Det andra är när man kultiverar med pinnar eller tallrikar, som river sönder växtmaterial i olika grad. Då blandas dock växtresterna med jord och nedbrytningen kan ske i kontakt med jord, vilket ökar sannolikheten att fosfor hinner bindas till partiklar i jorden.

5.1.2 Vattendränkning av växtmaterial före lakning

I detta försök studerades olika extrema situationer för att kunna kvantifiera den potentiella mängden fosfor som kan läcka ut i de värsta fallen under fältförhållanden.

Proverna vattenmättades under 45-60 minuter innan lakning, vilket kan vara längre tid än under fältförhållanden. I fält utsätts växter huvudsakligen för rinnande vatten genom regn. Det händer dock att mark översvämmas i låglänta områden

och då kan och kontakten med vatten vara från dagar till månader. Det kan även vara fryst växtmaterial som översvämmas av smältvatten på våren om marken är frusen eller vattenmättad.

Studien visar klart är att frigörelsen av fosfor ökar vid frysning av växtmaterial jämfört med färskt material. Jämfört med den frysning som växterna utsätts för i naturen var temperatursänkningen i försöket mer extrem, det skedde en mycket snabb sänkning till $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ utan någon chans till acklimatisering för växterna. I naturen kan växterna ofta acklimatisera sig under en period på hösten vilket innebär att fryspunkten i cellerna sänks och särskilda proteiner bildas som skyddar organellerna från isbildning. Detta kan minska risken för fosforutlakning från växtmaterial.

5.1.3 Skillnad mellan klöver och gräs

Den kumulativa frigörelsen av fosfor dag 43 var signifikant större från gräs i färsk- och frysta behandlingar jämfört med klöver. Dag två var skillnaderna inte signifikanta mellan klöver och gräs, varken fryst eller torkad. I de färsk- och frysta proverna var dock den kumulativa frigörelsen från gräs signifikant större även dag två. Med tanke på vad som diskuterats ovan kring behandlingen och uppdelningen av växtproverna så är det dock osäkert att påstå att gräs frigör mer fosfor även under fältförhållanden.

5.1.4 Kvantifiering av fosforfrigörelse

Ett sätt att tolka resultaten från försöket är att sätta uppmätta värden i ett praktiskt perspektiv och att kvantifiera hur mycket fosfor som skulle kunna frigöras från en blandvall med gräs och klöver under hösten och vintern i några räkneexempel. Antag att en hektar vall har en biomassa på ca 1500 kg TS ovanjordiskt växtmaterial på hösten, fördelat mellan 70 % gräs och 30 % klöver, som är en vanlig sammansättning. Fosforinnehållet i vällen beräknas till $4,94\text{ kg P ha}^{-1}$ för gräs och $1,67\text{ kg P ha}^{-1}$ för klöver. Sammanlagt $6,61\text{ kg P ha}^{-1}$ för all ovanjordisk biomassa. Ungefär 150 gram växtmaterial finns på varje kvadratmeter. I detta försök tillsattes vid varje extraktion 50 ml vatten till 1 gram TS vilket då skulle motsvara 7500 ml regn på en kvadratmeter, eller 7,5 mm regn, alltså en kraftig regnskur. Utlakningen med vatten i försöket avspeglar alltså i någon mån verkligheten vad gäller mängden vatten som kommer till åkermarken via regn.

Scenario 1 - Frysning av vall under höst och vinter

Om växtmaterialet utsätts för frysning t.ex. vid snöfattiga förhållanden under vintern kan mycket fosfor frigöras vid senare töväder, särskilt under längre perioder av nederbörd, vilket kan motsvara försökets dag 43 i tabell 2. Om materialet varit fryst skulle frigörelsen kunna bli $3,34\text{ kg fosfor per hektar}$, eller 51 %. Vad som

sedan händer med frigjord fosfor beror givetvis på var det fosforrika lakvattnet tar vägen genom t.ex. infiltration eller ytavrinning.

Scenario 2 – Ytavrinning på 10% av ett fält med vall under vinter/vår

Om man antar att 10 % av ytan under två dagar utsätts för ytavrinning där växtrester kan frigöra fosfor, skulle 150 kg torrsbstans växtmaterial påverkas, innehållande ca 661 g P. Om materialet inte varit fryst skulle ca 79 g P ha⁻¹, eller ca 12 % av innehållet kunna lakas ut om man utgår från fosforfrigörelse i tabell 2. Om materialet dessutom utsätts för frost skulle ca 226 g P ha⁻¹, eller 35 % av P-innehållet kunna frigöras. Då den genomsnittliga utlakningen av fosfor beräknas till ca 400 g P per hektar och år, innebär det att fosforfrigörelse från växtmaterial skulle kunna vara en betydande källa för fosforutlakning från marker där ytavrinning är vanligt förekommande.

De verkliga förlusterna kan dock variera kraftigt och beror bl. a. på hur mycket av fosfor som hinner bindas till jordpartiklar. Vid ytavrinning är det dock förmodligen endast en liten del som hinner bindas till jordpartiklar och räkneexemplen kan vara realistiska.

5.2 Frysning och torkning av växtmaterial – effekter och mekanismer

De olika behandlingarna gav olika resultat på frigörelsen av fosfor. Behandlingarna där växtcellerna mer eller mindre förstördes genom frysning eller torkning resulterade i stor frigörelse av oorganisk fosfor under kort tid. Troligtvis var en stor del av den oorganiska fosfor löst i cellvätskan vilket gjorde att fosfor spolades ut ur cellerna när vatten tillsattes. Frysning verkar inte ha haft lika stark effekt på frigörelsen som torkning, vilket kan bero på att cellens form är mer intakt och att organellerna sitter kvar inuti cellen, även om det finns hål i cellmembranen efter isbildningen. Effekten av torkning är mest troligt att cellen och dess innehåll skruppnar ihop och att även organellerna kollapsar.

Frigörelsen av kalium kan vara en indikator på utbytet mellan cellvätskan och extraktionsvätskan, då det i stort endast finns i löst form i cellvätskan. Från gräs frigjordes nästan lika mycket kalium från både färska, torkade och frysta prover den första dagen. Detta indikerar att utbytet mellan cellvätskan och extraktionsvätskan var nästan lika stort för alla tre metoderna. För klöver däremot var skillnaden mellan metoderna betydligt större, vilket kan bero på att klöverbladen inte var sönderklippta på samma sätt som gräset, vilket diskuterades under avsnittet 'Sönderdelning'.

Källan till den organiska fosfor är svårare att bedöma. Det kan dels vara fosforhaltiga molekyler där fosfor är hårt bunden och inte reagerar vid bestämning

med askorbinsyremetoden, till exempel olika membran, ATP och DNA, dels kan det vara fosfor bunden i bakterier som bryter ner växtmaterialet.

Från halm översteg den kumulativa frigörelsen av fosfor det uppmätta innehållet i materialet med hela 76 % redan vid andra extraktionen och nådde 88 % över uppmätt innehåll i materialet vid sista extraktionen. Dessa höga värden återfanns både i analys med ICP och med askorbinsyra vilket kan tyda på en felaktig analys av halmens ursprungshalt av P. Det skulle kunna bero på att provet som användes för mätning av fosforinnehåll i halmen inte var representativt för hela partiet. Det fanns dock inte några större variationer mellan de analyserade proverna som skulle stödja denna förklaring. Kumulativ frigörelse av kalium från halm uppvisade liknande värden, med 63 % större frigörelse än halmens ursprungliga kaliuminnehåll. De övriga näringsämnen visar dock inte några sådana tendenser.

Från färskt gräs frigjordes allt mer oorganisk fosfor fram till dag 30, vilket inte skedde från något annat prov. Detta hände i samtliga tre upprepningar, med en relativ variation under 10 %, vilket tyder på att samma process pågick i de tre leden. Troligtvis finns orsaken till detta att hitta i nedbrytningsprocessen i kombination med att över 80 % av fosfor fanns kvar i växtmaterialet de första två veckorna av försöket, vilket var betydligt mer än i någon annan behandling.

5.3 Kommentarer om experimentet

Vissa lärdomar drogs i samband med att försöket genomfördes. Det visade sig att glaskulorna som användas som matrix och substitut för jord var allt för stora för att kunna hålla tillräckligt mängd kapillärt vatten. Resultatet blev att proverna torkade ut något mellan extraktionerna. Hur detta påverkade resultatet är svårt att bedöma, men det är möjligt att den bakteriella nedbrytningen gått om proven kunnat hållas fuktiga längre tid.

En annan lärdom var att det kan ta ganska lång tid att förbereda ett försök, även i denna ganska begränsade omfattning. Växtmaterialet som användas samlades troligen in lite för tidigt, vilket gjorde att de färska proverna, som förvarades i kylskåp, redan börjat brytas ned något när försöket började. Konsekvensen av detta är troligen att frigörelsen från de färska proverna blev större under de första dagarna, jämfört med om växtmaterialet samlats in just innan försöket påbörjades. Detta bedöms dock inte påverka slutsatserna från studien, då det trots detta är stor skillnad mellan de färska proven jämfört med både de frysta och torkade.

5.4 Ytterligare kunskapsbehov

En fråga som uppstått är hur fördelningen mellan oorganisk och organisk fosfor från växtmaterial påverkar processerna kring fosforförluster, både vad gäller fast-

läggning i jorden och transport från växtmaterialet till diken och vattendrag. Det är även oklart om det går att hitta organisk fosfor i vattendrag som härstammar från växtmaterial.

För att få en ännu bättre förståelse för fosfordynamiken kan det vara lämpligt att göra liknande försök, men med flera mätpunkter mellan extraktionerna.

6 Slutsatser

- Ungefär hälften av växternas fosforinnehåll kan frigöras inom några veckor vid nedbrytning, både från gräs och klöver. Detta gällde både frysta och färska växter.
- Frysning eller torkning av växtmaterial gör att frigörelsen går betydligt snabbare jämfört med färskt växtmaterial.
- Mängden frigjord organisk fosfor var generellt lägre än oorganisk fosfor, men ändå betydande.
- Fosforfrigörelse från växtmaterial kan vara en betydande källa till utlakad fosfor.

Referenslista

- Alström T., & Wedding B., 2012. *Test av tre nordiska fosforindex för förhållanden i svensk jordbruksmark*. Landskrona: Ekologgruppen
- Aronsson H., Torstensson G., Bergström L., 2007. *Leaching and crop uptake of N, P and K from organic and conventional cropping systems on a clay soil*. *Soil use and Management*, vol 23, 71-81.
- Bechmann M., Kleinman P., Sharpley A., Saporito L., 2005. *Freeze-thaw effects on phosphorus loss in runoff from manured and catch-cropped soils*. *Journal of Environmental Quality*, vol. 34. 2301-2309.
- Bergström L., Torstensson G., Aronsson H., 2006. *Nutrient use efficiencies and leaching of organic and conventional cropping systems in Sweden*. *Agronomy Journal*, vol 98, 603-615.
- Bieleski R., 1973. *Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability*. *Annual Review of Plant Physiology*, vol 24, 225-252.
- Brandt M., Ejhed H., Rapp L., 2008. *Näringsbelastning på Östersjön och Västerhavet 2006*. Stockholm: Naturvårdsverket. Rapport 5815.
- Bundy L., Robertson T., Andraski T., 2007. *Freezing and drying effects on potential plant contributions to phosphorus in runoff*. *Journal of Environmental Quality*, vol 36, 532-539.
- Fogelfors H., 2001. *Växtproduktion i jordbruket*. Borås: LTs förlag.
- Havlin J.L., Beaton J.D., Tisdale S.L. & Nelson W.L. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers*. 6th edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Ivarsson K., 1988. *Fosfor finns i mängd - svår att utnyttja för växten*. Fakta - Mark/växter 1988 nr 12, SLU.
- Johnsson H., Larson M., Lindsjö A., Mårtensson K., Persson K., Torstensson G., 2008. *Läckage av näringsämnen från svensk åkermark*. Stockholm: Naturvårdsverket. Rapport 5823
- Levitt J., 1980. *Responses of plants to environmental stresses, vol 1, Chilling, freezing and high temperature stresses*. Academic press inc.
- Moisander P. H., Steppe T. F., Hall, N. S., Kuparinen J. & Paerl H. W. 2003. *Variability in nitrogen and phosphorus limitation for Baltic Sea phytoplankton during nitrogen-fixing cyanobacterial blooms*. *Marine Ecology Progress Series*, vol 262, 81-95.
- Murphy J. & Riley J.P. 1962. *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters*. *Analytical Chemical Acta*, vol 27,31-36.
- Naturvårdsverket. 2008. *Sveriges åtaganden i baltic sea action plan, delrapport*. Stockholm: Naturvårdsverket. Rapport 5830.
- Redfield A.C. 1964. *Marine plankton and productivity*. *Ecology*, vol 45, 1-897.
- Statistiska centralbyrån, 2012. *Jordbruksstatistisk årsbok*. 225.

- Sturite I., Henrikson T., Breland T., 2007. *Winter losses of nitrogen and phosphorus from Italian ryegrass, meadow fescue and white clover in a northern temperate climate*. Agriculture, Ecosystems and Environment, vol 120, 280-290.
- Timmons D. R., Holt R. F. & Latterell J. J. 1970. *Leaching of crop residues as a source of nutrients in surface runoff water*. Water Resources Research, vol 6, 1367-1375.
- Turner B., Paphazy M., Haygarth P., McKelvie I., 2002. *Inositol phosphates in the environment*. Philosophical Transactions of the Royal Society, London B, vol 357, 449-469.
- Ulén B., Johansson G., Kyllmar K., 2000. *Losses of phosphorus from arable fields in Sweden over twenty-one years*. Uppsala: SLU Aktuellt från SLU Miljödata Nr 52.
- Vattenmyndigheten, 2014. *Förslag på åtgärdsprogram för Norra Östersjöns vattendistrikt 2015-2021*. Länsstyrelsen i Västmanlands län, diarienummer 537-5058-14.
- Webster E., 1970. *Phosphorus in plants*. University of Oklahoma bulletin.

Internetreferenser

- HELCOM. Helsinki Commission. <http://www.helcom.fi/baltic-sea-action-plan/nutrient-reduction-scheme/targets/> 2015-04-21.