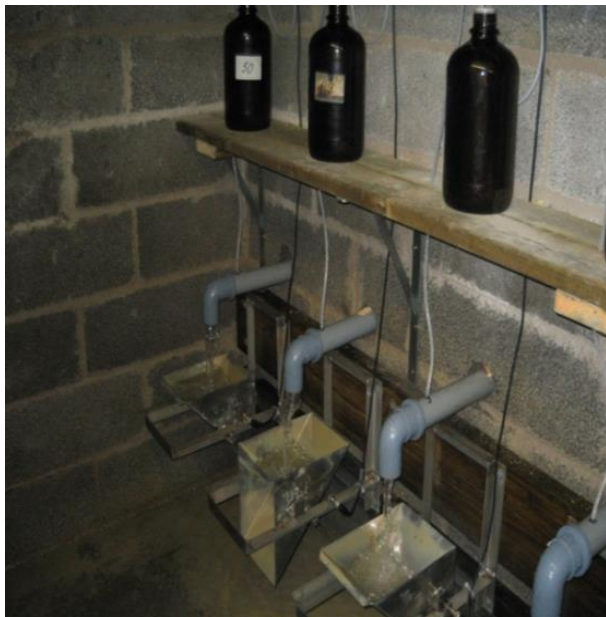


Barbro Ulén, Mats Larsbo, Johannes Koestel, Maria Blomberg

## Åtgärder mot fosforläckage från dränerade lerjordar



*Registrering av dräneringsvatten vid Oxelby försöksrutor med omväxlande klart och grumligt vatten från dräneringsledningar.  
Foto: Barbro Ulén och Johan Frank*

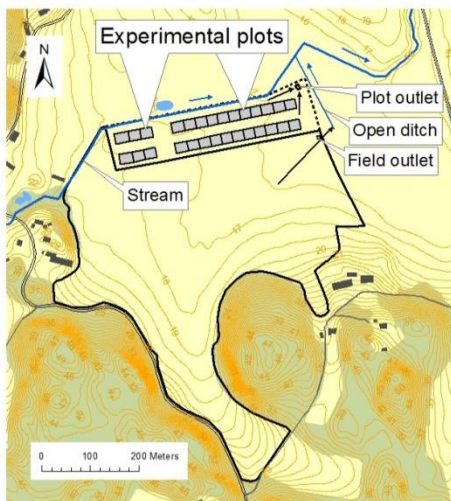
# Åtgärder mot fosforläckage från dränerade lerjordar

Barbro Ulén, Mats Larsbo, Johannes Koestel, och Maria Blomberg

**Sammanfattning** Fält med lerjordar har nästan alltid dräneringsledningarna och läcker betydande mängder fosfor med en stor variation både rumsligt inom fältet och över tiden. Det är därför en utmaning att beräkna effekten av olika ansträngningar att minska detta läckage. Genomsnittligt läckage (8 år) från 16 dränerade försöksrutor på en flack experimentyta (lerhalt 40-60%) och med fyra upprepningar per behandling var ( $\text{kg ha}^{-1} \text{år}^{-1}$ ): 1,21 från grund höstbearbetning med kultivator, 0,84 från ogödslad träda, 0,81 från konventionell höstplöjning och 0,57 från en strukturkalkning som skett vid starten. Även med hänsyn tagen till den rumsliga variationen, beräknat dels med ett hydrologisk index och dels med en distansfaktor, var skillnaderna inte statistiskt säkra. Reducerad jordbearbetning (endast grund kultivering av jorden) tenderade dock att medföra högre utlakning än konventionell jordbearbetning (plöjning varje år) efter den inledande strukturkalkningen. En kombination av åtgärder anpassade till dräneringsförhållanden och lerinnehåll i olika delar av ett fält verkar vara mest effektivt. Fosforutlakning halverades från ett intilliggande gärde (4,3 ha) under en treårsperiod före, jämfört med en treårsperiod efter att hela fältet strukturkalkats och dräneringssystemet renoverats och att dessutom återfyllnadsjorden blandats med strukturkalk (kalkfilterdiken) i de kritiska delarna av gärdet.

## INLEDNING

Fosforutlakningen från åkermark är känd för att variera kraftigt över tiden och ofta är de meteorologiska förhållanden mer avgörande för läckagets storlek än odlingsmetoderna. Fosfortransporten genom marken är också starkt beroende av markens struktur och eftersom denna kan variera avsevärt uppmäter man vanligen en betydande variation inom ett enskilt fält. I Sverige är 70% av åkermarken artificiellt dränerad och praktiskt taget all lerjord har någon form av dräneringssystem. Ett väl fungerande sådant förbättrar vattenkvaliteten eftersom det förbättrar markhydrologin och stabiliserar grundvattennivån. På Hushållningssällskapetets experimentgård Logården i Västergötland har visats att det sker en utspädning av löst fosfor när infiltrerande vatten från markytan blandas med ytligt grundvatten i dräneringssystemen - ju mera avrinning ju lägre var koncentrationen av löst reaktivt fosfor från de 16 olika fälten på gården (Ulén, m.fl., 2016).



Figur 1. Oxelby experimentområde med dränerade försöksrutor (plots) längs en bäck (stream) och hydrologiskt isolerade mot Oxelbygärdet med långsgående dräneringsledningarna.

Att installera nya eller förbättra befintliga dräneringssystem är mycket viktigt för att få en god infiltration genom marken och minska fosforförlusterna. För att ytterligare förbättra vattnets infiltrering kan man blanda in strukturkalk (bränd eller släckt kalk) i återfyllningen (kalkfilterdiken). Denna åtgärd kan minska erosionen och därmed läckaget av partiklar med bunden fosfor (Lindström & Ulén, 2003). Bortsett från förbättrad dränering kan en vanlig strukturkalkning (applicering av strukturkalk över hela fältet) minska risken för att vattnet blir stående i sänkor på fältet. Små 'mikrodammar' är kända för att trigga igång vattenflöden genom markens stora porer, flöden som är så snabba att fosfor från markytan inte hinner adsorbera (binda) till jordens fasta material i markprofilen. Sådana händelser leder generellt till snabba flödesökningar i dräneringsledningarna. Dräneringsflödet modifieras samtidigt av grundvattenrörelsen eftersom denna fluktuerar mycket långsammare. Ett index för snabba flöden har visat sig vara starkt korrelerat till fosforläckaget på Logården. Koncentrationen av tillgänglig markfosfor (P-AL talet) visade sig vara en annan viktig faktor, medan årliga jordbruksåtgärder som val av gröda (t.ex. vall) eller årlig fosforgödning inte påverkade fosforläckaget märkbart i den nioåriga studien. Stor rumslig variation av både fosfor och pesticider har observerats från Oxelbyexperimentet med två rader av separat dränerade försöksrutor som sträcker sig mot ett dike i mitten av den nästan plana delen av en dal (Figur 1). Koncentrationerna av både fosfor och pesticider i dräneringsvattnet minskade med ökande avstånd från det centrala diket. Följaktligen användes detta avstånd i den statistiska analysen av effekterna av olika strategier för att minska fosforutlakningen på platsen (Svanbäck, m fl., 2014) men skillnader i flödesdynamik mellan rutorna beaktades inte. I den här studien testades därför också ett timbaserat 'flashinessindex' (ung. blixindex) som beskriver variationen i flöden som en alternativ och kanske mer generell faktor. Vi beräknade också jorderosion och fosforutlakning från ett närliggande fält med liknande jordart för att bedöma effekten av en kombination av åtgärder: heltäckande strukturkalkning och förbättringar av dräneringssystemen i de mera kritiska delarna av fältet där en kalkinblandning anpassad till lerhalten användes i återfyllnaden. Tidigare observationer av fosforläckage från detta fält har visat att fosforförlusterna inte påverkades nämnvärt av jordbearbetning och val av gröda, som t ex. vall (Ulén & Persson, 1999).

## METODER

### Experimentrutor och fält

Försöksplatsen ligger i östra Sverige och omfattar ett område med 28 separat dränerade rutor (Oxelby rutförsök) och ett intilliggande observationsfält (Oxelbygårdet). Försöksrutorna är placerade i ung. ostvästlig riktning i två rader (2 x 14 rutor) i en liten, flack dal (lutningen <0,5%) tillsammans med det angränsande Oxelbygårdet (medellutning <1%) (Figur 1). Rutorna avgränsas med avskärande dräneringsledningar mot gårdet och mellan rutraderna. Södra rutraden gränsar till Oxelbygårdet och löper parallellt med den norra raden som följer en mindre bäck. Varje försöksruta (storlek 20 m x 24 m) har 3 parallella dräneringsledningar på 1 m:s djup med 8 m:s avstånd. På dikesbotten och runt dräneringsrören upp till ca 50 cm under markytan ligger grovt dräneringsgrus (8-16 mm). De enskilda rutgränserna delas av med plast under plogdjupet (30 cm). Fosforstatus i matjorden var 3,2 mg P-AL per 100 g jord vid försökets start (2006) och med mycket liten variation mellan rutorna. Texturklassen är lerig mjälajord till ren lerjord närmast dalens mitt, motsvarande 40-60% ler. Vattnet både från rutorna och från gårdet leds till ett öppet dike som ligger mitt i dalen. Avrinningen från försöksrutorna och gårdet mäts i varsin provtagningskur och vattenprov för fosfor och jorderosion tas i proportion till avrunnen vattenmängd styrt av dataloggrar. Flashinessindex för flödena beräknades timbaserat från variationen i flödet i relation till hela årsavrinningen.

Metoder som var ämnade att minska fosforläckaget testades med fyra slumpmässigt placerade upprepningar. De fyra alternativen (16 rutor) som bedömdes här var: konventionell jordbearbetning med höstplöjning; grund jordbearbetning med kultivator samma tid på hösten; kalkning i form av bränd strukturkalk under det första året (2007) följt av konventionell plöjning; och ogödslad träda som såddes med en trädesfröblandning det första försöksåret. All jordbearbetning upprepades i åtta år. Konventionell höstplöjning är vedertaget bruk för regionen och innebär att man vänder jorden till 23 cm djup under den senare delen av hösten. Strukturkalkningen utfördes under torra förhållanden. Till stubben tillfördes en giva av 5 t CaO ha<sup>-1</sup> varefter jorden omsorgsfullt blandades om genom två körningar med en kultivator till ett djup av 12-15 cm. Grund jordbearbetning innebar kultivering med en kultivator två gånger samtidigt med den vanliga höstplöjningen. Under 2010-2012 återpackades den översta matjorden med en ribbvält. Den ogödslade trädan putsades årligen och gräset lämnades kvar på marken. Alla rutor utom de med träda såddes med vårsådda grödor (korn, havre och ärter) som tillät årlig höstbearbetning. Alla behandlingar (utom trädan) fick den rekommenderade givan med mineralfosfor för att ersätta den mängd som fördes bort med den skördade grödan.

Oxelbygdärdet har mera varierad och i snitt något högre fosforstatus (7 mg P-AL 100 g<sup>-1</sup> jord, år 2006), med låga till medelhöga koncentrationer på större delen av fältet och högre koncentrationer i matjorden närmare gamla ladugårdar. Ett sådant mönster är vad man ofta finner vid markkarteringar. Fältet odlas konventionellt med vall, korn och höstvetete och har under de senaste 30 åren bara fått mineralgödsel. Eftersom recipienten, Bornsjön, är reservvattentäkt för Stockholms stad finns det restriktioner och gödsling har bara skett med mycket måttliga mängder. Dräneringsvattnet leds via en samlingskulvert ut i uppsamlingsdikedet. I augusti 2013 fick hela gårdet en giva av strukturkalk i form av släckt kalk med ett kommersiellt blandpreparat som motsvarade 1 ton "aktiv" strukturkalk CaO per hektar. Kalken applicerades i torrt väder, och blandades omedelbart in genom två passager med en kultivator i olika riktningar till ett djup av 12 cm. Eftersom dräneringsledningarna var gamla och delvis igensatta renoverades dräneringssystemet tre veckor senare med moderna dräneringsslangar som lades med 14 m avstånd (0,07 m m<sup>-2</sup>) i mitten och i den nedre delen av fältet. Det motsvarar två tredjedelar av hela arealen, men den översta tredjedelen av gårdet förblev utan dräneringsledningar. I botten av dräneringsdikedet lades dräneringsgrus (4-8 mm) och i återfyllnadsjorden ovanför blandades strukturkalk in i återfyllnadsjorden genom två passager med kultivator. I den lägst belägna delen av gårdet, som har det högsta lerinnehållet, (motsvarande en tredjedel av hela ytan) fick återfyllnaden en giva med kommersiell strukturkalk som motsvarade 2,4 kg CaO m<sup>-1</sup>. I den mer centrala delen av gårdet blandades 1.2 kg CaO m<sup>-1</sup> in i återfyllnaden. Givorna motsvara c:a 20, resp. 10% av den som användes i experimentet vid Forsbyboda där matjorden har 50% ler (Lindström & Ulén, 2003).

## RESULTAT OCH DISKUSSION

### **Avrinning och flashinessindex för flödet**

Årlig avrinning från de olika försöksrutorna varierade mellan 200 och 900 mm. På sommaren var dräneringsledningarna vanligen torra. Större delen av tiden innehöll ledningarna bara klart vatten med låg grumlighet, avbrutna av kraftiga pulser med hög grumlighet. Förhållandet mellan avrinning och nederbörd var i genomsnitt 0,7 men för två av rutorna i den nordliga raden (närmare bäcken) var avrinningen från dräneringsledningarna t.o.m. högre än nederbörden. Index för flashinessflöde skiljde sig inte statistiskt mellan rutor som representerade olika åtgärder. Det fanns däremot en statistisk skillnad både i avrinning och index för flashinessflöde mellan de två rutraderna: den sydliga rutraden hade lägre genomsnittlig avrinning (AVR = 393 mm år<sup>-1</sup>) och högre flashinessindex (2,7) än den norra

Tabell 1. Medelvärdet för nederbörd (Ned), avrinning (Avr), index för 'flashinessflödet' och årlig transport av erosionsmaterial (SS), totalfosfor (TP) och löst reaktiv fosfor (DRP) från dränerade försöksrutor. Samma värden för Oxelbygdärdet tre år före och efter en kombination av åtgärder

Åtgärd	Period	Ned (mm år <sup>-1</sup> )	Avr	Flashiness -	SS (kg ha <sup>-1</sup> år <sup>-1</sup> )	TP	DRP
<i>Försöksrutor med fyra upprepningar</i>							
Kultivering sen höst*	2007/2015	680	511	2,2	-	1,21	0,18
Ogödslad träda	2007/2015	680	448	2,4	-	0,84	0,15
Vanlig plöjning sen höst	2007/2015	680	421	2,3	-	0,81	0,13
Strukturkalkning+ höstplöjning	2007/2015	680	501	2,1	-	0,57	0,13
<i>Före och efter kombinationen av åtgärder anpassade till karaktären av ett fälts olika delar</i>							
Tre år före åtgärder	2010/2013	691	368	1,6	650	1,00	0,20
Tre år efter åtgärder	2013/2016	640	315	1,7	302	0,45	0,13

\*Tendens till högre värden jämfört med strukturkalkning och höstplöjning 2008/2015

raden (AVR = 514 mm år<sup>-1</sup>, flashinessindex = 2,1). För alla rutor minskade också index med ökad avrinning. Närhet till bäcken är förmodligen den viktigaste förklaringen till skillnaderna i flödesmönster mellan de två rutraderna. Det observerades ingen översvämning över rutorna av vatten från bäcken men den har troligen påverkat flödet i dräneringsledningarna och lett till mera långvariga, men dämpade, pulser från den nordliga rutraden jämfört med den sydliga. Samtidigt minskade flashinessindex med avståndet till diket i dalens mitt och var 1,7-2,8 gånger så högt nära mitten av dalen än 400 m längre bort. Flödesindex ökade också med högre koncentration av ler i matjorden och ett högt lerinnehåll är ofta förknippat med benägenhet för snabba flöden genom marken. Slumpmässiga skillnader i dräneringssystemets återfyllning kan också ha påverkat flödesdynamiken för de olika rutorna.

Avrinningen från Oxelbygdärdet (341 mm år<sup>-1</sup>) var lägre än från rutorna (475 mm år<sup>-1</sup>) vid jämförelse av samma period. Även flashinessindex för flöden var generellt lägre (medelvärdet 1,7) för Oxelbygdärdet än för rutorna (medelvärdet 2,3). Efter att dräneringssystemet förbättrats förändrades detta index endast marginellt jämfört med perioden innan (Tabell 1).

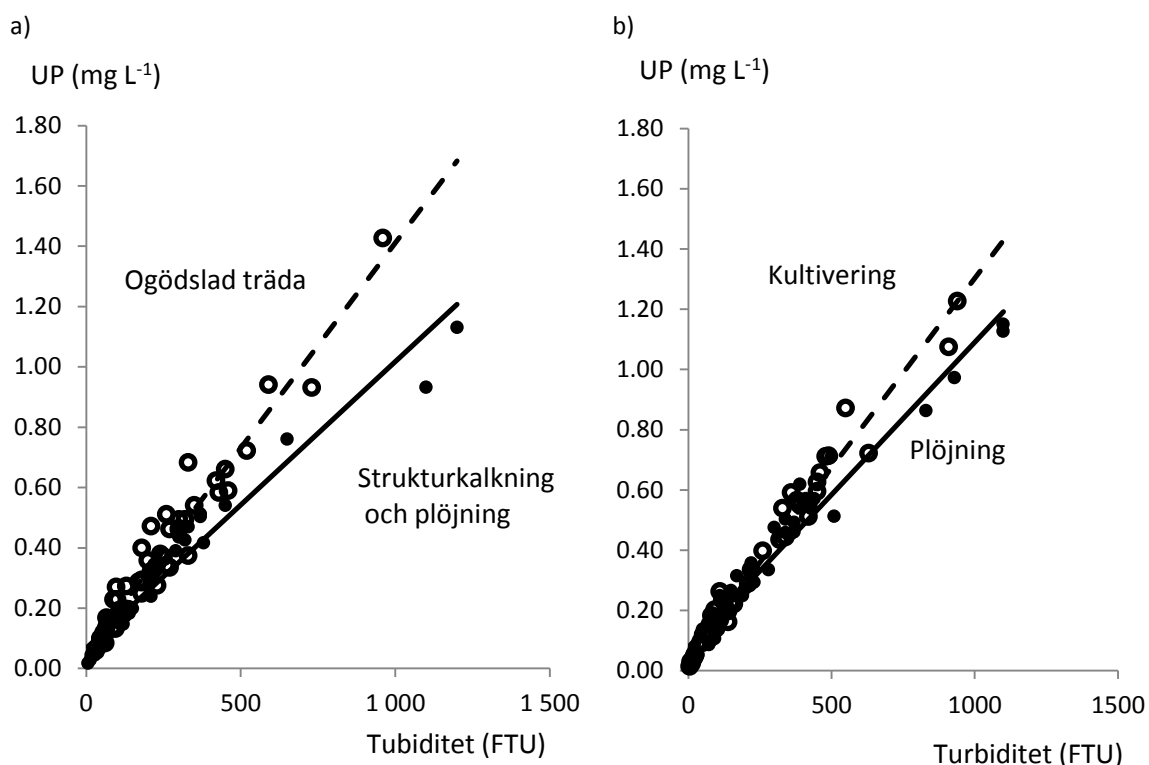
### Hur påverkade de olika åtgärderna koncentrationerna och läckaget?

Koncentrationen av fosfor i dräneringsledningarna från en försöksruta ökade generellt ju närmare den ligger diket i dalens mitt och samtidigt som flashinessindex för flödet ökade. Av den genomsnittliga årliga utlakningen av totalfosfor (TP) (Tabell 1) var endast en mindre del (16%) i reaktiv upplöst form (DRP). Utlakning av totalfosfor (8 års observationer) varierade endast med avrunnen vattenmängd för de grunt jordbearbetade rutorna och den ogödslade trädan, men inte för de konventionellt plöjda rutorna. Därför kunde vi inte använda avrinningen för att bedöma effekten av strukturkalkningen eller den ogödslade trädan. Vare sig flashinessindex för flödet eller en distansfaktor (avståndet till diket i dalens mitt) gav statistiskt säkra skillnader för de olika åtgärderna. Båda beräkningsmetoderna gav likartade resultat med en tendens att strukturkalkningen hade medfört lägre läckage än den grunda kultiveringen. Tidigare beräkningar som endast omfattade de första sex åren (Svanbäck m. fl., 2014) gav däremot statistiskt säkra skillnader. Ytterligare övervakning behövs för att bekräfta trender med reducerad effektivitet av strukturkalkning. Även biologiska faktorer bör

undersökas, t.ex. om kalkning medför fler maskar, eftersom deras aktiviteter kan ha en effekt på biologiskt betingade markporer och fosforutlakning.

Erosionen från försöksrutorna uppskattades till omkr.  $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$  från senare år baserat på grumlighetsvärden (turbiditet). Turbiditetsvärdena hade ett mycket tydligt samband med koncentrationen icke-reaktiv fosfor (UP), men lutningarna på regressionslinjen var högre för den ogödslade trädan och den grunda jordbearbetningen i jämförelse med de plöjda rutorna (Figur 2). Detta tyder på ett högre fosforinnehåll i erosionsmaterialet när man inte vänder matjorden genom plöjning. Övre skiktet av matjorden tenderade också att ha högre fosforinnehåll år 2012 i de rutor som inte plöjts. Vid odlingen kan växtrötterna föra upp fosfor från alven till grödan och växtresterna kan sedan anrika markytan med fosfor. Dessutom kan vattenflödena ner genom marken förändras om jorden inte plöjs. Att inte använda marken för odling och inte gödsla den behöver alltså inte innebära att fosforläckaget minskar. Ändrat fosforläckage till följd av en långsiktig successivt ackumulering av fosfor nära markytan behöver följas upp.

Totalt sett var den rumsliga variationen i fosforutlakning via dräneringssystemen högre än den tidsmässiga variationen. Det behövs alltså ett stort antal upprepningar för att säkerställa att sådan naturlig rumslig variation är täckt. Den här använda hydrologiska signaturen (flashinessindex) kan i sig ha påverkats av åtgärder avsedda att förbättra markstrukturen, främst strukturkalkning. Båda flashinessindex och den tidigare använda avståndsfaktorn gav dock liknande resultat när de användes separat för att förklara fosforläckaget.



Figur 2. Koncentrationen fosfor i annan form än den löst reaktiv form (UP) relaterad till turbiditeten (FTU enheter) från a) ogödslad träda och strukturkalkning följt av årlig höstplöjning med vändning av matjorden och b) grund kultivering (12-15 cm) och plöjning samtidigt på hösten. I båda fallen har linjerna olika lutning (statistiskt säkert).

## Utlakning av fosfor före och efter kombinerade åtgärder på Oxelbygården

Fosforutlakningen från Oxelbygården var ungefär hälften så stor efter kombinationen av åtgärder hösten 2013 (Tabell 1) jämfört med innan åtgärderna. Även erosionen uppmättes lägre efter de kombinerade åtgärderna och koncentrationen av löst reaktiv fosfor var också lägre. Dessa observationer stämmer överens med erfarenheter av kalkfilterdiken i Sverige (Lindström & Ulén, 2003) och i Litauen. Fosforgivan med mineralgödsel till gården (9-15 kg P ha<sup>-1</sup> år<sup>-1</sup>) var mindre än den beräknade bortförslagen med grödan (i snitt 16 kg ha<sup>-1</sup> år<sup>-1</sup>). Att på så vis använda markens fosforreserver har visat sig minska fosforläckaget men i en mycket långsam takt och med många års initial fördröjning (Ulén m. fl., 2015). Att kombinera åtgärder för att förbättra vatteninfiltrering i olika delar av ett fält, som testats här, verkar vara en lovande strategi men eventuella effekter från de olika åtgärderna kan inte separeras baserat på övervakningsresultat från ett enda fält. Långtidsövervakning behövs för att kvantifiera de olika åtgärdernas effekter, ensamma eller i kombination.

## Erkännande

Försöksanläggningen vid Oxelby har till största delen finansierats av Stockholm Vatten AB. Undersökningarna och utvärderingen har i huvudsak bekostats av stiftelsen Lantbruksforskning och av Formas, ett svenskt forskningsråd för hållbar utveckling.

## Referenser

- Lindström, J. & Ulén, B. 2003. *Påverkan på fosforläckaget av strukturkalk i återfyllnaden* Rapport till Jordbruksverket.
- Svanbäck, A., Ulén, B. & Etana, A. 2014. Mitigation of phosphorus leaching losses via subsurface drains from a cracking marine clay soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 184, 124-134.
- Ulén, B. & Persson K. 1999. Field-scale phosphorus losses from a drained clay soil in Sweden. *Hydrological Processes* 13, 2801-2812.
- Ulén, B., Johansson, G., Kyllmar, K., Stjernman Forsberg, L. & Torstensson, G. 2015. Lagged response of nutrient leaching to reduced surpluses at the field and catchment scales. *Hydrological Processes* 29, 3020–3037.
- Ulén, B., Stenberg, M. & Wesström, I. 2016. Use of a flashiness index to predict phosphorus losses from subsurface drains on a Swedish farm with clay soils. *Journal of Hydrology* 533, 581-590.
- Ulén, B., Larsbo, M., Koestel, J., Hellner, Q., Blomberg, M. & Geranmayeh, P. 2018 Assessing strategies to mitigate phosphorus leaching from drained clay soils. *Ambio Special Issue, Handling the phosphorus paradox in agriculture and natural ecosystems: Scarcity, necessity, and burden of P*. DOI 10.1007/s13280-017-0978-7 (under tryckning).