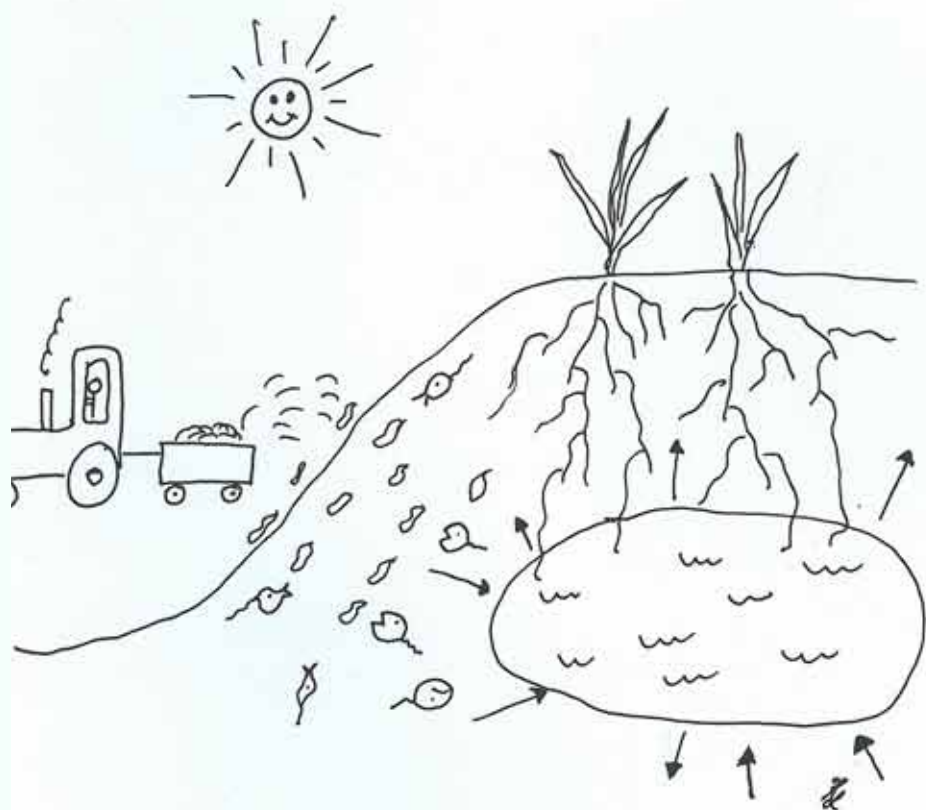


# *Fosfors växttillgänglighet i olika typer av slam, handelsgödsel samt aska*

*Kersti Linderholm*



7-6

Utgiven av VAV AB

**VA-FORSK  
RAPPORT  
1997 • 6**

**VAV-FORSK**

**VAV**

# VA-FORSK

VA-FORSK är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet. FoU-avgiften är för närvarande en krona per kommuninnevånare och år. Avgiften är frivillig och intresset från kommunernas sida har varit mycket stort. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-FORSK initierades gemensamt av Kommunförbundet och VAV. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten  
Ledningsnät  
Avloppsvattenrening  
Ekonomi och organisation  
Utbildning och information

VA-FORSK styrs av en kommitté, som utsetts gemensamt av VAV och Kommunförbundet. Kommittén är underställd VAVs styrelse. Under perioden 1993-1995 har kommittén följande sammansättning:

Hans Mattsson, ordförande	Södertälje
Professor Peter Balmér	GRYAAB, Göteborg
Driftchef Sture Bergström	Gatukontoret, Skellefteå
Enhetschef Bengt Göran Hellström	Stockholm Vatten AB
Kommunalråd Nina Jarlbäck	Eskilstuna
Tekn chef Peeter Maripuu	Lysekil
Ledamot i KS o KF Håkan Mattsson	Ystad
Ledamot i KS Åsa Möller	Sundsvall
VA-chef Bengt L Persson	VA-verket Malmö
Sektionschef Jan Söderström	Sv kommunförbundet
VD Håkan Westerlund	VAV
Forskningschef Jan Falk, sekreterare	VAV

Författaren är ensam ansvarig för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande VAVs ståndpunkt.

VA-FORSK  
VAV AB  
101 53 STOCKHOLM  
Tel: 08-677 25 70  
Fax: 08-677 25 75

*Servicebolag till Svenska Vatten- och Avloppsföreningen*

# ***Fosforns växttillgänglighet i olika typer av slam, handelsgödsel samt aska***

***Kersti Linderholm***

**VA-FORSK  
RAPPORT  
1997 • 6**

VA-FORSK

**VAV**

# VA-FORSKs rapportserie

<b>Rapportens titel:</b>	Fosforns växttillgänglighet i olika typer av slam, handelsgödsel samt aska
<b>Title of the report:</b>	Plant availability of phosphorus in different kinds of sewage sludge, commercial fertilizer and ash
<b>Rapportens beteckning Nr i VA-FORSK-serien:</b>	1997-6
<b>ISSN-nummer:</b>	1102-5638
<b>ISBN-nummer:</b>	91-88392-23-6
<b>Författare:</b>	Kersti Linderholm, Silvbergs Miljöteknik
<b>Utgivare:</b>	VAV AB
<b>VA-FORSK projekt nr:</b>	94-104
<b>Projektets namn:</b>	Fosforns tillgänglighet i avloppsslam
<b>Projektets finansiering:</b>	VA-FORSK, Stora Kvarnsveden AB, Länsstyrelsen i Dalarna
<b>Rapporten beställs från:</b>	AB Svensk Byggtjänst, Litteratortjänst, 113 87, Stockholm, tel 08-457 11 00
<b>Rapportens omfattning</b>	
<b>Sidantal:</b>	68
<b>Format:</b>	A4
<b>Upplaga:</b>	1300
<b>Sökord:</b>	Växttillgänglig fosfor, avloppsslam, fällningskemikalier
<b>Keywords:</b>	Plant available phosphorus, sewage sludge, precipitation chemicals
<b>Sammandrag:</b>	Rapporten behandlar fosforns växttillgänglighet i olika typer av slam. Projektet omfattar litteraturstudie samt fält- och kärlförsök. Försöksleden har varit järnfällt slam, aluminiumfällt slam, kalkfällt slam, biologiskt slam, handelsgödsel fosfor, aska samt kontroll.
<b>Abstract:</b>	The report contains a literature study about plant availability of phosphorus in different kinds of sewage sludge. The report also includes field experiments and pot trials with sludge's precipitated with lime, aluminium or iron, biological sludge, commercial fertilizer and ash.
<b>Målgrupper:</b>	Kommunala VA-tekniska förvaltningar Miljövårdsmyndigheter Jordbrukare/Rådgivare
<b>Utgivningsår:</b>	1997
<b>Pris 1997:</b>	150 kr, exkl moms



## SAMMANFATTNING

Denna rapport, om fosfors växttillgänglighet i olika typer av slam, aska och handelsgödsel, omfattar en litteraturstudie samt redovisning av egna försök. Projektet är huvudsakligen finansierat av Svenska Vatten- och Avloppsverksförbundet.

Fosfor är ett viktigt växtnäringsämne som ingår i arvsmassan och spelar även en avgörande roll vid energiomvandlingen i växter och djur. Fosfor är inte utbytbar mot något annat ämne vid livsmedelsproduktionen. Fosfor finns i begränsad mängd i världen och den brytvärda fosfor bedöms räcka i några hundra år.

Livsmedlens näringsämnen hamnar till stor del i städernas avloppssystem. För att inte våra sjöar och vattendrag skall växa igen på grund av eutrofiering, har många reningsverk byggts ut med kemisk fällning av fosfor. Fällningskemikalierna binder/flockar fosfor som är löst i avloppsvattnet. Det finns även biologiska metoder som tar bort fosfor från avloppsvatten. Dessa är än så länge ovanliga i Sverige, främst på grund av vårt kalla klimat och stränga utsläppsvillkor.

Växtens upptagning av fosfor från mark är mycket komplicerad. Två tredjedelar av markens fosfor finns i den organiska marksubstansen (skörderester, markens mikroliv samt i rester av organiska gödselmedel). Fosfor i det organiska materialet frigörs och blir tillgänglig för växterna allteftersom det organiska materialet bryts ned (mineralisering). Tillförsel av kalk till jordbruksmark kan radikalt påskynda mineraliseringen. Jämviktsreaktionerna för fosfor i mark är långsamma. Sett i ett ögonblicksperspektiv finns endast 0,01 % av markens fosfor löst i markvätskan som fosfatjoner. Det är denna fosfor som för stunden är "växttillgänglig".

Studier, om växttillgänglighet av fosfor i olika typer av slam, kan indelas i analysstudier, odlingsförsök samt kombinationer av dessa. Många av de studerade kärnförsöken hade gödslats med mycket stora mängder fosfor jämfört med växtens behov och det är ofta svårt att urskilja vad som är kväve-, kalk- eller fosforeffekter.

I våra försök har jämförande studier gjorts mellan järnfällt-, aluminiumfällt-, kalkfällt- samt biologiskt slam. Vi har valt en jord som inte har högt fosforinnehåll. I försöken ingår även handelsgödsel, aska och en kontroll utan fosforgödsling. För att kunna skilja på skördehöjande effekter av kväve, fosfor och kalk vid gödning med slam och aska har vi i denna studie så långt det var möjligt gödlat alla leden lika med kväve och kalium och dessutom kompenserat för det kväve som tillförts med slamgödslingen. Försöken är delvis kalkade.

Försöken har visat att den positiva effekten på skörden av kalkfällt slam beror på kalktillförseln till en mark med kalkbehov, mer än av slamgödslingen. Samma kalkeffekt uppnås av att kalka fältet. Kalkning vid annat tillfälle än i samband med slamgödsling, ger mindre kväveförluster från fältet i form av försurande ammoniakavgång till luften.

Första försöksåret var mycket torrt och handelsgödsel fosfor gav en signifikant högre skörd än övriga gödslingar. Andra och tredje året var det inga signifikanta skillnader på skörden mellan gödslingarna. Gödning med slam på våren kan innebära att tiden blir för knapp för att tillräckligt med fosfor för grödans behov skall hinna frigöras från slammet. Ett fält som har låg fosforklass kan behöva en startgiva av en lättillgänglig fosforkälla första året vid slamgödsling.

Tre år är en kort tid för att klarlägga fosfors växttillgänglighet i jorden. Fosforgödsling är långsiktig. Inget har framkommit i försöken som tyder på att någon långsiktig skillnad skulle föreligga mellan de olika fosforgödslingarna, kalkeffekter borträknade.

Växternas försörjning med fosfor i det långa perspektivet är mer beroende av en riktig helhetsbedömning av jordart -gröda - gödning, än av vilken form fosfor har i gödselmedlet.

## SUMMARY

### **Plant availability of phosphorus in different kinds of sewage sludge**

This project is financed by The Swedish Water and Waste Water Works Association. The project includes literature study, field and pot experiments with sludge's precipitated with lime, aluminium or iron and biological sludge. The study also includes commercial fertilizer, ash and a control with no phosphorus added.

The world's resources of phosphorus worth processing, will last between 150 and 300 years, at the present rate of use. This is a short period of time when dealing with such an important nutrient as phosphorus. Phosphorus is necessary when growing crops for animal feed and human food. It is of utmost importance to handle the world's phosphorus assets with care to preserve them from ending up on garbage dumps, being polluted or chemically so strongly bound in the sewage sludge that the plants can not use them as nutrients.

The nutrients from the food digestion goes with the waste water from the toilet to a sewage plant. During the 1970's many treatment plants were supplemented with chemical precipitation of phosphorus, also called tertiary treatment, to avoid heavy eutrophication of lakes and rivers. Usually iron and/or aluminium salts are used as precipitation chemicals, more rarely lime. In chemical sludge we find phosphorus precipitated or flocculated, as different kinds of phosphate or hydroxides.

Lime can radically accelerate mineralization of organic matter in soil. This process releases phosphorus from the biological pool. It can be difficult to determine if an increase in plant available phosphorus is depending on the chemical form of the phosphorus, or the fact that lime is added to the soil. When adding lime to sludge there is always a risk of losing nitrogen as ammonia, which is a loss for agriculture and increases the acidification of the environment. It is also possible to use biological methods to bind the dissolved phosphorus compounds in waste water.

Studies on plant available phosphorus in different kinds of sewage sludge consists of different methods of analysing, pot trials and a few field trials. Most pot trials studying the availability of phosphorus to plants, has been fertilized with very large amounts of phosphorus and/or sludge. It is therefore often difficult to sort out the phosphorous effects from the effects on plant yield from lime and nitrogen.

In our experiments we chose a soil with low phosphorous status and tried to give the crop equal amount of nitrogen, potassium and lime to avoid that other nutrients than phosphorous affected our results. The results showed no difference in the availability of phosphorus in different kinds of sludge's, ash and commercial fertilizer, with one exception. The first year was very dry and the commercial phosphorus fertilizer had a significant better effect. The exceptionally dry conditions between application of fertilizers and plant growth, probably made it difficult for the micro-organisms in the soil to transform the added phosphorous in sludge and ash to available forms. There were no differences between the yield the second and third year. Lime added to the soil, in sludge or separate, did increase the yield and the availability of phosphorus. This effect was probably caused of a increased activity of the fungus and bacteria's in the soil and consequently a increased mineralization.

Three years of field experiments is a short time to clarify the availability of phosphorus in different kind of fertilizers. In the long run however, the crops support of phosphorus, is more dependent of an correct comprehensive judgement on soil type - crop - fertilizer, than what chemical form the phosphorus is in the fertilizer.

## FÖRORD

Fosfor är ett livsnödvärdigt ämne för växter och djur och därmed även för mänsklighetens överlevnad. Fosfor är inte utbytbar mot något annat ämne vid livsmedelsproduktion. Man räknar med att världens brytvärda fosforresurser, med nuvarande användning och hantering av fosfor, räcker 100 - 400 år, beroende på utvecklingsländernas ekonomiska möjligheter att köpa fosfor. Recirkulation av fosfor blir därför en viktig rättvise- och framtidsfråga.

Eftersom en stor del av fosfor som kommer till reningsverken binds med fällningskemikalier är frågan hur fosfor i denna form kan komma växterna tillgodo vid gödsling med slam.

Dalarnas Näringsresursgrupp anlade våren 1993 fältförsök med olika typer av slam. Slam som ingick i försöket var: kalkfällt, aluminiumfällt, järnfällt samt biologiskt slam. 1994 beviljades anslag från VA-Forsk till ett större fältförsök som startades våren 1994 i Långshyttan. I detta försök studerades även fosfortillgängligheten i en bottenaska. Denna del av försöket bekostades av Stora Kvarnsveden AB.

Litteraturstudien, som huvudsakligen är gjord 1995, baseras på litteratur i databaserna Agricola, Agris, Biosis, Cab, Chemical abstracts, Lucas samt Naturvårdsverkets databas. Sökorden har varit "plant available phosphorus", "sewage sludge" och "precipitation chemicals".

Då fosfors markreaktioner är mycket komplicerade, kompletterades fältförsöken med ett kärnförsök som anlades 1995 med samma jord som i Långshyttan.

Projektet leddes av en styrgrupp, kallad "Dalarnas Näringsresursgrupp", som även fungerar som referensgrupp för användning av slam på åkermark (se överenskommelsen mellan Lantbrukarnas Riksförbund, Naturvårdsverket och Svenska Vatten- och Avloppsverksföreningen (41).

I "Dalarnas Näringsresursgrupp" ingår för närvarande:

Dala VA-driftsgrupp:	Tomas Carlsson, Leif Johansson, Stefan Olsson
Hushållningssällskapet Dalarna:	Lennart Hinders
Lantbrukarnas Länsförbund, Dalarna:	Gunnar Olsson
Länsstyrelsen i Dalarna:	Gunilla Streijffert, Lennart Sandgren
Miljötillsynsgrupp från miljökontoren i Dalarna:	Erik Jernelius, Erik Bergman
Silvbergs Miljöteknik:	Kersti Linderholm

I rapporten behandlas endast växtnäringsaspekterna av att använda slam. Undertecknad vill framföra ett varmt tack till alla inblandande för synpunkter, upplåtande av mark och annat värdefullt bistånd.

Ambitionen har varit att rapporten skall kunna läsas av intresserade med olika bakgrund, dvs även de som inte är sakkunniga på växtnäring och markkemi.

Silvberg i mars 1997

Kersti Linderholm



INNEHÅLL	Sid
<b>SAMMANFATTNING</b>	III
<b>SUMMARY</b>	IV
<b>FÖRORD</b>	V
<b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</b>	VI
<b>INLEDNING</b> .....	<b>2</b>
VÄXTNÄRINGSÄMNINGEN, STORA SOM SMÅ .....	2
VÄXTNÄRING I MARK, LUFT OCH GÖDSEL.....	2
TILLGÅNGEN AV DE STORA VÄXTNÄRINGSÄMNINGENA.....	3
<b>LITTERATURSTUDIE</b> .....	<b>4</b>
FOSFOR - EN ÄNDLIG NATURRESURS .....	4
FOSFOR I AVLOPPSSLAM .....	5
<i>Fällning av fosfor i avloppsvatten</i> .....	6
<i>Kalkfälld fosfor- kalkstabilisering av slam</i> .....	7
<i>Biologisk fosforrening av avloppsvatten</i> .....	7
FOSFOR I ASKA .....	8
FOSFOR I MARKEN.....	8
FOSFORNS VÄXTTILLGÅNGLIGHET – SVÅRIGHETER VID UTVÄRDERING AV FÖRSÖK .....	9
ANALYS AV FOSFOR .....	10
ODLINGSFÖRSÖK MED SLAM.....	12
<i>Kärlförsök</i> .....	12
<i>Fältförsök</i> .....	13
ODLINGSFÖRSÖK MED ASKA .....	13
MYKORRHIZANS OCH TUNGMETALLHALTENS INVERKAN PÅ VÄXTENS FOSFORTILLGÅNG.....	14
INVERKAN AV STABILISERING OCH TORKNING PÅ VÄXTTILLGÅNGLIGHETEN AV FOSFOR I SLAM .....	15
MINSKNING AV FOSFORFÖRLUSTER FRÅN FÄLT MED HJÄLP AV FÄLLNINGSKEMIKALIER .....	15
SAMMANFATTANDE SLUTSATSER AV LITTERATURSTUDIEN.....	16
<b>ODLINGSFÖRSÖK INOM FÖRELIGGANDE PROJEKTET</b> .....	<b>16</b>
CENTRALA PROBLEMSTÄLLNINGAR .....	16
SAMMANSTÄLLNING AV FÖRSÖKEN.....	17
<b>FÄLTFÖRSÖK, MATERIAL OCH METODER</b> .....	<b>18</b>
FÖRSÖKENS UPPLÄGGNING.....	18
FÖRSÖKSFÄLT .....	18
ANVÄNDA FOSFORGÖDSELMEDEL.....	19
FÖRSÖKSPLANER .....	19
<b>KÄRLFÖRSÖK, MATERIAL OCH METODER</b> .....	<b>22</b>
<b>RESULTAT, FÄLTFÖRSÖK</b> .....	<b>22</b>
<b>RESULTAT, KÄRLFÖRSÖK</b> .....	<b>26</b>
<b>DISKUSSION</b> .....	<b>27</b>
FOSFORGÖDSLING - SKÖRD .....	27
JORDANALYSER.....	28
<b>SLUTSATSER</b> .....	<b>30</b>
<b>LITTERATUR</b> .....	<b>31</b>
<b>TABELLBILAGA</b> .....	<b>38</b>

## INLEDNING

### *Växtnäringsämnen, stora som små*

De gröna växterna utgör grunden i energins kretslopp. De omvandlar koldioxid och vatten till kolhydrater och syre. Motorn i detta är solens energi. Människor och djur tar vid och andas in syre, äter växternas kolhydrater och får därmed muskelenergi. Med utandningsluften kommer koldioxiden tillbaka till luften.

För att växterna skall kunna växa och bilda ny biomassa fodras god tillgång till vad man brukar kalla makronäringsämnena. Dessa är fosfor, kalium, kväve, kalcium, magnesium och svavel. Utöver makronäringsämnena behöver växterna tillgång till små mängder av järn, mangan, bor, koppar, zink, molybden och kobolt (38). Dessa så kallade mikronäringsämnen deltar framför allt i växtens komplicerade ”styr- och reglersystem”.

Några av de ämnen som är livsnödvändiga tillhör gruppen tungmetaller och kan vara skadliga för växten, människan eller markorganismerna (3,72), om de finns i för stor mängd. Detta gäller exempelvis koppar, zink, mangan och bor. Andra tungmetaller som kadmium, bly och kvicksilver fyller i stort sett aldrig någon positiv funktion i det gröna kretsloppet, utan kan skada olika delar i systemet vid för höga halter (38).

För att en gröda skall kunna ge normal avkastning fodras tillgång till både de ”stora” och ”små” växtnäringsämnena. Vissa ämnen måste finnas i rätt mängder vid rätt tidpunkter. För mycket kväve, exempelvis, kan ge en svårskördad spannmålsgröda som ligger på marken. Mycket kväve i början av växtodlingssäsongen kan ge frodig potatisblast som inte avspeglar kommande knölskörd. Kvävetillgången påverkar även kvalitén av olika grödor, både på gott och ont (37).

### *Växtnäring i mark, luft och gödsel*

Alla växtnäringsämnena förekommer normalt i marken och frigörs när organiskt material bryts ned eller då mineralpartiklar vittrar. Vid produktion av en gröda utan tillförsel av växtnäring är det oftast kväve som begränsar skörden. Förutsatt att man tillför kväve, genom baljväxtbakterier eller gödsling, kan man odla marken i ett antal år. Så småningom börjar skörden avta på grund av brist av något annat ämne (23). Ofta är det då fosfor eller kalium som begränsar skörden. För att undvika en skördesänkning måste man anpassa växtnäringsstillförseln till gröda och jordart, se bild 1.

Växtnäringsstillgången i jorden är mycket beroende av vilken jordart och mullinnehåll marken har. En lerjord har stor förmåga att leverera kalium, men kan ibland fixera kväve (4). Torvjordar kan leverera kväve så det täcker grödans behov (75), men lider ofta brist av mikronäringsämnen. Urbergsmorän kan fastlägga mycket fosfor genom att bilda svårlösliga järn- och aluminiumfosfater (22). Extrema sandjordar har i stort sett ingen växtnäring i lager varför all växtnäring måste tillföras genom gödsel och/eller kvävefixering.

Jordens förmåga att leverera växtnäring beror även på nedbrytningshastigheten av det organiska materialet i jorden (5,60). Kalkningsmedel höjer markens pH (4) och gynnar frigörandet av fosfor och kväve från organiskt material. Ett gammalt talesätt säger att kalken ger rika föräldrar och fattiga barn, vilket innebär att man genom att kalka snabbt utnyttjar markens resurser. Kalkning har även andra effekter såsom minskad tillgänglighet av tungmetaller - även för de metaller som är nödvändiga för växten. En positiv kalkeffekt är att de för växtroten så giftiga fria aluminiumjonerna binds i form av hydroxider (61,62,63).



Klassisk bild över växtens behov av olika ämnen.

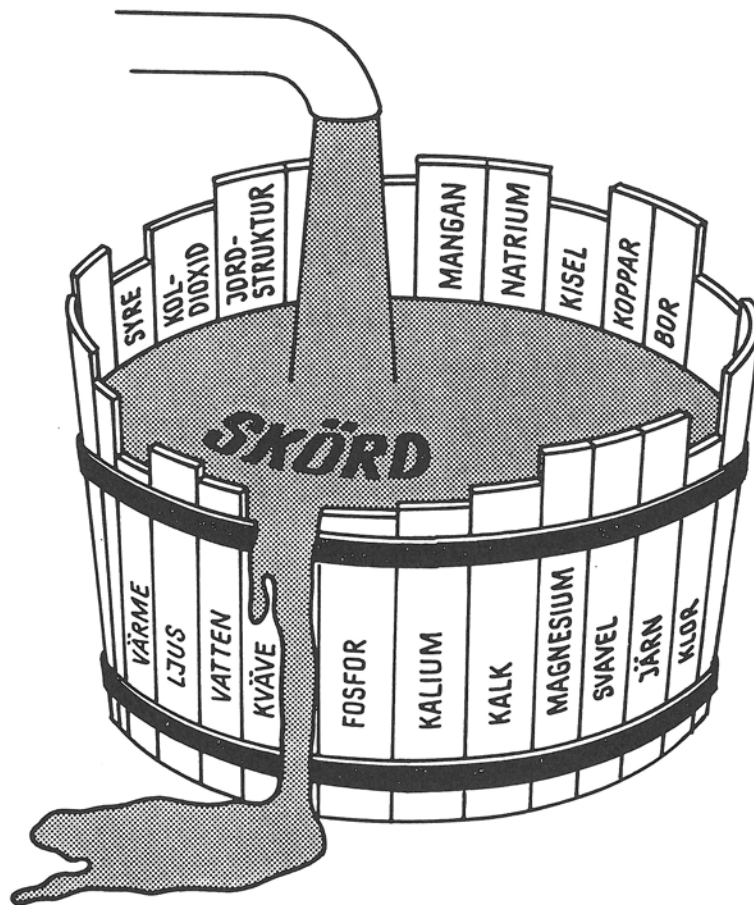


Bild: 1. ”Minimilagen”. Det är den kortaste laggen i tunnan som bestämmer skörden (23).

### ***Tillgången av de stora växtnäringsämnena***

Kväve är det växtnäringsämne som finns inom räckhåll för åkerns gröda genom luftens stora innehåll av kvävgas. Även om kväve i olika former hamnar i sjöar och hav och utgör ett problem där, sker ständigt en omvandling av dessa kväveformer till kvävgas, som går upp i luften. Från luften kan kvävefixerande bakterier och alger och/eller gödselmedelsindustrin hämta kväve och omvandla den till växttillgänglig form (60).

De övriga växtnäringsämnena kommer alla från någon typ av ”naturfyndighet”, mineralisk pool, där ett visst ämne koncentrerats under någon period av jordens livstid. I takt med dagens utvinning av dessa ämnen sprids de och hamnar på ställen och i så låga koncentrationer att de är i stort sett omöjliga att återanvända i livsmedelsproduktionen. I vissa fall är dessa pooler mycket begränsade. Mest kritisk vid produktion av livsmedel är tillgången av brytvärd fosfor (36).

De livsmedel som produceras på åkermark, förtärs och näringsämnen hamnar till stor del i städernas avloppssystem. Fosforutsläpp i vattendrag påskyndar igenväxningen av våra sjöar, vattendrag och havsvikar, eutrofiering. För att minska miljöpåverkan av utsläppen av avloppsvatten, byggdes reningsverken under 1960 och 1970- talen ut med ett ”tredje reningssteg”, sk. kemisk fällning av fosfor. Fällningen sker genom att tillsätta järn och/eller aluminiumsalter, undantagsvis kalk. Vid rätt pH bildas då järn- och aluminiumfosfater samt hydroxider av järn- och aluminium, vilka faller ut. Fosfor binds i vad vi kallar ”kemiskt avloppsslam”. Denna rapport, om fosfors växttillgänglighet, består av två delar - en litteraturgenomgång samt en redovisning av egna försök.

## LITTERATURSTUDIE

### *Fosfor - en ändlig naturresurs*

Fosfor är ett viktigt växtnäringsämne som ingår i arvsmassan, DNA, RNA, och spelar även en avgörande roll vid energiomvandlingen i växter och djur.

Brytvärd fosfor är en ändlig resurs i världen. Fosfor bryts idag främst där havsdjur sedimenterat och bildat fosforfyndigheter. Stora fyndigheter finns i Nordafrika, USA och Ryssland. En del fosfor fås även som biprodukt vid brytning av apatithaltig järnmalm, apatit= $\text{Ca}_5(\text{OH},\text{F})(\text{PO}_4)_3$  (21).

Då brödsäd skördas och tas från åkern, försvinner med den 10- 25 kg fosfor per hektar. Ett hektar är 10000 m<sup>2</sup>. Återföring av avloppsslam till åkermarken är inte tillräckligt för att täcka jordbrukets behov av fosfor, men minskar behovet av fosfor från naturfyndigheter.

### **Fosforbalans för svensk åkermark<sup>1</sup> 1991, kg per hektar (59)**

#### **Tillförsel**

Handelsgödsel	8
Stallgödsel	8
Betesgödsel	1
Utsäde	0,3
Deposition	0,3
Avloppsslam	0,3
Summa	18

#### **Bortförsel**

Skörd	14
Skörderester	0,3
Erosion, läckage	0,3
Summa	14

<sup>1</sup> “Svensk åkermark” omfattar i detta fall total åkerareal för företag med mer än 5,0 ha åker, ej utnyttjad och obrukad åker ingår i arealen ovan.

**Förbrukning av fosfor i handelsgödsel i Sverige och vissa andra länder samt i hela världen 1960, 1970, 1980, 1990. Kg per hektar åker- och permanent betesmark (58)**

	1960	1970	1980	1990
Hela världen	1	2	3	3
Sverige	11	16	6	8
Danmark	16	19	17	14
Finland	16	27	26	20
Norge	20	23	29	16
Frankrike	11	22	25	19
Italien	8	10	18	17
Nederländerna	21	21	18	16
Storbritannien	9	11	10	9
Västtyskland	20	28	30	22
USA	2	4	5	4
Sovjetunionen	1	2	4	6
Indien	..	0,6	3	8

Världens förbrukning av fosfor i handelsgödsel har ökat något de senaste 30 åren och ligger idag på 3 kg fosfor per hektar åker – och permanent betesmark. Högst förbrukning hade 1990 Västtyskland med 22 kg fosfor per hektar, följt av Finland med 20, Frankrike med 19 och Italien med 17 kg fosfor per hektar. I Sverige var 1990 förbrukningen av fosfor i handelsgödsel 8 kg per hektar.

Enligt en sammanställning gjord av världens fosforproducenter (36), räcker de kända brytvärda tillgångarna av fosfor i cirka 3-400 år, med dagens användning. Skulle odlingarna i U-länderna få den fosfor de behöver, räcker de samlade fosfortillgångarna kanske 150 år (73). Detta är ett kort tidsperspektiv när det gäller en så viktig resurs som fosfor. Fosfor är ett grundämne, som inte försvinner. Dagens hantering leder dock till en effektiv utspridning av fosfor. Det är mycket angeläget att hålla kvar fosfor i kretsloppet, så att vi kan odla mat även i framtiden.

### ***Fosfor i avloppsslam***

En stor del av fosfor i våra livsmedel hamnar alltså i reningsverkens slam. Efter avvattning av slammet kan det lätt lagras och hanteras maskinellt. Totala fosformängden i avloppsslam från svenska reningsverk är cirka 5000 ton (50). Detta motsvarar knappt 2 kg fosfor per hektar åkermark.

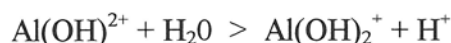
Uppfylls de kvalitetskrav som är uppställda för slam som skall användas som gödselmedel, kan fosfor återanvändas inom livsmedelsproduktionen. Kvalitetskraven omfattar slammets innehåll av tungmetaller, organiska ämnen som PCB, PAH, nonylfenol, samt krav på abonnerter som är anslutna till reingsverket (41). Uppfylls inte kraven på renhet hamnar fosfor på deponi, i aska efter förbränning eller i stadens parker genom anläggningsjord som delvis kan produceras med hjälp avloppsslam. Deponierna kommer kanske i framtiden att betraktas som våra nya fosforresurser, eftersom det blir svårt att återanvända väl utspridd fosfor i anläggningsjord.

## Fällning av fosfor i avloppsvatten

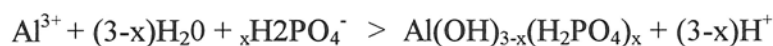
De vanligaste fällningskemikalierna för att binda den fosfor som finns i avloppsvattnet är järn- och/eller aluminiumsalter. Den, storleksmässigt sett, minsta fosforföreningen som finns i avloppsvatten är ortofosfat, orto-P, med andra ord; salterna av fosforsyra  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , som innehåller jonerna  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  eller  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (12). Av den totala fosforinnehållet i avlopp är huvuddelen, 60- 80 %, oftast löst orto-P (12). Orto-P kan fällas/flockas ut med aluminium- och järnsalter.

### *Aluminium som fällningsmedel*

När ett icke-basiskt aluminiumsalt tillsätts avloppsvatten reagerar de omedelbart med överflödet av vattenmolekyler och formar hydrolysisprodukter enligt formlerna:



Om en aluminiumhydrolysisprodukt kommer nära en orto-P-jon så kommer de två jonerna att reagera. Nettoformeln visas nedan:



Som det framgår av formeln sjunker pH-värdet, i och med att vätejoner,  $\text{H}^+$ , frigörs. Om en hydrolysisprodukt inte kommer nära en orto-P-jon eller någon annan laddad enhet, kommer hydrolysisprodukten att fortsätta reagera med överflödet av vattenmolekylerna och forma metallhydroxider. Metallhydroxider kan naturligtvis även formas genom reaktioner med  $\text{OH}^-$  i vatten.

Orto-P kan även bindas och fällas av aluminiumhydroxid. I detta fall ökar pH-värdet, genom att  $\text{OH}^-$ -joner frigörs, enligt formeln:

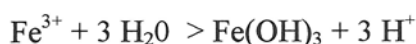
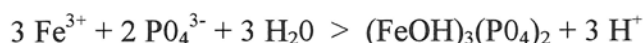


Den dominerande vägen för utfällningen av orto-P i avloppsvatten beror på pH i systemet, vilket salt som tillsätts och hur fort och väl metallsaltet blandas in i avloppsvattnet.

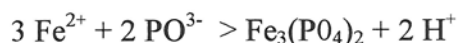
Mekanismen vid utfällningen av polyfosfat är inte riktigt densamma som vid utfällning av ortofosfat. De först tillsatta metalljonerna kommer att komplexbindas och hållas i lösning av polyfosfatjonerna. Först efter att ekvivalent mängd AVR, Al- och Fe(III)sulfat, har tillsatts, fälls polyfosfaterna ut.

### *Järn som fällningsmedel*

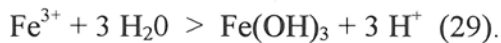
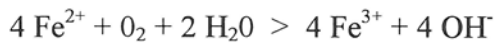
Trevärda järnsalter ger god utfällning av ortofosfat och polyfosfater vid pH 4 - 8 (29). Polyfosfater har P-O-P-bindning. Fosfor- och hydroxidfällning sker enligt formlerna:



Tvåvärt järn kan inte användas för att flocka organisk substans, endast för att binda fosfor:



Detta innebär att järn(II)salter är användbara endast vid simultanutfällning där järnet oxiderar vid luftningen och de bildade hydroxidflockarna avskiljs tillsammans med det biologiska slammet:



Fällningskemikalierna binder/flockar alltså fosfor, som är löst i avloppsvattnet, vid pH-värden mellan 3 och 8. Optimalt pH för reaktionen är mellan 6 och 6,5 (29). Normala pH-värden i jord är mellan 5,7 och 6,5. Bäst utfällning av fosfor med järn och aluminiumsalter får man alltså vid pH-värden som är vanliga i åkermark.

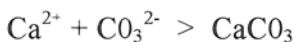
Fällningsprincipen i reningsverken bygger alltså på att de bildade aluminium- och järnfosfaterna/flockarna inte är lösliga vid pH-värden runt 6 som är vanliga i svensk åkerjord. Visserligen blir det surare i jorden runt rothåren på grund av syrabildning, men frågan är om detta är tillräckligt för att frigöra fosfor.

### **Kalkfälld fosfor- kalkstabilisering av slam**

Det finns reningsverk som faller fosfor med släckt kalk.



Dessa kalkfosfater är lösliga vid pH-värden under 8. Då åkrarnas normala pH-värden är under 7 så är det teoretiskt möjligt att kalkfälld fosfor är tillgänglig för växterna i svensk åkerjord. Mängden kalk som går åt vid fällningen bestäms inte av fosforinnehållet utan huvudsakligen av vattnets karbonathalt och alkalinitet. Karbonatet fälls nämligen ut som kalciumkarbonat vid pH över 9 (29).



Detta ökar innehållet av kalciumkarbonat i slammet, men har inget direkt med fosforfällningen att göra. Här bör man observera skillnaden på kalkfällt slam och kalkstabiliserat slam. Om pH höjs till över 11, upphör i praktiken all biologisk aktivitet. Detta förhållande utnyttjas vid kalkstabiliseringen, som innebär att man tillsätter kalk till slam i sådan mängd att pH, även efter lagring i ca 14 dagar, fortfarande överstiger 11. De fosfater och tungmetaller som förekommer i slammet binds mycket hårt av kalken (29). Om släck kalk tillsätts före avvattningen, erhåller man ett slam utan lukt och med starkt förbättrade avvattningsegenskaper. När man tillsätter osläckt kalk efter avvattningen får man en kraftig temperaturstegring i slammet. Genom de höga temperaturerna blir slammet samtidigt steriliserat (29).

Kalkinblandning i slam eller kalkning av åkern i direkt samband med slamgödsling leder till försurande kväveutsläpp. Ammoniumkväve i slam övergår, på grund av det höga pH-värdet, till ammoniak som avdunstar (70). Om däremot slam brukas in i marken separat och kalken läggs vid ett annat tillfälle får man lägre kväveförluster.

### **Biologisk fosforrening av avloppsvatten**

Det finns även biologiska metoder för att ta bort fosfor från avloppsvatten (19). Detta sker genom att stressa mikroorganismer mellan växelvis anaeroba och aeroba miljöer. Före det aeroba luftningssteget införs en anaerob zon. I denna zon förbrukar organismerna den energi som de tidigare lagrat i form av energirika polyfosfatbindningar. Samtidigt går den bundna fosfor åter i lösning under upptagning av lättillgänglig organisk substans (19). Då mikroorganismerna åter kommer till den aeroba zonen lagrar de på nytt fosfor som energirik polyfosfat. Detta brukar kallas för en lyxupptagning av fosfor. Aktivslammet kan efter denna process innehålla upp till 8% fosfor av torrsustans mot i vanliga fall endast 2%. Aktivslam består av levande mikroorganismer. Svårigheten med att hålla en stabil process beror på att fosfor omedelbart går i lösning om slammet utsätts för anaeroba förhållanden i

sedimentationsbassängen eller vid slambehandlingen (33). Slutprodukten blir ett biologiskt slam utan tillsats av fällningskemikalier med järn, kalk eller aluminium.

Den biologiska fosforreduktionen ger vid stabila driftsförhållanden  $P_{tot}$  - värden på 1-2 mg fosfor per liter (P/l) utgående vatten (29). Det höga värdet förklaras bland annat av att suspenderat material i utgående vatten håller höga fosforhalter. Det är möjligt att i praktisk drift uppnå en lägsta halt på 0,5 mg P/l (33). För att ”stadigvarande ” uppnå de utsläppshalter som gäller i Sverige, <0,3- 0,5 mg P/l, skulle det krävas en kontinuerlig och mycket omfattande övervakning av utsläppshalterna, omgående följt av korrigerande ingrepp i processen. För att uppnå en driftsäkerhet och tillräckligt låg halt i utgående vatten måste den biologiska processen troligen kompletteras med kemisk fällning.

### ***Fosfor i aska***

Mängden fosfor i svensk aska kan uppskattas till 1 % av 138000 ton torrsbstans (34, 43), vilket motsvarar cirka 27 % av fosfor i avloppsslam. I dessa mängder ingår trä- och blandaska från skogsindustri och värmeverk men inte de ca 50000 ton aska från uppvärmning av småhus. Vid ökad biobränsleanvändning ökar den totala askmängden i Sverige. Om utvecklingen går mot ökad förbränning av avloppsslam sker en omfördelning av fosfor mellan avloppsslam och aska.

Det är inte dokumenterat vilka fosforföreningar som förekommer i aska. Vissa undersökningar som gjorts med röntgendiffraktionsmetod tyder på att fosfor i träaska förekommer som apatitföreningar och kalciumfosfat. Vid undersökningar av förbränningspannor har man funnit beläggningar som tyder på att fosfor förgasas (76). Detta kan innebära fosforförluster till atmosfären.

### ***Fosfor i marken***

Växtens upptag av fosfor är en mycket komplicerad process. Jämviktsreaktionerna i mark för fosfor är långsamma (60). Trots att marken kan innehålla ett till flera ton fosfor per hektar (60), förmår den bara leverera något tiotal kilo fosfor till grödan årligen. Lättlöslig fosfor, som tillförs som gödselmedel, omvandlas i markens reaktionssystem till svårlösliga föreningar.

Så mycket som två tredjedelar (60) av markens fosfor finns i den organiska marksubstansen (mull, skörderester, mikroorganismer, rester av organiska gödselmedel). Fosfor i det organiska materialet frigörs och blir tillgänglig för växterna allteftersom det organiska materialet bryts ned (mineraliseras). Sett i ett ögonblicksperspektiv finns endast 0,01 % av markens fosfor löst i markvätskan som fosfatjoner. Det är denna fosfor som för stunden är ”växttillgänglig”. I övrigt finns fosfor mer eller mindre hårt bunden i marken (60). Mycket av markens fosfor är kemiskt bunden eller adsorberad till aluminium, järn och kalcium som förekommer naturligt i marken. Vid låga pH i marken är fosfor hårt bunden till aluminium och järn (4). Vid höga pH-värden är det kalciumfosfater som dominerar. Dessa fosforföreningar åldras bland annat genom oxidering och fosfor kan därmed bli mycket svårtillgänglig - ”fixerad” (4).



## Oorganisk fixering av tillsatta fosfater vid varierande pH i jorden.

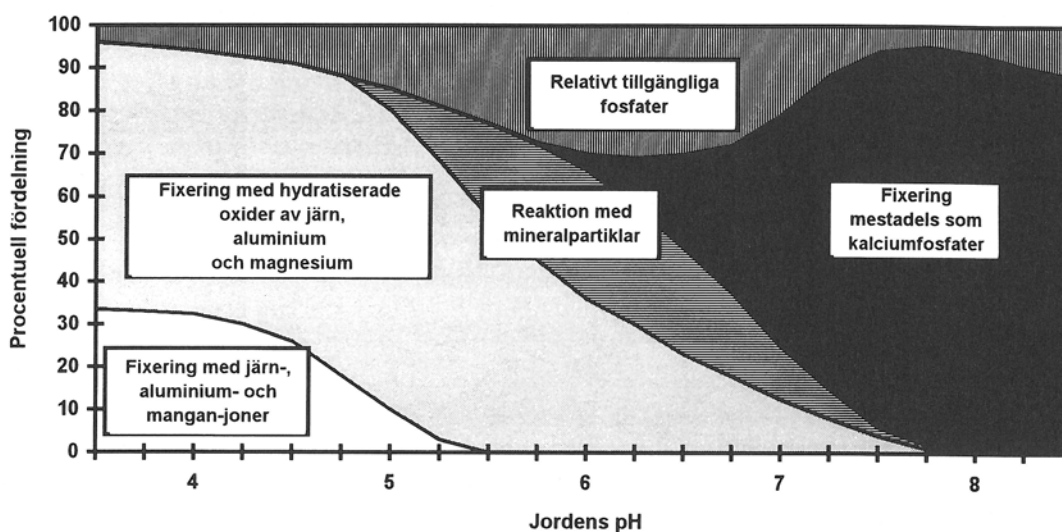


Fig. 1. Oorganisk fixering av tillsatta fosfater vid varierande pH i jorden. En del av den tillsatta fosfor bindes biologiskt och frigörs successivt vid nedbrytningen av organiskt material.(4)

Ottabong och Persson (48) visade att om fosforfixering i jorden eller aluminiumförgiftning av växterna var ett problem, kunde bränd kalciumfosfat försörja växterna med fosfor bättre i ett långt perspektiv än lättlösligt superfosfat. Anledningen var att mindre fosfor fixeras av jorden när ett långsamverkande gödselmedel används. Samma författare visade (49) att stora mängder icke växttillgänglig fosfor idag har ackumulerats i jordarna som ett resultat av många års intensiv gödsling och odling.

Utifrån dessa slutsatser kan man göra bedömningen att växternas försörjning med fosfor i det långa perspektivet är mer beroende av att man gör en riktig helhetsbedömning av systemet jordart - gröda - gödsling, än av vilken form fosfor har i gödselmedlet. Det är dock fortfarande viktigt att den fosfor som ges till jorden inte redan är så hårt bunden att den relativt snabbt hamnar i fraktionen med "fastlagd fosfor" (47).

Jansson (24) visade att på en fosforfattig jord verkade laboratoriefremställd fosforfritt aluminiumslam klart fosforfastläggande. Fosforfritt aluminiumslam sänkte tydligt skörden. Den negativa verkan försvann praktiskt taget helt redan av den lägsta fosforhalten i aluminiumslammet. De fosforrika aluminiumslammens effekt var övervägande positiv.

Tidigare har man visat att lättlöslig fosfor skyddas från fastläggning i jorden genom inblandning av organiskt material (9,17, 39, 60). Fosfor i slam med stor andel organiskt material skulle enligt detta kunna få ett bra skydd mot fastläggning av den fosfor som med tiden frigörs.

### ***Fosfors växttillgänglighet – svårigheter vid utvärdering av försök***

De studier som är gjorda kring fosfors växttillgänglighet i olika typer av slam kan indelas i analysstudier och odlingsförsök samt kombinationer av dessa. Det är svårt att utifrån det studerade materialet dra säkra slutsatser. De främsta anledningarna till detta är att stora fosforgivor genomgående har använts, odlingsperioden har ofta varit kort samt man har sällan

kompenaserat för kväve, kalium, svavel, kalkeffekter mm, som följer med olika typer av gödselmedel.

Den högsta hektargivan som tillämpats i de studerade försöken var 970 kg fosfor i slam + 80 kg i handelsgödsel (68). Denna giva kan jämföras med svenska rekommendationen på 15- 25 kg fosfor per hektar och år (28). Finns fosfor i stort överflöd i jorden och bara ett par grödor skördas, är det svårt att dra slutsatser om fosfortillgängligheten i tillsatt fosfor. Det framgår inte alltid hur fosforlevererande jorden är, vilken typ av slam som använts och vilka mängder gödsel som tillsatts i försöken. Det förekommer att man jämför en liten fosforgiva tillsatt med handelsgödsel med en stor fosforgiva som tillsatts med slam, utan att kompensera mineralgödslingen för det kväve som följde med slamgödslingen. En del av de motstridiga slutsatser som dras av olika forskare kan förklaras av hur försöken har lagts upp.

### *Analys av fosfor*

Eftersom fosfor kan vara så hårt kemiskt bunden att den saknar värde för växterna, vore det bra om det fanns en analys som angav "växttillgängligheten" av fosfor. Tyvärr finns ingen analysmetod som på ett enkelt sätt anger detta. Många olika metoder används världen över för att analysera fosfor i gödselmedel. Vanligtvis används olika extraktionslösningar för att efterlikna markens och växternas förmåga att omvandla fosfor till växttillgänglig sådan.

Fosfor analyseras i slam i Sverige främst som totalfosfor. En vanlig metod på slam är uppslutning med 7 M HNO<sub>3</sub> enligt SS028150 och mätning av fosfor med hjälp av "induktivt kopplad plasma atomemissions spektroskopi", ICP-AES. Totalfosforhalten omfattar både organisk och oorganisk fosfor. Totalfosfor säger således inget om vilken tillgänglighet fosfor har för växterna, utan anger endast vilket totalt innehåll av fosfor det finns i det analyserade materialet.

Vid bedömningar av löslig fosfor i handelsgödsel analyseras gödselmedel ofta med citronsyra. Furrier et al (10) extraherade 57 slam från Schweiz med 2% -ig citronsyralösning. De fann att i medeltal var fosforlösligheten 85 % och att det förelåg en signifikant korrelation mellan totalfosforinnehåll och citronsyralöslig fosfor. Slam med kemiskt fälld fosfor innehöll 90 % citronsyralöslig fosfor. Slam utan kemiskt fälld fosfor innehöll 83% citronsyralöslig fosfor.

Även Saarela (53) mätte lättillgänglig fosfor med 2 %-ig citronsyralösning. I dessa finska försök arbetade man med olika typer av askor. Den svårtillgängliga fosfor mätte man genom att koka provet med 0,5 M HCl. Med spektrofotometer mätte man atomemission från en blandning av saltsyra, perklorosyra och fluorvätesyra, HCl-HClO<sub>4</sub>-HF-extrakt, för att få totalfosfor.

Ohno och Erich (45) mätte citratlöslig fosfor i biobränsleaska enligt protokoll från "Association of Official Analytical Chemists" (71).

Vigerust (68) studerade "ammoniumlaktatlöslig fosfor", P-AL, i jord och slam i slamgödslingförsök i kärl. I försöken studerades järnfällt-, kalkfällt- och aluminiumfällt slam samt mekaniskt slam och en kontroll med handelsgödsel. Han fann att P-AL-talen var högre i jord där järnfällt slam tillförts än där aluminiumfällt slam tillförts. Detta trots att mer fosfor totalt tillförts jorden med aluminiumslam, 440 kg fosfor per hektar, än med järnfällt slam, 280 kg fosfor.

Jokinen (25) analyserade ammoniumacetatlöslig fosfor och kallade det för växttillgänglig fosfor.

Natriumbikarbonatlöslig fosfor,  $\text{NaHCO}_3$ , enligt Olsen (46) har använts av ett flertal forskare (6, 11, 42, 57) som ansett detta vara ett bra mått på hur tillgänglig fosfor är för växterna. Atterwall (2) framförde att natriumbikarbonatlöslig fosfor passade bättre för att analysera fosfor i alkaliska och neutrala jordar än ammoniumlaktatlöslig fosfor. Lambert och Weidensaul (31) fann en hög andel  $\text{NaHCO}_3$ -löslig fosfor efter tillsats av kalkbehandlat slam. Motsvarande ökning kunde man inte finna i fosforupptag hos sojabönor i kärnförsök. Soon och Bates (57) fann natriumbikarbonatlöslig fosfor i högre koncentrationer i slam än i jord gödslad med slam. Detta indikerade att slamfosfor reagerade med jorden och blev mindre tillgänglig.

Vattenlöslig fosfor har även använts (14) för att mäta växttillgängligheten av fosfor.

Det tillämpas även att stegvis lösa ut fosfor. Ottabong och Persson (47) använder en metod enligt Hedley et al (18). Man behandlar jorden med olika starka extraktionsmedel enligt följande:

- Anjonbytare; som byter ut fosfor löst i markvätskan, samt lättutbytbar oorganisk fosfor som är adsorberat på markpartiklarna.
- $\text{NaHCO}_3$ -löslig fosfor; som bland annat löser ut fosfor som är adsorberat på ytan av  $\text{CaCO}_3$  i alkaliska jordar, aluminium- och järnföreningar, organisk fosfor och en del av fosfor i biomassan.
- $\text{NaOH}$ -löslig fosfor; som har låg växttillgänglighet och består främst av adsorberad fosfor innesluten i matriserna av järn och aluminium i marken.
- $\text{HCl}$ -löslig fosfor; som främst består av apatit,  $\text{Ca}_5(\text{OH,F})(\text{PO}_4)_3$ .

Atterwall (2) analyserade jorden i ett försök med järnfällt slam med Hedley-fraktionering. Gödsling med superfosfat ökade anjonbytar-P mer än gödsling med slamfosfor. Han drog slutsatsen att fosfor i superfosfat var mer tillgänglig för växterna än järnfälld slamfosfor.

Hantotiaux et al (16) analyserade fosfor i slam från fyra belgiska reningsverk med olika extraktionsmedel. De fann i dessa slam:

5-15 %	extraherbar fosfor	med $\text{NH}_4\text{Cl}$ (N)	-	lättlöslig fosfor
27-40 %	”	”	”	$\text{NH}_4\text{F}$ (0,5N) - fosfor bunden till aluminium
0-22 %	”	”	”	$\text{NaOH}$ (0,1) - fosfor bunden till järn
5-15 %	”	”	”	$\text{H}_2\text{SO}_4$ (0,5N) - fosfor bunden till kalcium
15-35 %	organisk fosfor			

Man drog slutsatsen att cirka 20 % av totalfosfor var tillgänglig för växterna.

Hani et al (15) gödslade italienskt rajgräs i ett kärnförsök med slam och kom fram till att den fosfor som löses med  $\text{NH}_4\text{Cl}$  tillsammans med den fosfor som löses med  $\text{NH}_4\text{F}$  utgjorde den fosfor som togs upp av växterna. Man drog även slutsatsen att citronsyralöslig fosfor var ett lämpligt mått på växttillgänglig fosfor. Hani observerade även att:

1.  $\text{NH}_4\text{F}$  löste aluminiumfosfat helt, medan järnfosfat löstes till viss del.  
Kalciumfosfat visade ingen reaktion med  $\text{NH}_4\text{F}$ .
2.  $\text{NaOH}$  löste helt fosfor bundet till aluminium och järn, däremot inte alls den som var bunden till kalcium.
3.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  löste kalciumbundna fosfater helt samtidigt som aluminium- och järnfosfat frigjordes.

## *Odlingsförsök med slam*

### **Kärlförsök**

Kärlförsök har utförts i olika typer av kärl, från 0,5 liters krukor upp till 12 liters hinkar. Odlingarna har i de flesta fall utförts i växthus och varierat i längd från 25 dagar till tre växtsäsonger. I de flesta fall har verkan av fosfor i olika slam jämförts med verkan av handelsgödsel fosfor i superfosfat eller monokalciumpfosfat, MCP.

I Finland har Jokinen (25, 26, 27) provat järnfällt, aluminiumfällt, järn + aluminiumfällt och kalkfällt slam samt kalkstabiliserat järn- och aluminiumfällt slam. Grödan var korn och försöket var 2-årigt. Olika jordar ingick i försöket samt gödslingar med och utan kalkning av jorden. Fosforgödslingarna var något olika i försöksbehandlingarna och utgick från maximal tillåten slamgödsling i Finland vid försökstillfället, vilket var 20 ton torrsbstans per hektar. Försöken med 4 olika jordar pågick 1986-87 och ytterligare två jordar testades 1987-88. Sex- liters plastkärl användes.

Jokinen fann att på den använda lerjorden hämmade aluminiumfällt slam grödan första året efter slamgödslingen. Kalkning av jorden förbättrade inte den negativa effekten av det aluminiumfällda slammet. Andra odlingsåret, året efter slamgödslingen, var den negativa effekten borta. Resultaten visade inga stora skillnader mellan de olika slamgödslingarna. Högsta upptaget av fosfor på mineraljord visade växterna som var gödslade med slam fällt med järn + aluminium samt kalkfällt slam. På den organogena jorden gav slam fällt med järn + aluminium högsta fosforupptaget. På den neutrala jorden fanns en tendens till högre fosforupptag i slambgödslingen jämfört med handelsgödsel. På den organogena jorden var fosforupptaget andra året klart lägre än första året efter gödsling med kalkfällt slam. Jokinen förklarade detta med att det lättutbytbara fosfor var uttömd andra året.

Vid ett försök i England (30) odlades raps i 25 dagar. Raps valdes för att den växer fort och har ett litet förråd av fosfor i frö. Aluminiumfällt, järnfällt och kalkfällt slam ingick i försöket. Två jordtyper provades och 8-liters plasthinkar användes. Försöken utfördes under 1982. Effekterna var mycket små på skörden men rapsens fosforhalt påverkades. Författarna kom fram till resultatet att järn- och aluminiumfällda slam hade ungefär halva effekten av handelsgödsel-P. Slutsatsen var att när man använde färskt eller anaerobt lagrat slam, var kalkfällt slam mycket effektivare än slam som var fällt med aluminiumbaserad kemikalie, som i sin tur var något effektivare än järnfällt slam. Det kalkfällda slammet var det enda som ansågs vara effektivt som fosforgödselmedel. Det hade en effektivitet på 111- 136% av MCP. *Att värdena kan bli mer än 100% beror troligen på att kalken ökade mineraliseringen i jorden och därmed frigjordes organiskt bunden fosfor.*

I slutet av 60-talet utfördes i Sverige (24) gödslingsförsök med kemiskt fällda slam. En fosforrik jord samt en fosforfattig jord ingick i försöket. Aluminiumfosfater framställda på laboratorium, samt AVR-fällt slam, provades. AVR var ett fällningsmedel innehållande aluminium- och järnsulfat. Slam från Uppsala blandades in i några av försökskärlen. Grödan var korn. De slutsatser som drogs från försöken var:

- Fosforfri aluminiumhydroxid verkade klart fosforbindande i jorden.
- Järnfälld fosfor visade vid samma molförhållande mellan hydroxid och fosfor något större växttillgänglighet än aluminiumfälld fosfor.
- Aluminiumfällda slam visar: ingen inverkan på grödans fosforupptagning på fosforrik jord men klara positiva effekter på skörd och fosforupptagning på fosforfattig jord.

Gestriing och Jarrel (11) odlade mangold i 8-liters kärl i växthus. Slam fällda med aluminiumsulfat, järnklorid samt kalciumhydroxid ingick. Jordar med olika pH-status jämfördes. Fosfor var inte begränsande i någon av de jordar som valdes. Skörden av mangold var lägst när fosforhandelsgödselmedel användes. Troligtvis beror detta på att de slam som användes har levererat kväve och andra skördehöjande näringsämnen.

Haan (14) genomförde försök med rajgräs med olika fosfor- och kvävegödslingar. Sex-liters krukor med sandjord användes. Experimenten visade att slamfosfor hade en tillgänglighet för växter som varierade mellan 20-100% av effekten av handelsgödsel fosfor. Författarens slutsats var att fosfor i kemiska slam som var fällda med järn- och/eller aluminiumsalter inte var tillgänglig för växter. Kalk förbättrade inte fosfortillgängligheten i kemiskt fällt slam nämnvärt.

Atterwall (2) odlade italienskt rajgräs i 50 dygn och kom fram till att superfosfat var 7,4 - 10 gånger effektivare än järnfällt slam som fosforgödselmedel. Timmermann m fl (65) däremot kom fram till att kemiskt fällt slam hade nästan samma fosforeffekt som mineralgödsel.

Werner et al (69) odlade raps och havre i kärl och drog slutsatsen att fosfor i aluminiumfällt slam var mer löslig än i järnfällt slam. Jämfört med dikalciumfosfat var slamfosfor långsamverkande men verkade tillfredsställande på sur jord, dock inte på neutral jord.

I Danmark (32) odlade Larsen och Damgaard-Larsen italienskt rajgräs i 12-liters plasthinkar. Växttillgängligheten av fosfor i slam fällda med aluminium, järn och kalk samt ett mekaniskt slam jämfördes. Man fann ingen skillnad i fosforeffekt mellan olika slamtyper och handelsgödsel fosfor. Använda jordar var sandjord med pH-värden mellan 5,0-8,5 samt en lerjord med pH-värde mellan 6,5- 7,0.

Vigerust (68) hade, liksom många av de övriga studerade försöken, hög fosforgödsling i slambehandlingarna, upp till 970 kg slamfosfor per hektar. Vigerust kom ändå fram till att man måste räkna med en begränsad gödseffekt av fosfor i slam, 20-40% av lättlöslig handelsgödsel fosfor. Kalkfällt och kalkbehandlat slam hade bättre effekt.

### **Fältförsök**

En av de få studier som gjorts kring slamfosfors tillgänglighet för växter i fält, utfördes vid Universitetet i Kentucky (7). Rödklöver och en svingelart studerades. Pappersbruksslam, avloppsslam samt "små träbitar" jämfördes som gödselmedel. Olika kalkningsnivåer ingick. Det fanns inga signifikanta skillnader mellan de olika fosforgödselmedlen. Fosforfixeringen tenderade att öka vid lågt pH. Slutsatsen var att kortsiktigt kan tillgängligheten av tillförd fosfor öka, genom tillsats av kalk vid slam- eller fosforgödsling

En serie fältförsök startades i Norge 1994 (8). Det norska försöket, som kommer att utvärderas under 1997, är inte upplagt för att enbart utvärdera fosfors växttillgänglighet.

### ***Odlingsförsök med aska***

Gödsling med aska innebär normalt en stor tillförsel av kalium, kalcium och ger en kalkningseffekt. Fosfortillförseln med aska är ofta av mindre betydelse. Kväve finns nästan inte alls i aska. Askans pH- höjande effekt innebär att det kan vara svårt att skilja askans direkta växtnäringseffekter, från effekter av frigjord växtnäring från organiskt material i marken som den ökade mineraliseringen ett kalkningsmedel ger.

I Maine, USA, har Erich och Ohno gjort en del studier på fosfortillgängligheten i vedaska och aska från slamförbränning (44, 45). Jordar som studerades hade låga halter av fosfor. Man

mätte kemiska egenskaper hos jorden efter inblandning av träaska. Mätningarna gjordes efter 30 -300 sekunder (44). Slutsatserna var att fosforns växttillgänglighet i träaska var helt beroende av jordens egenskaper samt att fosforns växttillgänglighet beror på processer som sker över längre tidsperioder än som studerades i dessa försök.

Även i finska kärl- och fältförsök (53, 54) var slutsatsen att fosforns växttillgänglighet i aska beror på jordens egenskaper. I försöken ingick askor från förbränning av trä, torv, bark och kol. På sura torvjordar förmådde askan leverera fosfor till grödan. Den goda verkan man fick av vedaska i bördig lerjord var troligen ett resultat av ökat pH. Erfarenhetsmässigt vet man att ökat pH frigör fosfor i finska jordar. Aska från torvförbränning förmådde inte att höja pH nämnvärt.

### ***Mykorrhizas och tungmetallhaltens inverkan på växtens fosfortillgång***

Mykorrhizasvampar utbildar samverkan, symbios, mellan svamp och rötter hos vissa växter. Vesikulär-arbuskulär mykorrhiza-svamp, VAM, utvecklar symbios med flertalet lantbruksväxter. VAM ökar växtnäringsupptaget från marken till växten. Speciellt kan VAM underlätta upptaget av svårörliga ämnen som fosfor, mangan, molybden och zink (40). Gödsling med lättlöslig fosfor minskar förekomsten av mykorrhiza (31, 40). Mårtensson och Carlgren (40) visade att trots intensiv fosforgödsling finns det kvar sporer i marken som kan bli grunden till en ny mykorrhizapopulation då fosforgödslingen minskar.

Mykorrhizasvamparna kan störas av fällningskemikalier och tungmetaller. Lambert och Weidensaul (31) drog slutsatsen att koppar och zink inhiberade mykorrhizasvampens fosforförsörjning till soyabönor.

Anke et al (1) visade att gödsling med slam minskade mykorrhizainfektionen i rötterna. Hög tungmetallkoncentration vid pH 5,5 gav en signifikant minskning av mykorrhizainfektionen. Vid pH 6,5 var inte minskningen signifikant. Majs och potatis var försöksväxterna.

Vid högre pH i marken är ofta tungmetaller bundna till kalcium och fosfor, vilket kan vara förklaringen till att mykorrhizan fungerar trots hög koncentration av tungmetaller i marken.

Slutsatser ur NUTEK´s rapport "Effekter av askspridning i skogen" var: "Rötter och mykorrhiza tycks vara starkt involverade i både mineralisering och vittring och kan bidra till upplösningen av askan genom att avsöndra sura substanser och komplexbildare intill askpartiklarna. Det är troligt att växterna tar upp en del näring från svårtillgängligt material, utan att den först hamnar i marklösningen eller jonbytessystemet. Granuler som legat ute tre år i Halland omgavs av en tät mycelmatta, troligen mykorrhiza. Svamp hade till och med vuxit in i granuler som legat nedmyllade under humus i två år"(34).

Vid seminariet "Phosphorus balance and utilization in agriculture- towards sustainability", 17-19 mars 1997 i Stockholm, fanns flera föredrag som behandlade mykorrhizasvamparnas betydelse för fosforns växttillgänglighet. Thingstrup och Jakobsen (64) drog slutsatser som:

- Mykorrhizasvampar har stor betydelse för fosfortransporten i åkermark även vid relativt höga fosforhalter i jorden.
- Bildande av mykorrhiza och fosfortransport reduceras av fosforgödsling.
- Mykorrhizasvampar är viktiga komponenter för att uppnå tillräckligt fosforupptag av växter som odlas vid liten tillförsel av fosfor.



### ***Inverkan av stabilisering och torkning på växttillgängligheten av fosfor i slam***

Hinedi, Chang och Lee (20) fann att fosforleveransen från slam var beroende av behandlingen. De extraherade fosfor ur slam med triklorättiksyra följt av NaOH. De fann att aerobt stabiliserat slam hade större mängder av organisk fosfor än oorganisk fosfor, medan fosfor i anaerobt behandlat slam var nästan helt oorganiskt.

Fosfor i färskt orötat slam hade samma tillgänglighet som fosfor i superfosfat i ett försök med spenat och rajgräs (6). Fosfor i de rötade slammen som testades hade en fosfortillgänglighet som motsvarade 60% av superfosfat.

De Haan (14) antog att variationen mellan resultaten från olika forskare avseende slamfosfors tillgänglighet, hade att göra med variationen i vattenhalt. Torkning hade en negativ inverkan på fosfors växttillgänglighet i slam. Även Jansson (24) fann att torkning av aluminiumfällt slam försämrade slamfosfors tillgänglighet för växter.

Kuile et al (30) rangordnade växttillgängligheten av fosfor enligt: handelsgödsel > färskt slam > anaerobt slam > torrt slam oavsett fällningsmedel.

### ***Minskning av fosforförluster från fält med hjälp av fällningskemikalier***

I Arkansas, USA, hade man problem med för mycket höns gödsel i förhållande till åkerarealen. Man gjorde då försök (55) med att tillsätta aluminiumsulfat och järnsulfat till höns gödseln. Kemikalierna var inblandade i proportionerna 1 del kemikalie och 5 delar gödsel, räknat på viktsbasis. Man odlade en svingelart i försöksrutor och hade möjlighet att simulera regn. Rutorna hade storleken 1,52 \* 5,96 m. Tre regnsimuleringar har utfördes; 2, 9 och 16 dagar efter gödsling.

Fällningskemikalierna minskade fosforförlusterna och slutsatsen drogs att man kan sprida gödseln efter grödans kvävebehov istället för efter fosforbehovet. Författarna räknade med att fosfor kan spridas i mycket höga givor utan att ge problem med övergödning av vattendragen.

Enligt svenska och finska studier (5, 35, 66, 67) sker fosforförluster från åkermark främst i form av partikelbunden fosfor, erosion. Detta borde innebära att ökat fosforinnehåll i jorden påverkar förlusterna av fosfor från åkermarken.

### ***Sammanfattande slutsatser av litteraturstudien***

- Om en rättvisare fördelning av fosforgödseln skall ske i världen fodras det en bättre hantering av fosforresurserna i restprodukter såsom slam, avfall och aska.
- Vid kemisk fällning av fosfor i avloppsvatten erhåller man i det bildade slammet en blandning av fosfater, hydroxider, kalciumkarbonater och organisk substans, beroende på vilket fällningsmedel som används, pH och inblandningsmetod.
- Kalkinblandning i slam eller kalkning av åkern i direkt samband med slamgödsling leder till försurande kväveutsläpp till atmosfären. Om däremot slam brukas in i marken separat och kalken läggs vid ett annat tillfälle får man lägre kväveförluster.
- Största delen av markens fosfor finns i organiskt material i marken.
- Vid låga pH-värden i jorden är den mineraliska fosfor hårt bunden till järn och aluminium. Vid höga pH-värden i marken är den mineraliska fosfor hårt bunden till kalcium.
- Det finns ingen internationellt erkänd metod att mäta mängden växttillgänglig fosfor i slam eller mark.
- De studerade kärlförsöken visar inga entydiga resultat vad gäller fosfors växttillgänglighet i olika typer av slam och aska.
- Ytterst få fältförsök finns genomförda som belyser fosfors växttillgänglighet i olika typer av slam och aska.
- Jordens mikroorganismer har stor betydelse för fosforleveransen till växterna både från den organiska och oorganiska fosforpoolen i marken.

### **Odlingsförsök inom föreliggande projektet**

#### ***Centrala problemställningar***

Föreliggande projekts långsiktiga mål är att belysa frågeställningen om fosfors växttillgänglighet i olika gödslingsprodukter under realistiska förhållanden. I många av de försök som vi fann i litteratursökningen hade man använt stora givor fosfor, upp till 1050 kg fosfor per hektar. Årsbehovet för vall och spannmålsgrödor i Mellansverige är cirka 15 kg fosfor per hektar.

I våra försök var tillförseln av fosfor i samma storleksordning som den mängd som förs bort med grödan. Tillsatt fosformängd var lika i alla behandlingarna. Försöksfältet var utvalt bland annat för dess relativt sett låga fosforinnehåll i jorden. Det är viktigt att genomföra gödslingsförsök i fält under naturliga betingelser. Kärlförsök är ofta svårtolkade och tillväxtförhållandena helt annorlunda jämfört med dem som råder i fält. Å andra sidan är det naturligtvis inte möjligt att styra klimatet i fält, vilket man kan göra vid kärlförsök som odlas i växthus.

Några försök i litteraturstudien antyder att fosfor var mest tillgänglig för växter i kalkfält slam. Det är dock inte självklart om det beror på att kalkbunden fosfor är lättillgänglig, eller om det var så att kalktillförseln ökade nedbrytningen av organiskt material i jorden. Vid ökad nedbrytning av jordens organiska material frigörs fosfor och kväve från växtrester, humus och döda mikroorganismer och detta ökar markförrådet av mineralisk fosfor och kväve.

Kväve är det växtnäringsämne som i regel påverkar skörderesultatet kraftigast. I många försök med slam, speciellt de med stora slamgivor, är det svårt att skilja ut vad som är kväveeffekter och vad som beror på andra effekter av slammet.

Det finns teorier att handelsgödsel fosfor som tillförs som superfosfat är utsatt för fastläggning i marken. Anledningen skulle vara att pH-värdena blir mycket låga runt gödselkornet i marken och man får aluminium- och järnfosfater. Organiskt material tillsatt i samband med handelsgödseln skulle teoretiskt skydda fosfor mot fastläggning (9, 17, 39, 60). Detta är bakgrunden till ett av vi anlade en försöksbehandling med torv + fosforlösning, Superba P-Mag, i vilken fosfor fanns i form av fosfatjoner.

### ***Sammanställning av försöken***

Försök som har genomförts inom detta projekt kan sammanfattas enligt följande:

#### Fältförsök 1993-1996 i Änge och Björänget

##### Försöksbehandlingar:

Ingen P-gödsling = kontroll  
Järnfällt slam  
Aluminiumfällt slam  
Kalkfällt slam  
Biologiskt slam  
Handelsgödsel fosfor

##### Kalkad upprepning av försöket

Nej

#### Fältförsök 1994-1996 i Långshyttan

##### Försöksbehandlingar:

Ingen P-gödsling = kontroll  
Järnfällt slam  
Aluminiumfällt slam  
Kalkfällt slam  
Biologiskt slam  
Handelsgödsel fosfor  
Aska

##### Kalkad upprepning av försöket

Ja

#### Kärlförsök 1995-1996

##### Försöksbehandlingar:

Ingen P-gödsling = kontroll  
Järnfällt slam  
Aluminiumfällt slam  
Kalkfällt slam  
Biologiskt slam  
Handelsgödsel fosfor  
Aska

##### Kalkad upprepning av försöket

Nej

## Fältförsök, material och metoder

### *Försökens uppläggning*

För att komma närmare ett klarläggande om slamfosfors växttillgänglighet lades försöken upp så att alla behandlingar fick lika stor mängd fosfor per ytenhet oavsett vilket gödselmedel som användes. Ett kontroll utan fosfor, fanns med i både fält- och kärlförsöken.

För att inte tillgången på andra viktiga växtnäringsämnen skulle inverka på skörderesultaten, gödslades alla behandlingar lika med kväve och kalium. Utöver detta gödslades med extra kväve för att kompensera för kväveinnehållet i de olika slammen. Kompensation skedde för både direktverkande kväve, främst ammoniumkväve, och frigörelse av biologiskt bundet kväve. Det biologiska slammet hade störst kväveleverans och fick inget extra kvävetillskott. Övriga behandlingar kompenserades så långt det var teoretiskt möjligt. 1996 skedde, av ekonomiska skäl, ingen kompensationsgödsling för mineraliserat kväve.

Ett mindre omfattande fältförsök påbörjades 1993. I ett försök som startades 1994 gavs möjligheter att besvara frågan om kalkens tidvis positiva effekt berodde på att fosfor var kalciumbunden eller om effekterna berodde på att kalken ökade omsättningshastigheten av organiskt material i marken. För att undvika negativa effekter av kalken, såsom fastläggning av fosfor och spårämnen, tillfördes med en relativt måttlig giva kalk, 2500 kg kalkstensmjöl/ha.

### *Försöksfält*

En svårighet vid anläggningen av denna typ av fältförsök är att finna en åker som inte har högt fosforinnehåll naturligt eller genom uppgödsling. Dessutom måste den vara lämplig för försöksändamål och tillräckligt stor att rymma alla försöksbehandlingar. För att mäta jordens fosforinnehåll valde vi att använda de vanliga metoderna vid markkartering i Sverige, svårslöslig fosfor mätt som P-HCL och lättlöslig fosfor mätt som P-AL. Sibbesen (56) visade att dessa metoder lämpade sig för svenska jordar med normala pH-värden.

Vi fann att metoden med små rutor inte passade för långsiktiga försök med slam och aska. Risken bedömdes för stor att jordbearbetningen skulle flytta jord och gödselrester.

Efter noggranna markundersökningar beslutades att välja alternativet med tre separata försöksplatser för de försök som startade 1993 och lägga ut ett block per åker. Ett av dessa försök ströks på grund av problem med bland annat kvickrot. De fält som följdes under 1993-96 låg i Änge, Smedjebacken med jordarten måttligt mullhaltig mjälilig lättlera, mmh mj LL och i Björänget, Stora Skedvi med jordarten något mullhaltig lerig moig mjäla, nmh L mo Mj.

När möjlighet gavs 1994 att fortsätta fältförsöken om fosfors växttillgänglighet i slam, valdes en åker i Långshyttan som tillät tre upprepningar av varje behandling samt därtill en kalkning av försöket. Jordarten var något mullhalig mjälilig mellanlera, nmh mj ML.

Gården i Björänget började att läggas om till ”alternativ odling” 1982 och var helt omlagd 1987. Numera heter odlingsformen ”ekologisk odling” och gården levererar KRAV-märkt mjölk. Av denna anledning har vi inte gödslat fältet efter 1994 med mineralgödsel. Med de regler som gäller idag för ekologisk odling inom EU är det inte tillåtet att använda avloppsslam som gödselmedel.

Markdata från försöksfälten i Änge, Smedjebacken och Björänget, St. Skedvi, finns i tabell B i bilagan. Markdata från Långshyttan finns i tabell C samt siktkurva på jorden i D i tabellbilagan.

Ett kärlförsök anlades våren 1995 med samma jord och gödsling som den okalkade delen av försöket i Långshyttan. Kärlden placerades i växthus odlingssäsongerna 1995 och 1996.

### *Använda fosforgödselmedel*

<u>fosfor- gödselmedel</u>	<u>produktionsplats</u>	<u>fällningsmedel/metod</u>
Järnfällt slam Aluminiumfällt slam	Borlänge "Fagersta" Sågmyra	järnklorid AVR (aluminium och järnsulfat) 8,2 vikts % aluminium, 1 v. % järn
Kalkfällt slam, 1993 Kalkfällt slam, 1994 Biologiskt slam	Idre Nås Kvarnsvedens pappersbruk	Släckt kalk+järnklorid Släckt kalk Aktivt slam+ liten mängd järnklorid
Handelsgödsel fosfor, 1993 Supra P 20 Handelsgödsel fosfor, 1994 Supra P 9 Aska	Kvarnsvedens pappersbruk	bottenaska, från en snedrost m. panntuber, förbränning av träbränsle, slam, kol

Analysvärden finns i tabell A i bilagan.

### *Försöksplaner*

#### **Fältförsök startat 1994, Långshyttan**

	Fosfor kg/ha	Kväve kg/ha *	Kalium kg/ha
- Utan fosfor (OP)	0	55 + 15	40
- Järnfällt slam (Järf.)	45	55 + 10	40
- Aluminiumfällt slam (Alfält)	45	55 + 10	40
- Kalkfällt slam	45	55 + 10	40
- Biologiskt slam (Biol.)	45	55 + 0	40
- Handelsgödsel fosfor (Hgd-P)	45	55 + 15	40
- Torv + handelsg. fosfor (Torv+P)	45	55 + 15	40
- Aska	45	55 + 15	40

\* Extra kväve för att kompensera för kväveinnehållet i de olika slammen. Kompensation skedde för både direktverkande kväve, främst ammoniumkväve, och frigörelse av biologiskt bundet kväve.

Varje försöksruta delades mitt itu och ena halvan kalkades med 2500 kg kalkstensmjöl per hektar. 3 upprepningar gjordes av varje behandling.

Beskrivning och analyser på slam och aska finns i tabell A. Försöket såddes med Sveahavre den 16/5. Plantprover i vipp-/axgång, togs i juli 1994 och 1995.

### ***Radioaktivt märkt fosfor***

Metoden att använda radioaktivt märkt växtnäring (13) är svår att använda men kan ge ledtrådar om växtnäringsupptaget. Tillstånd erhöles för att använda radioaktivt märkt fosfor,  $^{32}\text{P}$ . Denna isotop har en halveringstid på 14 dagar så provtagning måste ske tidigt på plantprover för att tekniken skulle vara möjlig att använda.

Den 17/5 märktes  $1\text{ m}^2$  i varje parcell med  $32\text{ P}$  i den okalkade delen av försöket i Långshyttan. En fjärdedel av den märkta ytan,  $0,25\text{ m}^2$ , skördades 27 juli och transporterades direkt till SLU för analysering.

Samma dag togs även vanliga plantprover ut från försöket och analyserades med avseende på lämpliga växtnäringsämnen.

### ***Nederbörd***

Nederbörden mättes av försöksvärden Bengt Lindqvist vid brukningscentrum, Samuelsdals gård.

Nederbörd under växtodlingssäsongen 1994 -1996

	1994	1995	1996
	mm	mm	mm
Maj	14	64 (före sådd)	55
Juni	46	90 (efter sådd)	31
Juli	31	32	63
Augusti	47	48	106
September	126	31	21
Sådd	16 maj	7 juni	3 juni
Skörd	2 sep.	26 sep.	28 sep.



### Försöken i Björänget och Änge, anläggning 1993

	Fosfor kg/ha	Kväve kg/ha *	Kalium kg/ha
- Utan fosfor	0	60 + 8	45
- Järnfällt slam	15	60 + 6	45
- Aluminiumfällt slam	15	60 + 7	45
- Kalkfällt slam	15	60 + 6	45
- Biologiskt slam	15	60 + 0	45
- Handelsgödsel fosfor	15	60 + 8	45

samt i Björänget:

- Alternativt odlat grüngödsling 1992

I Björänget var grundgödslingen 50 kg kväve och 38 kg kalium/ha.

\* Extra kväve för att kompensera för kväveinnehållet i de olika slammen.

”Alternativt odlat” fanns endast i Björänget och utgjorde gårdens egen gödsling och ingick inte enligt planerna i försöket. Vi ansåg dock det intressant att mäta skörden från denna odling och skördade den i samband med försöksskörden. ”Grüngödsling” innebar att inget tillskott av kväve utöver det som kvävefixerande bakterier band till grödan och jorden.

Analysen på använt slam finns i tabell A i bilagan. Grödan som odlades 1993 var korn på båda platserna.

### 1994 - 1996

#### *Björänget:*

Fältet såddes in med vallfrö den 1/6 1994. Mineralgödsel med 40 kg kväve + 30 kg kalium radmyllades till hela försöket utom ”alternativt odlat” som fick 15-20 ton fast nötgödsel per hektar.

Den extremt torra sommaren 1994, gav en dålig utveckling av vallarna. Fältet putsades och en liten skörd togs, cirka 400 kg torrsubbans per hektar. Denna skörd provtogs ej.

Vallen skördades 2 gånger 1995 och 1996. Gödsling skedde med 15-20 ton urin från nötkreatur, det vill säga enbart kväve och kaliumgödsling, till återväxten 1996, lika till hela försöksfältet.

#### *Änge:*

Markdata från Änge visade normala värden för området. Trots detta var grödan påtagligt hämmad 1993. Markproverna från 12/3 var uttagna med maskin enligt linjekarteringsprincip, vilket innebär provtagning efter fältets diagonal. Misstankar väcktes att fältet var fläckvis mycket ojämnt vad gällde kalkbehovet. Jordprover togs ut och analyserades på fritt aluminium, pH mm. Några av markproverna hade höga halter fria aluminiumjoner, Al-AS (61, 62, 63). Högsta värdet var 5,7 mg fria aluminiumjoner per 100 g lufttorr jord. Detta visade på

kalkbehov i Änge och hela fältet kalkades hösten 1993 med 5 ton dolomitkalk per hektar (0-1,5 mm).

Våren 1994 såddes persisk klöver för gröngödsling och ingen mineralgödsel tillfördes. Någon bortförsel av gröda från fältet skedde inte 1994.

1995 odlades Adamohavre. Fältet gödslades med 60 kg kväve +45 kg kalium. Gödseln radmyllades med kombimaskin. 1996 lades fältet i "KRAV-karens" med vallinsådd. Någon provtagning av skörden skedde inte 1996.

Jordprov togs hösten 1996 i Björänget och Änge, se tabell B.

### **Kärlförsök, material och metoder**

Kärlen var av plast och hade en yta på 0,27 dm<sup>2</sup> tillgänglig för odling. Jorden togs från försöksfältet i Långshyttan och jordarten var något mullhalig mjällig mellanlera, nmh mj ML.

Alla behandlingar fick 45 kg fosfor per hektar utom "utan fosfor" som inte fick någon fosforgödsling. Tillförseln beräknades efter ytan på kärnen.

Behandlingarna var:

Utan fosfor (0P)

Järnfällt slam (Järf.)

Aluminiumfällt slam (Alfält)

Kalkfällt slam

Biologiskt slam (Biol.)

Handelsgödsel fosfor (Hgd-P)

Torv + handelsg. fosfor (Torv+P)

Aska

Varje behandling hade tre upprepningar. Slam och aska som användes i försöken finns redovisade i tabell A. 120 frön av Westerwoldiskt rajgräs såddes i varje kärl. Alla kärnen gödslades lika med kväve och kalium, så att brist av dessa växtnäringsämnen inte skulle påverka skörden. 120 kg kväve och 90 kg kalium per hektar gavs 4 gånger per säsong med vattenlösning. Totala växtnäringsstillförseln var alltså cirka 480 kg kväve och 360 kg kalium per hektar.

5 skördar togs 1995 och 6 skördar togs 1996.

### **Resultat, fältförsök**

Försöket analyserades som ett rad- och kolumnförsök i tre block. Skörderesultaten och analyseringen i sin helhet presenteras i tabell G, H samt för skördeår 1994 i tabell I 1-5, skördeår 1995 i tabell J och K samt skördeår 1996 i tabell L och M i bilagan.

## Långshyttan 1994, 1:a året efter fosforgödning

Plantanalyser togs den 27 juli. Växtnäringshalterna finns i tabell E i bilagan. Inga signifikanta skillnader fanns mellan behandlingarna i analysvärdena. Någon mängdmätning gjordes inte i detta stadium.

Gödslingen med torv + handelsgödsel fosfor var inte möjligt att anlägga tillfredsställande. Att blanda fosforlösningen med torv gick bra, men att sprida produkten jämt var inte möjligt med de metoder vi använde. Resultaten från torvbehandlingen var inte planerat att analyseras. Då sommaren 1994 blev så torr och utslagen av lättlöslig handelsgödsel var så markanta, var det dock intressant att även följa denna behandling. Skördarna från torvbehandlingen följde samma mönster som handelsgödselbehandlingen under försöksperioden. Resultaten presenteras dock inte här.

## Uppmätta skördeeffekter

Skörderesultaten presenteras i sin helhet i bilagan tabell G. Den statistiska beräkningen återfinns i bilagan i tabell H och I a - e. Allmänt var skördenivån låg, 1700- 2600 kg ts kärna per hektar, troligtvis på grund av torka under sommaren .

Skörden av havrekärna var signifikant högre i handelsgödselbehandlingen ( $p=0,0001$ ) än i kontroll och där slam tillförts ( $p=0,0001-0,0077$ ). Detta gällde även mängden kg kväve i kärna ( $p=0,0001-0,0009$ ) och kg fosfor i kärna ( $p=0,0001-0,0049$ ).

Järnfällt slam gav signifikant lägre kärnskörd än bioslam ( $p=0,0317$ ), handelsgödsel ( $p=0,0001$ ) samt aska ( $p=0,0002$ ). Aluminiumfällt slam gav signifikant lägre skörd än handelsgödsel ( $p=0,0003$ ) och aska ( $p=0,0007$ ). Kalkfällt slam gav signifikant lägre skörd än handelsgödsel ( $p=0,0029$ ) och aska ( $p=0,0077$ ). Vi fann ingen signifikant skillnad mellan järnfällt-, aluminiumfällt- och kalkfällt slam på kärnskörd. Däremot gav det kalkfällda slammet signifikant högre skörd än kontroll ( $p=0,0153$ ) vilket inte järn- och aluminiumfällt slam gjorde.

Totalskörd, kärna plus halm, av kväve var signifikant högre i handelsgödselbehandlingen än kontroll ( $p=0,0004$ ), järnfällt slam ( $p=0,0010$ ), aluminiumfällt slam ( $p=0,0023$ ) och kalkfällt slam ( $p=0,0169$ ).

Totalskörd, kärna plus halm, av fosfor följde samma mönster som totalskörd av kväve. Handelsgödsel fosfor gav signifikant högre skörd av fosfor i kärna och halm än kontroll och järnfällt slam ( $p=0,0001$ ), aluminiumfällt slam ( $p=0,0002$ ), kalkfällt slam ( $p=0,0140$ ) och bioslam ( $p=0,0240$ ). Bioslamgödning gav signifikant högre totalskörd av fosfor än kontroll ( $p=0,0047$ ), Järnfällt slam ( $p=0,0080$ ) och aluminiumfällt slam ( $p=0,0306$ ).

Den troliga orsaken till att slamfosfor inte gav märkbar effekt första året var att den torra sommaren försvårade mineraliseringen av slamgödseln. Vid torr väderlek är det viktigt för grödan att ha lättlöslig näring eftersom markens mikroorganismer inte arbetar normalt. Nederbördssiffror finns ovan under "Fältförsök, material och metoder".

Trots den torra sommaren kunde man se en positiv effekt av kalken. Kalken höjde skörden i alla gödselbehandlingarna, men höjningen var inte signifikant. Gödslingen med bioslam gav signifikant högre kväveavkastning i halmskörd i kalkade behandlingar jämfört med okalkat ( $p=0,001$ ). Det är logiskt att kalkningen gynnade en frigörelse av bioslammets biologiskt bundna kväve. Eftersom sommaren var torr kom troligtvis mineraliseringen igång sent och en god kvävetillgång i marken sent på säsongen visade sig i halmskörd. Att askan avkastade nästan lika som handelsgödsel fosfor kan bero på askans kalkverkan.

### Synbara effekter i fältförsök

I mitten på juli syntes det tydligt att havren, som var gödslad med handelsgödsel fosfor, var kraftigare än övriga parceller, se bild 2. Samma tendens fanns i behandlingen med torv + handelsgödsel. Havren som var sådd runt försöket var också märkbart kraftigare. Då det föreföll osannolikt att en fosforeffekt kunde synas så tydligt, misstänkte vi att det var en svaveleffekt som gjorde havren så pass kraftig i handelsgödselbehandlingen.

Svavelinnehållet i P-20, som användes som handelsgödsel, var 2 %. Detta innebar en gödsling på 4,5 kg svavel per hektar i handelsgödselbehandlingen. Gödselmedlet som hade använts på havren runt försöket var NPK 20-3-5, 20 % kväve, 3 % fosfor, 5% kalium, och det innehöll 0 % svavel. Med ledning av dessa uppgifter är det troligt att den synbart kraftigare utvecklingen i handelsgödselbehandlingen var en effekt av fosfor.

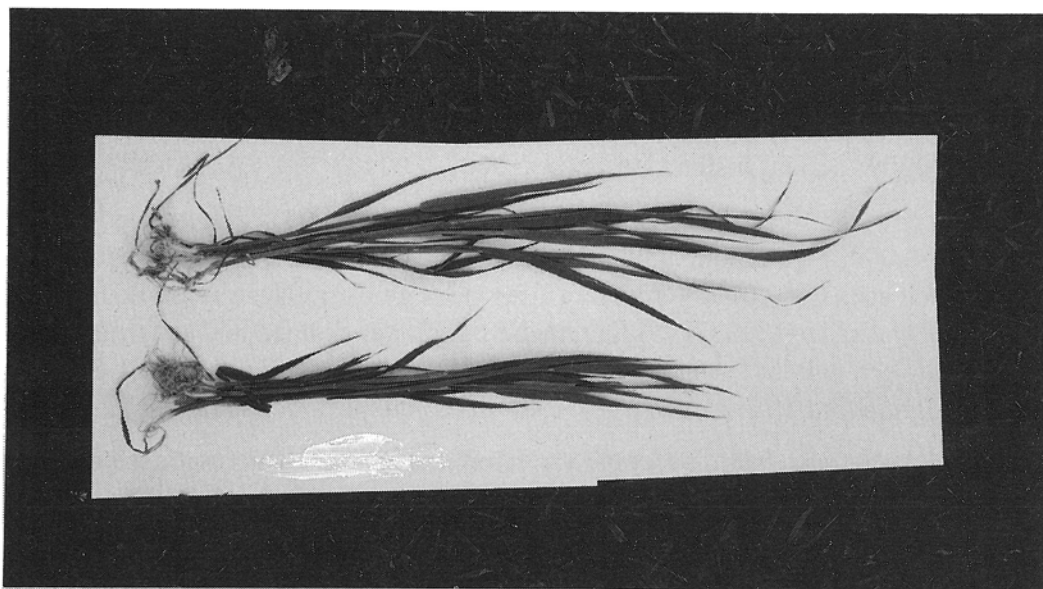


Bild. 2. Kraftiga havreplantor som gödslats med handelsgödsel fosfor jämfört med plantor från slambehandling och kontroll. Sommaren 1994 var extremt torr.

### Radioaktivt märkt fosfor

Resultaten från mätningen av upptagen mängd radioaktivt märkt fosfor i havreplantor vid vippgång, 27 juli, var något motsägelsefulla. Teoretiskt borde andelen radioaktivt märkt fosfor i plantan vara störst i kontroll. I våra mätningar blev den specifika aktiviteten, kBq per g total-P, lägst i kontroll. En förklaring kan vara att fosfor har fastlagts i jorden i kontroll. Mätresultaten återfinns i tabell E i tabellbilagan. Radioaktiv fosfor användes endast 1994.

### Långshyttan 1995, 2:a året efter fosforgödslingen

Även 1995 var ett relativt torrt år, se under "Fältförsök, material och metoder". Skördenivåerna var dock markant högre än 1994 och var likartade över alla behandlingarna. Skörderesultaten finns i tabell J samt den statistiska bearbetningen finns i tabell K i bilagan.

Inga signifikanta skillnader fanns mellan de olika behandlingarna. Kalkningen gav dock vissa effekter. Kalkning gav signifikant högre:

fosforhalt i kärnan	(p=0,0027)
halmskörd	(p=0,0257)
fosforskörd i halm	(p=0,0103)

<u>Långshyttan 1995:</u>	<u>okalkat</u>	<u>kalkat</u>	
Fosforhalt i kärnan	0,36	0,40	% av ts, torrsubstans
Halmskörd	986	1241	kg ts per hektar
Fosforskörd i halm	0,49	0,75	kg P per hektar

### Långshyttan 1996, 3:e året efter fosforgödslingen

1996 var vad man betecknar ett rekordår för spannmålsodling. Skördenivåerna var mycket höga för området och det aktuella fältet. Inga signifikanta skillnader fanns mellan de olika gödslingarna 1996.

Försöksbehandling:	Okalkat		Kalkat	
	kärna	halm	kärna	halm
	kg/ha 15% vh <sup>1</sup>		kg/ha 15 % vh <sup>1</sup>	
0 kg P	5600	3340	6070	3500
Järnfällt	5700	3230	6200	3620
Aluminiumfällt	5780	3440	6060	3610
Kalkfällt	5870	3090	6040	3930
Biologiskt	5740	3150	6030	4130
Handelsgödsel-P	5800	3360	6060	3980
Aska	5840	3320	6180	3860

<sup>1</sup> vh = vattenhalt

Skördarna var mycket jämna och något högre i den kalkade delen av försöket. De enda signifikanta skillnaderna i skörderesultaten gällde kalkning.

Kalkning gav signifikant högre:

fosforhalt i kärnan	(p=0,0276)
kaliumskörd i kärna	(p= 0,0356)
halmskörd	(p=0,0312)
kväveskörd i halm	(p=0,0313)
fosforskörd i halm	(p=0,0274)
kaliumskörd i halm	(p=0,0487)
totalskörd av kalium	(p=0,0386)

<u>Långshyttan 1996</u>	<u>okalkat</u>	<u>kalkat</u>	
Fosforhalt i kärnan	0,42	0,43	% av ts
Kaliumskörd i kärna	26,5	29,3	kg/ha
Halmskörd	2791	3245	kg ts/ha
Kväveskörd i halm	18,6	21	kg/ha
Fosforskörd i halm	2,5	3,6	kg/ha
Kaliumskörd i halm	75	90	kg/ha
Totalskörd av kalium	101	119	kg/ha

Kompleta skörderesultat och statistiska samband finns i tabell L och M i tabellbilagan.

### **Jordanalyser 1993- 1996**

Jorden i Långshyttan hade vid försökets start i genomsnitt 44 mg svårslöslig fosfor per 100 g lufttorr jord mätt som P-HCl och 5,1 mg lättlöslig fosfor per 100 g lufttorr jord mätt som P-AL. Hösten 1996 hade dessa ökat dramatiskt och P-HCl-talen i de okalkade behandlingarna höll i genomsnitt 82 mg svårslöslig fosfor och 7,9 mg lättlöslig fosfor per 100 g lufttorr jord. De kalkade behandlingarna hade ökat ännu mer och innehöll i genomsnitt 90,7 mg svårslöslig fosfor och 12,2 mg lättlöslig fosfor per 100 gram lufttorr jord.

Kalkat bioslam hade signifikant högre andel P-HCl- tal , 105,5mg P per 100 g lufttorr jord, än alla andra kalkade behandlingar utom kalkfällt slam, 100,8 mg P per 100 g lufttorr jord.

Markdata finns i tabellbilagans tabell C på försöksfältet före anläggning av försöket och i tabell F på markprover som togs hösten 1996.

### **Fältförsök startade 1993**

Resultaten från Änge och Björänget återfinns i tabellerna N och O i tabellbilagan. Dessa resultat är inte möjliga att bearbeta statistiskt eftersom det tredje försöksfältet utgick på grund av bland annat ogräsproblem. Resultaten indikerar dock samma resultat som i Långshyttan. Första året 1993, då fosforgödslingen skedde, gav det kalkfällda och det biologiska slammet högsta skörd. I Änge kalkades hela fältet hösten 1993 och skörderesultatet 1995 är i stort sett lika i alla behandlingar. Det finns en tendens att det biologiska slammet här har levererat kväve som gav högre skörd.

Det ”alternativt odlade” gödslingen gav markant lägre skörd första året då spannmål odlades. Vallskörden 1995 och 1996 gav högst avkastning i det ”alternativt odlade”. Det var troligen kvävebrist för spannmålsgrödan. Vallen däremot kunde binda luftkväve med hjälp av baljväxtbakterier.

### **Resultat, kärlförsök**

I kärlförsöket gav järnfällt slam signifikant ( $p=0,0318$ ) lägre skörd än handelsgödsselfosfor första året, som var 1995. Andra året gav kalkfällt slam signifikant högre torrsubstansskörd än kontroll ( $p=0,0001$ ), järnfällt slam ( $p=0,0001$ ), aluminiumfällt slam ( $p=0,0094$ ), bioslam ( $p=0,0071$ ), aska ( $p=0,0004$ ) samt handelsgödsselfosfor ( $p=0,0099$ ).

Kalkfällt slam hade i genomsnitt över åren signifikant högre skörd av gram fosfor per kärl än alla de övriga fosforgödslingarna ( $p= 0,0001-0,0399$ ). Behandlingen utan fosforgödsling, kontroll, hade lägst skörd både 1995 och 1996, men skillnaden till övriga behandlingar var inte signifikant.

Skörderesultatet från kärlförsöket 1995 och 1996 finns i tabell P och sammandrag av den statistiska bearbetningen finns i tabell Q samt Ra och Rb i tabellbilagan.