



Fosforgödslingsstrategier för högre sockerskördar

Effekten av appliceringsmetod och fosforgiva på sockerskörden och mängden växttillgänglig fosfor i jorden

Phosphorus Fertilization Strategies for Higher Sugar Yields

The effect of application method and phosphorus rate on sugar yield and the amount of plant-available phosphorus in the soil

Frederik Falck

Självständigt arbete • 30 hp

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap/ Institutionen för Mark & Miljö

Agronomprogrammet – Mark/Växt

Nummer i serien 2025:05

Uppsala 2025



Fosforgödslingsstrategier för högre sockerskördar. Effekten av appliceringsmetod och fosforgiva på sockerskörden och mängden växttillgänglig fosfor i jorden

Frederik Falck

Handledare:	Sabina Braun, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Mark & Miljö
Bitr. handledare:	Joakim Ekelöf, Nordic Beet Research
Examinator:	Sofia Delin, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Mark & Miljö
Omfattning:	30 hp
Nivå och fördjupning:	Avancerad nivå, A2E
Kurstitel:	Självständigt arbete i biologi
Kurskod:	EX1026
Program/utbildning:	Agronomprogrammet – Mark/Växt
Kursansvarig inst.:	Institutionen för Mark & Miljö
Utgivningsort:	Uppsala
Utgivningsår:	2025
Omslagsbild:	Frederik Falck
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Nyckelord:	Appliceringsmetod, ekonomi, fosfor, fosforgödselgiva, långliggande bördighetsförsök, nederbörd, P-AL, sockerbeta

Sveriges Lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för Mark & Miljö

Sammanfattning

Sockerbetor (*Beta vulgaris* L. ssp. *Vulgaris* var. *Altissima* Döll.) ställer höga krav på jordens bördighet och är en av de mest fosforkrävande grödorna i Sverige. Betor bör därför prioriteras vid fosforgödsling i växtföljden, då de även är känsliga för fosforbrist och svarar väl på gödsling. Ökade sockerskördar, stigande fosforpriser på grund av geopolitiska konflikter och miljöproblem kopplade till fosforläckage från svenskt lantbruk har gjort optimering av fosforstrategier allt viktigare. Fokus i den här studien har varit på hur appliceringsmetod av fosforgödsel, fosforgiva och jordens förråd av ammonium-acetat-laktat extraherbart fosfor (P-AL-tal) påverkar sockerskörd, lönsamhet i betodlingen, betans fosforkoncentration samt odlingssäkerhet.

För att analysera hur olika fosforgödslingsstrategier påverkar utvecklingen av olika jordars P-AL-värden och hur P-AL påverkar sockerskörd och fosforkoncentrationen i sockerbetorna, har data från åren 1963–2024 i de södra långliggande bördighetsförsöken (R3-9001) granskats. Dessutom har data från den ettåriga försöksserien ”Ettårseffekter av fosfor” (2021–2024) analyserats med syfte att utvärdera hur appliceringsmetod och fosforgiva påverkar skörd, lönsamhet och odlingssäkerhet. Resultatet visar att radmyllning ger signifikant högre sockerskördar i jämförelse med bredspridd fosfor och visar även intäktsökningar redan vid 15 kg radmyllad fosfor. Dessutom kan radmyllning öka odlingssäkerheten torra vårar när sockerbetornas fosforupptag är begränsat. Regressionsanalyserna från R3-9001 visar att P-AL-nivåerna kan hållas stabila över tid om fosfor ersättningsgödslas, det vill säga att lika mycket fosfor tillförs med gödsel som har förts bort med skörden. Om istället mer fosfor gödslas än mängden fosfor som försvinner med skörden (överskottsgödsling) stiger P-AL men det krävs mycket fosfor och processen är väldigt långsam. P-AL hade en signifikant positiv effekt på sockerskörd och även effekt på fosforinnehållet i betorna men inga signifikanta skördeökningar har observerats över tid trots stigande P-AL-värden. Det har varit väldigt värdefullt att jämföra data från långliggande försök med moderna ettåriga försöksserier för att optimera fosforgödslingsstrategier. Resultatet visar att radmyllning är gynnsamt oavsett fosforgiva och P-AL-klass, men vilken fosforgiva som bör appliceras beror väldigt mycket på olika lantbruksföretagares förutsättningar och ambitioner. Ökade intäkter drivna av höga sockerskördar kan uppnås redan vid låga radmyllade givor enligt försöksresultaten i den här studien, men vid låga fosfortal i jorden kan överskottsgödsling vara motiverat för att öka P-AL och betodlingens långsiktiga potential. Målsättningen för odlare bör vara att gödsla upp marken till P-AL-klass IVA eller högre och därefter radmylla fosfor till betorna efter bortförsel för långsiktigt ekonomisk stabil betodling, vilket stämmer väl överens med dagens rekommendationer. Fosforgödslingsstrategier kan anpassas efter syfte och mål, men oavsett vald gödslingsmetod är det viktigt av ekonomiska och miljömässiga skäl, att minimera risken för fosforläckage. Det kan finnas ytterligare potential att optimera svenska fosforgödslingsrekommendationer för sockerbetor, genom att i högre grad ta hänsyn till jordens biologiska, fysiska och kemiska egenskaper. Detta genom att studera P-AL-utveckling i olika jordar i relation till fosforgödsling eller användning av metoder som Olsen-P, vilket kan vara lämpligt för jordar som ofta har höga pH-värden. Baserat på den stora skillnaden i effekten av att radmylla fosfor mellan torra och våta vårar är det också relevant att jämföra appliceringsmetoder på bevattnade arealer i framtida forskning.

Nyckelord: Appliceringsmetod, ekonomi, fosfor, fosforgödselgiva, långliggande bördighetsförsök, nederbörd, P-AL, sockerbeta

Abstract

Sugar beets (*Beta vulgaris* L. ssp. *Vulgaris* var. *Altissima* Döll) have high requirements on soil fertility and are one of the most phosphorus-demanding crops in Sweden. Therefore, sugar beets should always be prioritized when it comes to phosphorus fertilization in the crop rotation, as they are sensitive to phosphorus deficiency and respond well to phosphorus fertilization. Optimizing phosphorus strategies has become more important in recent years, due to increasing sugar yields, higher phosphorus prices driven by geopolitical conflicts, and environmental issues related to phosphorus leakage from Swedish arable soils. Strategies for phosphorus fertilization can be both short and long term, and this study focused on application method of phosphorus fertilizers, rate of phosphorus fertilizers, and soil P-AL-levels. To analyze how different phosphorus strategies affected the development of P-AL value in different soil types, as well as how the phosphorus concentration in the plant and sugar yield responded to these changes, data from 1963 – 2024 in the Swedish long term fertility trials (R3-9001) were reviewed. Additionally, data from the one-year field trials series “Yearly effects of phosphorus” were analyzed to investigate how application method and phosphorus rates affect yield, profitability, and cultivation resilience. The results showed that soil incorporation by banding phosphorus in the row leads to significantly higher sugar yields and revenue increases even at low phosphorus rates. Additionally, banding can improve cultivation security during dry springs when the uptake of phosphorus is limited. The regression analyzes from R3-9001 showed that soil P-AL-levels can remain stable over time if phosphorus is replaced based on calculated removal of the harvest. P-AL increases when excessive phosphorus fertilization carries out for many years, but the increase is slow and requires large amount of phosphorus. P-AL had a significant positive effect on sugar yield and an effect on the phosphorus content in the beets, but no significant yield increases have been observed over time, even with increasing P-AL-levels. Comparing data from long-term field trials with modern yearly trials has been valuable for optimizing phosphorus fertilization strategies. The results clearly show that banding the phosphorus in the row is favorable regardless of application rate and P-AL-level in the soil, but the suitable phosphorus rate depends on individual conditions and future ambitions on different farms. High revenues driven by high sugar yields can be achieved with low banded rates, but at low P-AL-levels, higher phosphorus rates may be necessary to increase P-AL and the long-term potential of sugar beet cultivation. The goal for beet growers should be to fertilize heavy enough to reach a desirable P-AL-level around P-AL-class IVA and then fertilize based on removal for long-term, economically stable beet production, which aligns well with current recommendations. Phosphorus fertilization strategies can be adapted to different growers’ goals, but regardless of fertilization strategy, minimizing the risk of phosphorus leakage is important for both the economic and environmental reasons. There may be additional potential to refine Swedish phosphorus fertilization recommendations for sugar beets by more closely considering the biological, chemical and physical properties of different soils. For example, could this be done by studying P-AL development in different soils in relation to application rates, or using methods analyzes methods like Olsen-P, which can be more suitable for Swedish beet soils that often have high pH values. Given the significant effect difference of row banded between dry and wet springs, it is also relevant to compare application methods on irrigated fields in future research.

Keywords: Banded phosphorus, Beta Vulgaris, Broadcasting, Fertilization recommendations, Fields trials, P-AL, Phosphorus application rate, Sugar beet

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	9
Figurförteckning	11
Förkortningar	13
1. Introduktion	14
1.1 Syfte	14
1.2 Frågeställning	14
1.3 Avgränsning	15
2. Bakgrund	16
2.1 Fosfor (P)	16
2.1.1 Fosfors kemi i jorden och sockerbetan	17
2.1.2 Interaktioner mellan P och NK	19
2.1.3 Fosfors funktion i sockerbetan och effekt på skörd och kvalitet	19
2.1.4 Svenska fosforgödslingsrekommendationer baserat på mängden växttillgänglig fosfor i jorden	21
3. Metod	26
3.1 Bördighetsförsöken (R3-9001)	26
3.1.1 Försöksupplägg och gödsling	26
3.1.2 Gradering och provtagning	29
3.2 Ettårseffekter av fosfor	30
3.2.1 Väderdata	33
3.2.2 Ekonomi	33
3.3 Statistisk analys och datahantering	34
3.3.1 Datahantering	34
3.3.2 Regressionsanalys 727 Bördighetsförsöken	34
3.3.3 Statistisk analys Ettårseffekter av fosfor	35
4. Resultat	37
4.1 Fosforgödslingsstrategi för optimal skörd och lönsamhet ur ett ettårsperspektiv	37
4.1.1 Appliceringsmetodens och fosforgivans effekt på sockerskörden	37
4.1.2 Appliceringsmetodens och fosforgivans effekt på betodlingens lönsamhet	38
4.1.3 Nederbörds mängden i betornas tidiga tillväxtstadiers påverkan på effekten av radmyllning av fosfor	40
4.2 Hur påverkas skördenivån av jordens fosforstatus och hur ska man gödsla för att uppnå optimal fosforstatus och skördepotential i betodlingen?	41
4.2.1 Långsiktig fosfortillförsel och dess effekt på jordens fosforstatus	41
4.2.2 Utveckling av sockerskörden i relation till jordens fosforstatus	45
4.3 Sambandet mellan jorden P-AL-värde och koncentrationen fosfor i blast och rot	48

5.	Diskussion.....	51
5.1	Vilken fosforstrategi bör tillämpas för optimal skörd och lönsamhet ur ett ettårsperspektiv?	51
5.1.1	Appliceringsmetodens och fosforgivans effekt på sockerskörden.....	51
5.1.2	Appliceringsmetoden och fosforgivans effekt på betodlingens lönsamhet.....	52
5.1.3	Påverkar nederbörds mängden på våren effekten av att radmylla fosfor?	55
5.2	Hur påverkas skördenivån av jordens fosforstatus och hur ska man gödsla för att uppnå optimal fosforstatus och skördepotential i betodlingen?	56
5.2.1	Långsiktig fosfortillförsel och dess effekt på jordens fosforstatus	56
5.2.2	Ökar sockerskörden av att överskottsgödsla fosfor över flera årtionden.....	59
5.2.3	Korrelationen mellan jordens P-AL-värde och sockerbetornas fosforkoncentration	61
6.	Slutsats	64
	Referenser.....	65
	Populärvetenskaplig sammanfattning	71

Tabellförteckning

Tabell 1. Jordbruksverkets fosforklassificering och halter av fosfor i jord för respektive klass (Andersson et al. 2024).	22
Tabell 2. Jordbruksverkets riktgivor för breddspridd fosfor för olika grödor, vid olika P-AL-klasser (Andersson et al. 2024).	23
Tabell 3. Sockerindustrins riktgivor för fosforgödsling vid P-AL 6 (klass III). Riktgivorna är baserade på Yaras beräkningsverktyg (Nordic Sugar c).....	23
Tabell 4. HIR Skånes riktgivor i olika grödor för PK-gödsling i olika grödor vid olika P-AL- och K-AL-klasser (Hansson 2024).	24
Tabell 5. Växtföljderna i växtföljdsomlopp 15 & 16.	26
Tabell 6. Försöksplan R3-9001, försöksplanen illustrerar fördelningen mellan de två olika växtföljderna och de två olika blocken. Alla rutor redovisas i tabellen med rutnummer 1–64, samt vilken PK giva (A-D) och kvävegiva (1–4) rutorna som tillförs.....	27
Tabell 7. PK-gödslingsnivåer för led A-D	27
Tabell 8. Kvävegödslingsnivåer i led 1–4 för varje gröda.	28
Tabell 9. Schema över var och när kalkspridning har skett med vilket kalkmedel på samtliga försöksplatser. Nordkalk plus erhåller ca 50% CaO.	28
Tabell 10. Ursprungsvärden för markparametrar på alla försöksplatser, P och K i mg 100 g ⁻¹ torr jord, organiskt kol i procent av torrs substansen (Carlgren & Mattsson 2001). Observera att försöket i Örja har flyttats till Borgeby.	29
Tabell 11. Fosforklasser för de olika försöksplatserna mellan åren 2021–2024. Fosforklasserna är indelade efter jordens P-AL-värde. Siffrorna innan försöksplatsen är försöksnummer.....	30
Tabell 12. Appliceringsmetod och fosforgiva i alla 9 led. 15 kg radmyllad- och 120 kg bredspridd fosfor har inkluderats för att testa hypotesen att mindre fosfor behövs för god sockerskörd om fosfor radmyllas istället för att bredsprids. ...	30
Tabell 13. Analysvärden från samtliga jordprover från alla platser alla år, samt information om förfrukt, sort och såteknisk information.	32
Tabell 14. Visar vilka samband som har undersökts i regressionsanalyser för att besvara frågeställningarna med utgångspunkt ur bördighetsförsöket. X markerar om regressionsanalys har utförts mellan variablerna på y- och x-axeln.	35

Tabell 15. Medelintäkten för alla led mellan åren 2021–2024, med 0 kg tillförd fosfor som referensled. Från vänster: rotskörd (ton/ha), sockerhalt (%), sockerskörd (ton/ha), relativt sockerskörd, intäkt (kr/ha), intäktsökning mot referensled (kr/ha).....	39
--	----

Figurförteckning

- Figur 1. Illustration av skillnaden i sockerskörd (ton/ha) beroende på om fosfor har radmyllats eller bredspridits i samband med sådd. De tre fosforgivorna som har inkluderats i ANOVA-analysen jämförs inbördes i respektive appliceringsmetod. Felstaplarna visar standardavvikelsen. Medelskörden är samlad från alla försöksplatser åren 2021–2024 från led 2,3,4,7,8 och 9..... 38
- Figur 2. Totala intäkter (kr/ha) för varje led, varje enskilt år mellan perioden 2021–2024 40
- Figur 3. Sockerskörd(ton/ha) för samtliga enskilda år (2021–2024) där effekten av radmyllad och bredspridd fosfor jämförs (t.v). Ackumulerad nederbördsmängd (mm) mellan 15 april – 1 juli för samtliga försöksår (2021–2024) (t.h) 41
- Figur 4. Utvecklingen av P-AL-värdena (mg P/100g jord) mellan åren 1963–2023 på lokalerna Borgeby, Ekebo, Fjärdingslöv och Orup när fosfor har gödslats enligt ersättningsprincipen. Heldragen trendlinje indikerar att p-värdet <0,001 och att där finns en statistisk signifikant skillnad. Den orangea linjen är nivån för rekommenderat underhålls P-AL (UPAL) för sockerbetor. 42
- Figur 5. Visar utvecklingen av P-AL-värdena (mg P/100g jord) mellan åren 1963–2023 på lokalerna Borgeby, Ekebo, Fjärdingslöv och Orup när fosfor har gödslats enligt ersättningsprincipen + 15 kg extra fosfor/hektar och år. På den nedre x-axeln visas mängden extra fosfor som har gödslats utöver ersättningsgödslingen varje växtföljd från 1963, mängden fosfor korrelerar med året på den övre x-axeln. Heldragna trendlinjer tyder på signifikanta skillnader och ett p-värde <0,001. Den orangea linjen är nivån för rekommenderat underhålls P-AL (UPAL) för sockerbetor. 43
- Figur 6. Utvecklingen av P-AL-värdena (mg P/100g jord) mellan åren 1963–2023 på lokalerna Borgeby, Ekebo, Fjärdingslöv och Orup när fosfor har gödslats enligt ersättningsprincipen + 30 kg extra fosfor/ha och år. På den nedre x-axeln visas mängden extra fosfor utöver ersättningsgödslingen som har gödslats varje växtföljd från 1963, mängden fosfor korrelerar med året på den övre x-axeln. Heldragna trendlinjer tyder på signifikanta skillnader och ett p-värde <0,001 Den orangea linjen är nivån för rekommenderat underhålls P-AL (UPAL) för sockerbetor. 45
- Figur 7. Illustrerar sockerskörden (ton/ha) i relation till jordens P-AL-tal (mg P/100g jord) vid en kvävetillförsel om 70 kg N/ha (t.v) och 140 kgN/ha (t.h) Sockerskörden som visas är sammanslaget från Borgeby, Ekebo, Fjärdingslövs och Orup och trendlinjerna representerar de fyra olika fosforgödslingsstrategierna i de långliggande bördighetsförsöken. På x-axeln visas de representerade P-AL-

talen och y-axeln visar sockerskörd i ton socker/ha. Heldragen trendlinje indikerar på signifikanta värden ($p < 0,001$).	46
Figur 8. Illustrerar förändring av sockerskörd (ton/ha) över tid mellan åren 1984–2024 vid en kvävetillförsel om 70 kg N/ha (t.v) och 140 kg N/ha (t.h). Sockerskörd som visas är sammanslaget från Borgeby, Ekebo, Fjärdingslövs och Orup och trendlinjerna representerar de fyra olika fosforgödslingsstrategierna i de långliggande bördighetsförsöken. På x-axeln visas tidslinjen från åren som sockerskördar har analyserats och y-axeln visar sockerskörd (ton socker/ha). Heldragen trendlinje indikerar på signifikanta värden ($p < 0,001$).	47
Figur 9. Boxplot-diagram över medelsockerskördarna (ton socker/ha) mellan åren 2021–2024 med jämförelse mellan radmyllad och bredspridd fosfor (t.v). T.h illustreras skillnaden i medelsockerskörd (ton/ha) mellan alla jordar i försöksserien som har ett P-AL-tal <IVA med jordarna som har fosforklass IVA, samt skillnaden i medelskörd beroende fosforgiva (kg P/ha) och på om fosfor har radmyllats eller bredspridits. Medelskördarna är sammanslagna från åren 2021–2024	48
Figur 10. Visar sambandet mellan sockerbetornas fosforinnehåll (%) och jordens P-AL-tal (mg P/100g jord), trendlinjer för de fyra olika fosforstrategierna visas (t.v). T.h i figuren visas utvecklingen av sockerbetornas fosforinnehåll (%) mellan 1964–2020 beroende på fosforstrategi. Heldragen linje indikerar på signifikanta värden ($p < 0,001$).	49
Figur 11. Visar sambandet mellan blastens fosforinnehåll (%) och jordens P-AL-tal (mg P/100g jord), trendlinjer för de fyra olika fosforstrategierna visas (t.v). T.h i figuren visas utvecklingen av sockerbetornas fosforinnehåll (%) mellan 1964–2020 beroende på fosforstrategi. Heldragen trendlinje indikerar på signifikanta värden ($p < 0,001$).	50

Förkortningar

Förkortning	Betydelse
NBR	Nordic Beet Research
Ha	Hektar
N	Kväve
P	Fosfor
K	Kalium
UPAL	Underhålls P-AL
AL	Ammoniumacetat-laktat

1. Introduktion

1.1 Syfte

Målet med studien var att genom analys av data från ettåriga och fleråriga fältförsök undersöka hur svenska betodlare ska fosforgödsla för att få optimal skörd och ekonomi i sin sockerbetsodling. Intentionen var att arbetet ska kunna vara ett beslutsunderlag för svenska odlare för planering av gödslingsstrategier till sockerbetor, oavsett om det är ettåriga arrendeavtal eller ägd mark. Genom att använda insamlade data från de långliggande bördighetsförsöken (R3-9001) var målet att jämföra hur P-AL-värdena utvecklas över tid mellan olika gödslingsstrategier och studera hur sockerskörden och fosforupptaget i sockerbetorna responderar på fosforgödsling. Nordic Beet Research (NBR) ettåriga försöksserie ”Ettårseffekter av fosfor” analyserades med syftet att se vilken mängd tillförd fosfor som betorna svarar bäst på beroende på appliceringsmetod, årsmån och jordens ursprungliga fosforstatus. För att klargöra hur svenska odlare bör utforma sin fosforgödslingsstrategi beroende på deras avsikt och ambition med sin växtodling, jämfördes data från tidigare nämnda fältförsök med relevant vetenskaplig litteratur.

1.2 Frågeställning

Hur bör man fosforgödsla för optimal skörd och lönsamhet ur ett ettårsperspektiv?

- Får man högre sockerskörd av att radmylla fosfor vid sådd i jämförelse med bredspridning av fosfor?
- Får man bättre lönsamhet i betodlingen av att radmylla fosfor vid sådd?
- Påverkar nederbördsmängden på våren effekten av att radmylla fosfor?

Hur påverkas skördenivån av jordens fosforstatus och hur ska man gödsla för att uppnå optimal fosforstatus och skördepotential i betodlingen?

- Bibehålls jordens P-AL-värde om fosfor tillförs i samma mängd som förs bort med skörden under flera årtionden?
- Ökar P-AL-värdet av att överskottsgödsla fosfor över flera årtionden?
- Ökar sockerskörden vid överskottsgödsling av fosfor och stigande P-AL-värden över tid

Hur påverkas sockerbetornas fosforupptag av jordens fosforstatus?

- a. Korrelerar sockerbetornas fosforkoncentration med jordens P-AL-värde?

1.3 Avgränsning

Den här studien fokuserade på fosforgödsling och effekten av fosfortillförsel på såväl sockerbetor som på markens fosforstatus. En stor del av data som har analyserats i studien kommer från de skånska försöksplatserna i bördighetsförsöken R3-9001 där olika fosforgödslingsnivåer jämförs med varandra. I försöket samgödslas alltid fosfor och kalium vilket innebär att det inte går att utesluta att kaliumgödslingen kan ha inverkan på resultatet i studien gällande skörderespons av fosforgödslingen. Detta då det är rimligt att anta en skördeökning vid större kaliumgivor. Vid kontroll av K-AL-värdena för de olika försöksplatserna begränsas skörden högst troligt på alla platser utom Fjärdingslöv i de ogödslade leden, detta eftersom att K-AL-värdena ligger under den svenska rekommendationen som är 8 mg K/100 gram torr jord (Nordic Sugar 2024c). I leden som får ersättningsgödsling eller ersättningsgödsling + extra kalium har alla platser K-AL >8, förutom Orup vid ersättningsgödsling, vilket troligtvis innebär att sockerskörden inte varit särskilt begränsad av kaliumbrist. I tidigare försök liknande bördighetsförsöken där kalium och fosfor har gödslats separat har fosfor stått för de stora skördeökningarna i sockerbetor (Gesslein 2001).

2. Bakgrund

2.1 Fosfor (P)

Fosfor (P) är ett essentiellt makronäringsämne för alla levande organismer, som har fångat flera generationer av forskares intresse. En effektiv fosforanvändning i betodling är intressant ur flertalet aspekter. Sockerbetor (*Beta vulgaris* L. ssp. *Vulgaris* var. *Altissima* Döll.) är en fosforkrävande gröda (Andersson et al. 2024), fosfor är en ändlig naturresurs (Cordell et al. 2009), fosforanvändning i Sverige är förknippat med övergödning i Östersjön (Eriksson et al. 2013) och det finns ett behov att bibehålla eller förbättra fosforstatusen i våra svenska jordar (Kirchmann et al. 2020).

Det finns flera långliggande fältförsök där den långsiktiga effekten av fosforgödsling har undersökts. Långliggande fältförsök kan definieras som fältförsök som varit aktiva längre än 20 år (Rasmussen et al. 1998) och det finns idag ett fåtal långliggande fältförsök som har varit aktiva längre än 100 år i Danmark, England, Frankrike, Tyskland och USA (Körschens 2006). De äldsta nu pågående långliggande försöken i Sverige startade upp på 1930-talet i Lanna (Carlgren & Mattsson 2001). Efter andra världskrigets slut försökte Sverige rationalisera jordbrukssektorn så som industrin tidigare hade gjort. När ett mer teknologiskt synsätt med oorganiska gödselmedel skulle tillämpas var forskare oroliga att människans inskränkning på odlingsmarken kunde få negativa konsekvenser, vilket initierade intresse för markvård. Avsaknaden av kunskap om odlar- och naturstyrda produktionsfaktorer ledde fram till att flertalet långliggande försök, som är aktiva än idag, anlades i Sverige på 1950–1960-talet (Jansson 1983), däribland de svenska bördighetsförsöken (Carlgren & Mattsson 2001).

Det mest kända och äldsta fosforförsöket i världen finns i Rothamsted, England som startade på 1840-talet (Syers et al. 2008) och på slutet av 1800-talet visade resultat från försöken att mer fosfor skall tillföras än vad som förs bort med grödan för att få acceptabla skördar på jordar med låga fosforvärden (Johnston et al. 1970). Upptäckten väckte intresse för fosforgödsling i jordbruket men även intresse och frågor kring den överskotts-fosfor i jorden som inte togs upp av grödan (Syers et al. 2008).

Idag vet vi att fosfor styr många viktiga processer i växten, bland annat respiration, fotosyntes och celldelning. Fosfor är även en viktig komponent i uppbyggnaden av kolhydrater, cellmembranens fosfolipider samt är aktivt i cellernas energitransport (Christenson & Draycott 2006). Sockerbetor är en fosforkrävande gröda som kräver

god fosforstatus i jorden och svarar bra på fosforgödsling, och bör därmed prioriteras när fosfor ska spridas i växtföljden (Andersson et al. 2024).

Intresset för fosforgödsling i sockerbetor ökade under första halvan av 1900-talet då det uppdagades att många jordar inte innehöll tillräckliga mängder växttillgängligt fosfor för att kunna tillgodose betornas behov. Dock så skedde ingen större förändring i fosforgödslingen förrän under andra halvan av 1900-talet då billigare fosforgödselmedel med högre koncentration fosfor ($>13\%$ P) blev tillgängligt (Christenson & Draycott 2006). Under den gröna revolutionen på 1950–1970-talet ökade fosforgödslingen dramatiskt i de industrialiserade jordbruksnationerna för att möta den växande befolkningsökningen, urbaniseringen och livsmedelsbristen i världen. Att fosforgödslingen blev en viktig faktor i den gröna revolutionen var dels på grund av den positiva skörderesponsen och, dels på grund av större fosforbrytning vilket ökade utbudet av billiga fosforgödselmedel (Ashley et al. 2011). Under 1960-talet uppdagades problemet med övergödning i sötvattenssystem kopplat till fosforanvändning, vilket har lett till att fosforgödslingen i mer utvecklade jordbruksnationer har minskat sedan 1970-talet (Syers et al. 2008).

2.1.1 Fosfors kemi i jorden och sockerbetan

Fosfor tas upp av växterna från marklösningen i form av de oorganiska fosfatjonerna, divätefosfat (H_2PO_4^-) och vätefosfat (HPO_4^{2-}) (Fogelfors 2015). Det är enbart en liten mängd av den totala fosfor i jorden som förekommer löst i markvätskan. Mängden kan variera kraftigt mellan olika jordar, från 3,1 mg/l i bördiga jordar till 0,00031 mg/l i tropiska fosforfattiga jordar (Syers et al. 2008). I svenska jordbruksjordar är mängden löslig fosfor ca 0,1–1 mg fosfor per liter, vilket motsvarar ofta mindre än ett kg löslig fosfor/ha (Bergström et al. 2008). Detta trots att den totala mängden fosfor/ha i matjorden varierar mellan 900 – 3600 kg med ett medelvärde om 2000 kg fosfor/ha matjord i Sverige (Bergström et al. 2008).

Att det är så stor skillnad mellan totala mängden fosfor och löslig fosfor i jorden beror på att majoriteten av jordens fosforförråd är bundet i mer eller mindre svårlösliga fosforformer. Fosfor kan vara bunden till järn- och aluminiumföreningar, organiskt material, bundet som primära mineraler eller utfällda sekundära mineraler (Eriksson et al. 2011). Syers et al (2008) redogjorde att fosfor kan anses förekomma i fyra olika pooler i jorden, växttillgängligt i lösning, lättlöslig adsorberad till ytkomplex, starkt bunden eller adsorberad med låg löslighet och mycket starkt bunden, otillgänglig eller utfälld fosfor som har väldigt låg löslighet. Fosfor kan mobilisera och immobilisera mellan de olika poolerna med hjälp av mikroorganismer i jorden (Condon et al. 2005). Lösligheten hos de

växttillgängliga fosfatjonerna är störst i pH-intervallet 6–7, det vill säga när jorden är svagt sur till svagt alkalisk. Tillgänglighetsmaximum i intervallet beror på att seskvioxidernas positiva laddningar minskar vid stigande pH, lösligheten hos Al^{3+} och Fe^{3+} är obetydlig vilket inte medbringa svårösliga fosfater som fälls ut, samt att det inte bildas svårösliga Ca-fosfater nära neutralt pH (Eriksson et al. 2011).

Den växttillgängliga fosfor transporteras främst till växtrötterna genom diffusion, en process som sker väldigt långsamt i jorden. Hastigheten av diffusion är så låg som 10^{-12} till $10^{-15} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Schachtman et al. 1998). Diffusion innebär att fosfor rör sig mot en koncentrationsgradient, från högre till lägre koncentration i jorden. Gradienten uppstår när växter tar upp fosfor vid rotzonen och koncentrationen fosfor i rhizosfären minskar (Syers et al. 2008). Fosfor kan även röra sig i jorden genom organismer, till exempel dagmaskar och med vattenrörelser i jorden (massflöde) (Larsen 1967).

Mängden löst fosfor i marklösningen är väldigt låg i förhållande till sockerbetors växtupptag. För att uppnå höga skördar tyder forskningen på att det krävs ett växtupptag om ungefär 35 kg fosfor/ha, men nivåer mellan 2–44 kg upptaget fosfor/ha har uppmätts vid skörd (Christenson & Draycott 2006). Nordic Beet Research har beskrivit att sockerbetor tar upp 20–40 kg fosfor/ha (Ekelöf 2016). Med ett upptag om 40 kg fosfor kan inte marklösningen vid ett enskilt tillfälle tillgodose betan med tillräckligt mycket fosfor trots att grödan gödslas. Därför är det av extremt stor vikt att jorden snabbt kan återfylla lagret av fosfatjoner i marklösningen efter växtupptag (Braun 2020). Jordens förmåga att snabbt fylla på förrådet av växttillgänglig fosfor benämns som P-buffringskapacitet. Desto högre buffringsförmåga en jord har, desto snabbare kan fosfor mobiliseras från fast till lös form. Buffringsförmågan tillsammans med fosforkoncentrationen i marklösningen är de viktigaste faktorerna som kontrollerar växttillgänglig fosfor i jorden (Syers et al. 2008).

Fosforgödsling med organisk och oorganisk fosfor bidrar direkt till förrådet av lättillgänglig fosfor och även till mer intermediära (labila) förråd i marken. Fördelningen mellan fosforpoolerna skiljer sig mellan olika jordar. På jordar med höga pH-värden över 7,3 så kan fosfor omvandlas via en serie olika kalciumfosfater i processen att bilda apatit. De intermediära formerna under apatitbildningen bidrar till poolen med labilt fosfor, vilket gör att sockerbetor ofta avkastar högre på den typen av jordar (Christenson & Draycott 2006).

2.1.2 Interaktioner mellan P och NK

Gällande begränsningar av växtnäringsämnen som kan leda till skördereduktion i lantbruksgrödor betraktas ofta växtnäringsämnen som oberoende av varandra. I de fall där växtnäringsämnen som till exempel fosfor och kväve antas vara beroende av varandra är det ovanligt att undersöka hur de interagerar med varandra, oftast beaktas en synergieffekt mellan de olika ämnena (Ringeval et al. 2021). Det finns exempel på att ökad kvävegödsling kan leda till ökad extracellulär fosfatasaktivitet vilket kan stimulera fosforupptaget hos grödor (Fujita et al. 2010). Spohn (2024) analyserade 60 års data från de långliggande bördighetsförsöken R3-9001, med syftet att jämföra hur grödorna tar upp kväve beroende på fosforgödslingen samt hur mycket fosfor de tar upp i förhållande till kvävegödslingen. I rapporten presenteras att det finns en synergisk sambegränsning mellan kväve och fosfor, där kväve oftast var den begränsande faktorn. Sockerbetor var den enda grödan som alltid hade en synergisk sambegränsad av fosfor och kväve, det vill säga att sockerbetorna alltid behövde fosfor och kväve för att ha optimal tillväxt oavsett plats och gödslingsstege. Detta är något som författaren tycker skall tas i beaktning vid gödslingsrekommendationer (Spohn 2024), vilket i praktiken kan innebära att kväve och fosfor bör samgödslas i sockerbetor. Kaliumgödsling kan också ha en positiv effekt på fosforupptaget. Studier som har genomförts i Egypten på höstvet (Triticum aestivum L.) har påvisat att kvävegödsling och kaliumgödsling ökar koncentrationen av såväl kalium som fosfor i grödan, framförallt på grund av ökad rottillväxt som leder till ett större näringsupptag (Mosaad & Fouda 2016). Att ökade kaliumgivor ökar upptaget av fosfor kan även styrkas av studier gjorda på höstvet tidigare under 2000-talet (Islam et al. 2004).

2.1.3 Fosfors funktion i sockerbetan och effekt på skörd och kvalitet

Fosforbrist i sockerbetor karaktäriseras av små kompakta plantor som kan upplevas mörkare i bladen och att undersidan av bladen kan ha en mer grå/lila-aktig nyans. Groddplantornas hjärtblad är ofta gula vid kraftig brist men de första örtbladen är gröna. Det är inte vanligt att se kraftiga bristsymptom i fält men plantorna växer långsammare och får mindre bladmassa. Det är även svårt att avgöra om lilaaktiga blad beror på fosforbrist. Bladen kan nämligen få en lila nyans av torka, kalla perioder, kvävebrist eller av växtskyddsmedel (Draycott 1993). Vid kraftig brist allokeras mer kolhydrater för rottillväxt som ofta leder till utveckling av mer små finrötter snarare än tillväxt av betroten (Ekelöf 2016). Fosforbrist förekommer oftare tidigare på säsongen om jorden är kall och torr samt när betornas rötter är små och outvecklade. Bristsymptomen kan försvinna i takt med att betorna växer och rötterna exploaterar mer jord innehållandes löslig fosfor. Även om fosforbristen kan försvinna under odlingssäsongen så är den potentiella rotskörden reducerad från start (Sims & Smith 2001). Risken för fosforbrist i jordar kan följaktligen

förvärras av icke neutralt pH och dåligt utvecklade rotsystem. Därav är det av stor vikt att ha en god markstruktur och bra dränering, som möjliggör goda förutsättningar för grödan att växa och utveckla robusta rotsystem (Andersson et al. 2024). Utöver god markstruktur är det väldigt viktigt att inte uppföröka nematoder och rotsjukdomar, vars angrepp kan reducera rottillväxten och därmed fosforupptaget (Syers et al. 2008). På de jordar som det finns befintliga bevattningsmöjligheter kan bevattning vid torra förhållanden användas för att öka fosfortillgängligheten (Ekelöf 2014).

Koncentrationen av fosfor skiljer sig i plantan. Procentuellt translokteras mest fosfor till blasten men roten innehåller mer totalt fosfor på grund av den större massan. För att få en hög sockerskörd bör koncentrationen fosfor av torrvikten vara $>0,15\%$ i roten och $>0,34\%$ i blasten vid skörd på hösten. Det motsvarar ca 20 kg fosfor/ha i roten och 15 kg fosfor/ha i blasten (Christenson & Draycott 2006). I svensk litteratur beskrivs det att blasten bör innehålla ca 0,40% under senare delen av säsongen (Ekelöf 2016).

Det finns forskning som visar att mellangrödor i växtföljden kan bidra till mer växttillgänglig fosfor för huvudgrödan och det är tre mekanismer som lyfts upp som extra viktiga. Mellangrödornas rotsystem kan exploatera nya delar av jorden, mobilisera lättlöslig oorganisk och organisk fosfor i jorden samt mineralisera organisk fosfor (Hallama et al. 2019). Grunwald et al. (2023) kom fram till att mellangrödor kan öka den tidiga tillväxten hos sockerbetor, ett stadie där betorna är som känsligast för fosforbrist, vilket förstärker tron om att mellangrödor kan bidra med mer växttillgänglig fosfor till sockerbetor.

Sockerindustrins pH-rekommendation har länge legat mellan pH 7–7,5 (Kirchmann et al. 2020), vilket kan medföra risk för fastläggning av fosfor, som blir otillgänglig för betorna. Sockerbetor uppvisar likväl positiv skörderespons till pH-värden över 7, så även jordar med höga pH-värden skall kalkas kontinuerligt med sockerbrukskalk trots risken för fastläggning av fosfor (Olsson et al. 2019). Orsaken till att betorna kan tillgodose fosfor även i jordar med höga pH-värden beror troligen på att sockerbetan försurar rhizosfären genom frigörandet av H^+ -joner som sänker pH och kan öka tillgängligheten av olika växtnäringsämnen till exempel fosfor (Hellgren 2003). Kirchman et al (2020) uppvisade i sin analys av olika svenska skördedistrikt och långliggande försök att högt pH och P-AL-tal (mängden lättlöslig fosfor i mg P/ 100 gram lufttorr jord) ökar sockerskördarna. I de långliggande försöken fann de ett tröskel-P-AL om 12,6 mg/100 g⁻¹ med 300 kg skördeökning per P-AL-enhet upp till tröskelvärdet. När data från skördedistriktens sockerbetsfält analyserades fann de ett tröskelvärde $> 9,5 \text{ mg/100g}^{-1}$ (Kirchmann et al. 2020). I

samma rapport anges tröskelvärde för pH 7,1 i bördighetsförsöken samt 7,2 i betfälten i studien.

2.1.4 Svenska fosforgödslingsrekommendationer baserat på mängden växttillgänglig fosfor i jorden

Det finns många olika analysmetoder för att mäta mängden växttillgänglig fosfor i åkermark (Wuenschel et al. 2015). I Sverige är de mest tillämpade metoderna för att bestämma mängden växttillgänglig fosfor och förrådsfosfor extraktion med AL- respektive HCl-lösningar, där mängden fosfor bedöms i mg P/100 gram lufttorkad jord (Eriksson et al. 2011). Ammoniumacetat-laktat är extraktionslösningen vid P-AL-extraktioner och har ett pH värde om 3,75. Sverige är ett av få länder som använder P-AL-extraktioner för att bestämma växttillgänglig fosfor Eriksson et al. (2013) och metoden har använts sedan 1960-talet i Sverige (Mattsson et al. 2001). P-AL-analyser fungerar bäst på jordar med pH lägre än 7 eftersom den sura lösningen extraherar fosfor bundet till kalcium, som vid högre pH-värden är svårtillgänglig för växter. Därför kan det vara motiverat att gödsla enligt fosforgödslingsrekommendationerna för en lägre fosforklass vid pH-värde över 7 (Andersson et al. 2024). Vid en HCl-extraktion används saltsyra med syftet att mäta fosforförrådet, det vill säga det långsiktiga förrådet av växttillgänglig fosfor i jorden. Lösningen är så sur så att nästan all bunden fosfor frigörs vilket inte ger information om mängden växttillgänglig fosfor i jorden (Mattsson et al. 2001).

På alkaliska jordar med högt kalkinnehåll kan istället Olsen-P metoden vara en mer optimal extraktionsmetod, där jorden extraheras med natriumkarbonatlösning som har ett pH värde på 8,5 (Olsen 1954). På grund av det höga pH-värdet i extraktionslösningen löses inte kalciumfosfater upp som de gör vid en P-AL-analys, vilket kan innebära att metoden ger ett mer rättvist svar om hur mycket växttillgänglig fosfor som finns i kalkrika alkaliska jordar. Olsen-metoden används inte i hög utsträckning i Sverige men är vanlig i andra europeiska länder vars jordar har kalkhaltigt modermaterial (Eriksson et al. 2011).

Vid fosforgödsling är det främst mängden växttillgänglig fosfor i jorden som är beslutsgrundande för gödslingsbehovet medan fosforförrådet är sekundärt (Eriksson et al. 2011). Även klassindelningen gällande fosforklasser i Sverige är baserat på mängden lättillgänglig fosfor (P-AL) som illustreras i Tabell 1 (Andersson et al. 2024). Att gödslingsrekommendationerna ser ut som de gör idag är tack vare långliggande fältförsök. Fosforrekommendationer utgår från en extraktionsanalys av växttillgänglig fosfor som har kalibrerats genom empiriska fältförsök där det statistiska sambandet mellan fosfor i jorden och relativskörd har studerats (Jordan-Meille et al. 2012). I rapporten "utvidgad tolkning av P-AL för

mark-och skördeanpassad fosforgödsling” presenteras att fosforgödslingseffekten påverkas av jordens mullhalt såväl som pH-värdet, vilket härleder till att dessa egenskaper bör tas i beaktning vid fosforgödsling tillsammans med jordens P-AL-klass (Mattsson et al. 2001). Nya gödslingsförsök från mullrika jordar samt mulljordar på Gotland har visat att P-AL-analysen måste korrigeras med jordens volymvikt för att få en rättvis bild över jordens fosforstatus innan gödselplanering görs (Gruvaeus 2024), vilket förstärker tesen om att jordens mullhalt måste tas i beaktning innan fosforgödsling.

Tabell 1. Jordbruksverkets fosforklassificering och halter av fosfor i jord för respektive klass (Andersson et al. 2024).

Fosforinnehåll			
Lättlöslig fraktion		Förrådsfraktion	
Klass	P-AL (mg/100 g torr jord)	Klass	P-HCl (mg/100 g torr jord)
I	<2	I	<20
II	2,0–4,0	II	20–40
III	4,1–8,0	III	41–60
IVA	8,1–12,0	IVA	61–80
IVB	12,1–16,0	IVB	>80
V	>16	V	

Jordbruksverkets rekommendationer för fosforgödsling baseras på jordens P-AL-klass där sockerbetors UPAL (underhålls P-AL) idag ligger på 10 mg P/100g jord vilket tillhör P-AL-klass IVA. UPAL är det P-AL-tal där det är ekonomiskt lönsamt att tillföra samma mängd fosfor som grödan för bort (Andersson et al. 2024). Rekommendationen är baserad på data från bördighetsförsöken som har bearbetats av Bertilsson et al. (2005). Vid lägre P-AL skall en viss uppgödsling ske och vid högre P-AL rekommenderas att tära på markens fosforförråd. Jordbruksverkets rekommendationer för fosforgödsling visas i Tabell 2, de räknar med att fosforgivan ska justeras med 0,33 kg fosfor/ha, per ton som avviker från normskörden om 65 ton betor/ha.

Tabell 2. Jordbruksverkets riktgivor för breddspridd fosfor för olika grödor, vid olika P-AL-klasser (Andersson et al. 2024).

Gröda	Skördenivå (ton/ha)	Bortförsel Av P (kg/ha)	Rekommenderad fosforgiva (kg/ha) vid olika P-AL-klass					
			I	II	III	IVA	IVB	V
Sockerbetor	65	21	60	45	35	25	10	0
Höstsäd	7	22	30	25	20	10	0	0
Höstoljeväxter	3,5	25	40	35	25	15	0	0
Vårsäd	5	22	25	20	15	5	0	0

Den svenska sockernäringen har också rekommendationer och riktlinjer för fosforgödsling till sockerbetor. Nordic Sugar i samarbete med NBR, Yara och Betodlarföreningens rekommendationer bygger på ett verktyg där mål-P-AL räknas för en hel sockerbetsväxtföljd snarare än enbart sockerbetsgrödan. Mål-P-AL ligger i klass IVA (10 mg P/100g jord) likt Jordbruksverkets rekommendation. I P-AL-klass IVA rekommenderas fosforgödsling efter ersättningsprincipen (Nordic Sugar c). Vid jämförelse av fosforgödslingsrekommendationen för 65 ton betor i P-AL-klass III ligger sockerindustrins rekommendation högre än Jordbruksverket, sockerindustrins fosforrekommendation illustreras i Tabell 3.

Tabell 3. Sockerindustrins riktgivor för fosforgödsling vid P-AL 6 (klass III). Riktgivorna är baserade på Yaras beräkningsverktyg (Nordic Sugar c)

Grödor i växtföljden	Skörd	Bortförsel	Rekommendation
	Ton/ha	Kg P/ha	Kg P/ha
Sockerbetor	65	26	64
Höstvete	8	26	28
Höstraps	4	24	34
Vårkorn	7	24	31

Även HIR Skåne, som är den största oberoende rådgivningsaktören i det svenska betodlingsområdet har fosforgödslingsrekommendationer för sockerbetor (Tabell 4). De rekommenderar långsiktigt P-AL-klass IV och för fosforklass III ligger deras fosforrekommendation mellan Jordbruksverket och sockerindustrin räknat till kilo fosfor/ton rotskörd. Likt Jordbruksverket skall fosforgivan justeras med 0,33 kg fosfor/ha för varje ton betor som avviker från normskörden om 70 ton/ha (Hansson 2024).

Tabell 4. HIR Skånes riktgivor i olika grödor för PK-gödsling i olika grödor vid olika P-AL- och K-AL-klasser (Hansson 2024).

	Skörd ton/ha	Fosfor-klass		
		II	III	IV
Vårsäd	7	30	25	10–15
Trindsäd	4	20	15	0
Sockerbetor	70	60	50	30

Fosforgödselmedel och appliceringsteknik

Fosfor kan appliceras på flera olika sätt med flertalet olika fosforkällor. De primära fosforkällorna i svenskt lantbruk kommer från mineralgödsel, flytande gödsel, stallgödsel, biogödsel, avloppsslam och restprodukter från industrin. För sockerbetor finns det en speciell framtagen sammansatt mineralgödselprodukt (YaraMila ProBeta) som matchar betans näringsbehov (Andersson et al. 2024) (YARA n.d). Fosforgödsel kan dessutom appliceras med olika metoder, den kan till exempel bredspridas innan eller efter sådd, myllas ner innan sådd alternativt radmyllas vid sådd. Tidig forskning från mitten av 1900-talet visade att tiden för fosforgödslingen inte spelade någon roll när spridning av fosfor på hösten innan sockerbetorna jämfördes med vårspridning. Resultatet bekräftades även på 1990-talet där det inte fanns någon effekt på sockerskörden av olika spridningsdatum, dock så skulle fosfor med fördel spridas när risk för skördereducerande markpackning var som lägst (Christenson & Draycott 2006). Roberts & Johnston (2015) presenterade att grödans fosforupptag påverkas av lantbrukarens management, fosforeffektiviteten kan öka om rätt fosforkälla i rätt mängd används vid rätt tidpunkt på rätt plats. I ett stort projekt kallat 5T (Tillväxt Till Tjugo Ton 2020) som drevs i NBR:s regi jämfördes skörderesultatet från alla svenska och danska betodlare med 5T gårdarna som skulle representera några av de bästa odlarna i båda länderna. En av de viktiga åtgärderna som särskilde 5T-gårdarna från resten var att merparten radmyllade gödning vid sådden (Olsson 2018). Att radmyllning har positiv effekt på sockerskörden kan styrkas av Sims & Smith (2001) försöksresultat från 1997 och 1998 i Red River Valley, USA. I Sverige har flertalet olika radmyllningsförsök av fosfor genomförts sedan tidigt 1980-tal. Resultaten från de senaste 40–50 årens försök har mynnat ut i att rekommendationen är att radmylla fosfor eftersom det ger en stabilare odling, mindre behov av dyra specialgödselmedel samt högre sockerskörd (Ekelöf 2020). Effekten av placerad fosfor framträder tydligare när jorden är kall och rottillväxten är låg tidigt på säsongen (Ekelöf 2016). Sockerindustrin rekommenderar att mineralgödseln skall radmyllas vid sådd i en sträng 6 cm sidan om betfröet och 3-

6 cm djupare än fröet (Nordic Sugar 2024b). När fosfor placeras i nära anslutning till betfröna genom radmyllning kan växtrötterna snabbare nå den växttillgängliga fosfor. Dessutom leder denna metod till en mättnad av jorden kring gödseln nära fröna, vilket minskar risken för fosforbrist och ökar tillgången för plantorna (Ekelöf 2020). Det är viktigt att ha i beaktning att max 22 kg fosfor får spridas med organiska gödselmedel per spridningsareal och år över en femårsperiod, räknat som medeltal över hela spridningsarealen (Andersson et al. 2024).

3. Metod

3.1 Bördighetsförsöken (R3-9001)

I denna rapport har data samlats in och analyserats från försökserien "De svenska bördighetsförsöken" (Försöksbeteckning: R3-9001), med syftet att följa utvecklingen av jordens fosforstatus över tid vid olika PK-gödslingsstrategier och hur det har påverkat avkastning, ekonomi samt effekten av kvävegödsling i svensk betodling. Datainhämtningen är begränsad till enbart de skånska försöksplatserna, då de andra försöksplatserna i serien inte har sockerbeter i växtföljden.

Försökserien anlades på 12 platser mellan åren 1957–1969, varav fem av försöksplatserna placerades i Skåne år 1957. Två av försöksplatserna, Fjärdingslövsgården och Örja/Borgeby anlades på vad som ansågs vara bördiga lokaler med avseende på jordmån och klimat. Försöksplatserna på Ekebo, Orup och S:a Ugglarp ska representera mindre bördiga odlingslokaler. Fyra av de fem ursprungliga försöken är ännu aktiva, då serien på S:a Ugglarps avslutades 2008. Försöket i Örja flyttades till Borgeby 2010 (Nilsson 2010), genom att matjorden från samtliga rutor transporterades under kontrollerade former. Äldre analysdata från Örja är sammansatt med analysdata från Borgeby. När den här studien genomförs så odlas sockerbeter på samtliga skånska försöksplatser vilket innebär att det 15e växtföljdsomloppet avslutas.

3.1.1 Försöksupplägg och gödsling

Försöksserien består av två olika växtföljder, en kreaturshållande växtföljd (I) samt en kreaturslös växtföljd (II) som illustreras i Tabell 5. I växtföljd I har stallgödsel tillförts alla led kontinuerligt vart fjärde år sedan försökens start. Gödslingen sker alltid på hösten efter skörd av höstvet. Från 2007 har fastgödsel ersatts av flytgödsel. Samtidigt har gödselgivan justerats upp från 20 ton/ha till 25 ton/ha. All halm, sockerbetsblast och vallskörd förs bort från fält efter skörd, där vallen skördas en gång per år. I växtföljd II som ska spegla växtodling utan integrerad djurhållning brukas all halm från spannmålen och blasten från sockerbeterna ner och ingen stallgödsel tillförs.

Tabell 5. Växtföljderna i växtföljdsomlopp 15 & 16.

År		Växtföljd	
Oml 15	Oml 16	I	II
21	25	Korn	Korn
22	26	Vall	Havre
23	27	Höstvete	Höstvete

24	28	Socketbetor	Socketbetor
Växtföljderna har ändrats under försöksseriens gång. Klumprotsjuka, fågelangrepp och risk för växtföljdssjukdomar är några av anledningarna. Sedan 2022 har havre ersatt oljeväxterna för att inte riskera uppförökning av sjukdomar och skadegörare i oljeväxter samt sockerbetor.			

Försöksplanen är uppbyggd på de två växtföljderna samt två olika gödslingsstegar om vardera fyra nivåer, en PK-stege och en N-stege. Totalt blir det $2 \cdot 4 \cdot 4 = 32$ led. Med två block blir det totalt 64 rutor i försöken där varje försöksled gödslas individuellt efter försöksplanen som visas i Tabell 6.

Tabell 6. Försöksplan R3-9001, försöksplanen illustrerar fördelningen mellan de två olika växtföljderna och de två olika blocken. Alla rutor redovisas i tabellen med rutnummer 1–64, samt vilken PK giva (A-D) och kvävegiva (1–4) rutorna som tillförs

Block I																Block II															
Växtföljd I																Växtföljd II															
116																4964															
1	2	3	4	3	4	1	2	4	1	2	3	2	3	4	1	4	2	3	1	2	1	4	3	1	3	2	4	3	4	1	2
A				B				C				D				B				A				C				D			
1	2	3	4	3	4	1	2	4	1	2	3	2	3	4	1	4	2	3	1	2	1	4	3	1	3	2	4	3	4	1	2
3348																1732															
Växtföljd II																Växtföljd I															

Försöken PK-gödslas två gånger per växtföljd med lika stora delgivor. På våren till vårkorn (*Hordeum Vulgare*) och på hösten efter skörd av höstvet. Varje växtföljdsomlopp beräknas den totala bortförseln av PK vilket lägger grunden för gödslingsnivån till nästkommande växtföljdsomlopp. Därav kan mängden PK-gödsel variera med tiden. Mängden mineralgödsel varierar även mellan de olika växtföljderna eftersom PK i stallgödseln räknas med i gödslingsplanen. Det innebär att det krävs mer mineralgödsel i den kreaturslösa växtföljden för att uppnå samma PK-nivå. I samband med spridning av stallgödsel har den analyserats. Parametrarna som analyseras är; aska, $\text{NH}_4\text{-N}$, tot-N, P, K och TS. De olika PK-stegarna illustreras i Tabell 7.

Tabell 7. PK-gödslingsnivåer för led A-D

	P	K
Led		
A	Ingen P-gödsling	Ingen K-gödsling
B	Ersättning av bortförd P	Ersättning av bortförd K
C	Ersättning + 15 kg P	Ersättning + 40 kg K
D	Ersättning + 30 kg P	Ersättning + 80 kg K

Kvävegödslingen i försöket sker på våren och tillförs i form av N28 (kalkammonsalpeter). Kvävet gödslas i engångsgivor i samtliga försöksled som ska tillföras kväve enligt Tabell 8. Till skillnad från PK-gödslingen så justeras inte gödslingsnivån beroende på om stallgödsel tillförs eller ej. Kväve-leden i de olika växtföljderna får därmed samma tillförd mängd mineralgödselkväve.

Tabell 8. Kvävegödslingsnivåer i led 1–4 för varje gröda.

Gröda	N-nivå (Kg N/ha)			
	1	2	3	4
Korn	0	30	60	90
Vall/havre	0	50	100	150
Höstvete	0	50	100	150
Sockerbetor	0	70	140	210

Utöver PK- och kvävegödsling tillförs 200 kg Besal (39% Na, 60% Cl) i hela sockerbetsförsöket för att förse betorna med natrium. Hela försöket gödslas även med kiserit (17% Mg, 23% S) på våren i vall/havre, en gång per växtföljdsomlopp. Kalk har spridits i omgångar enligt Tabell 9 och bekämpning av ogräs, insekter och skadegörare sker efter behov.

Tabell 9. Schema över var och när kalkspridning har skett med vilket kalkmedel på samtliga försöksplatser. Nordkalk plus erhåller ca 50% CaO.

	Fjärdingslöv	Örja	Orup	Ekebo
1981	2 ton <u>CaO</u> /ha	2 ton Cao/ha	1 ton Cao/ha	1 ton Cao/ha
1996			4 ton/ha <u>Ignaberga kalk</u>	4 ton/ha <u>Ignaberga kalk</u>
2013			8,3 ton/ha Nordkalk plus	8,3 ton/ha Nordkalk plus
2014	5,4 ton/ha Nordkalk plus	5,4 ton/ha Nordkalk plus	5,4 ton/ha Nordkalk plus	5,4 ton/ha Nordkalk plus

3.1.2 Gradering och provtagning

Graderingar utförs varje år i alla grödor. I denna studie har enbart graderingar i sockerbetsgrödan analyserats. Okulära graderingar sker löpande under säsongen och graderingarna bedöms i en skala från 0–100, med undantag för plantantalet som räknas. De graderingar som sker under säsong är planttäthet/plantantal, sjukdomar och eventuella bristsymptom. En yta om $2 \times 10 \text{ m}^2$ per bruttoruta skördas och vägs i samtliga rutor i försöket. Efter skörd görs en SSA-analys och ett mosprov där halten N, P, K samt TS-värden tas fram. I växtföljd I skördas även blasten, som sedan vägs och analyseras från 10 betor i respektive skörderuta. I blasten analyseras N, P, K och TS-halten. Med start 2016 bestäms även viktförhållandet mellan beta och blast.

Sedan försökets start har jordprover tagits efter skörd av höstveten innan gödsling med PK och stallgödsel. Matjordsprover (0–20 cm) tas varje växtföljdsomlopp och alvprover (40–60 cm) har tagits vartannat, dock tas inga alvprover tills vidare. Sedan 2015 tas rutvisa prov och provsvaren innehåller; N, K-AL, P-AL, pH och total C. I Fjärdingslöv analyseras även mängden organiskt kol i marken. Data från markkartering vid försökets start redovisas i Tabell 10.

Tabell 10. Ursprungsvärden för markparametrar på alla försöksplatser, P och K i $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ torr jord}$, organiskt kol i procent av torrsubstansen (Carlgren & Mattsson 2001). Observera att försöket i Örja har flyttats till Borgeby.

Plats	Jordlager	Org. C (%)	Lerhalt (%)	pH	P-AL	P-HCL	K-AL	K-HCL
Fjärdingslöv	0–20	1.4	17	7.5	3.3	26	4.2	62
	30–50		17	7.7	2.5	25	3.6	60
	50–100		13	8.0	4.9	49	5.2	58
Orup	0–20	2.4	13	6.2	2.4	53	3.8	47
	30–50		15	6.6	1.6	46	4.4	71
	50–100		12	7.1	10.9	64	4.3	81
Örja	0–20	1.5	15	7.2	5.9	36	8.0	115
	30–50		19	7.3	2.9	27	5.9	109
	50–100		32	7.7	2.1	31	11.0	220
Ekebo	0–20	3.1	14	6.8	6.7	37	5.4	56
	30–50		15	5.4	0.7	19	3.6	68
	50–100		17	5.7	0.5	28	5.0	65

3.2 Ettårseffekter av fosfor

Data från Nordic Beet Researchs försöksserie ”Ettårseffekter av fosfor” har bearbetats och analyserats i denna studie. Försöksserien har omfattat tre försök per år, mellan åren 2021–2024. Försöken har placerats på fält med olika fosforstatus, vilkas har klassificerats följande: fält med väldigt lågt P-AL, lågt P-AL och fält med medelgod status, se Tabell 11. Medelgod status innebär ett P-AL-tal i fosforklass IVA som är rekommendationen för sockerbetor.

Tabell 11. Fosforklasser för de olika försöksplatserna mellan åren 2021–2024. Fosforklasserna är indelade efter jordens P-AL-värde. Siffrorna innan försöksplatsen är försöksnummer.

År	Plats	P-AL	Klass	Nivå
2021	271 Pete	3,8	II	Mycket låg
2022	270 Alna	4,4	III	Mycket låg
2023	270 Borg	3,6	II	Mycket låg
2024	270 Kabb	3,1	II	Mycket låg
2021	270 Träa	4,6	III	Låg
2022	271 Gisl	5,9	III	Låg
2023	272 Ädel	5,3	III	Låg
2024	272 Ädel	6,6	III	Låg
2021	272 Bjäl	9,2	IVA	Medel
2022	272 Toft	9,1	IVA	Medel
2023	271 Hvid	8,7	IVA	Medel
2024	271 Vrag	8,4	IVA	Medel

Försöken var uppbyggda av fyra block med 9 led vardera. Leden består av olika fosforgivor som antingen placeras eller bredsprids enligt Tabell 12. Fosfor appliceras i form av P20, som är en ren fosforprodukt. Övriga näringsämnen tillfördes i lika stor mängd i samtliga försök, utöver P20 vid sådd radmyllades NK 14–20 + Ca från sålådor under sådd och Besal (Na) och Kiserit (Mg & S) bredspriddes innan sådd. Växtskydd kördes efter behov.

Tabell 12. Appliceringsmetod och fosforgiva i alla 9 led. 15 kg radmyllad- och 120 kg bredspridd fosfor har inkluderats för att testa hypotesen att mindre fosfor behövs för god sockerskörd om fosfor radmyllas istället för att bredsprids.

Led	P-giva (kg P/ha)	Appliceringsmetod
1	0	
2	30	Bredspritt
3	60	Bredspritt
4	90	Bredspritt
5	120	Bredspritt
6	15	Radmyllad fosfor
7	30	Radmyllad fosfor
8	60	Radmyllad fosfor
9	90	Radmyllad fosfor

Jordprov för analys togs i samtliga försök varje år för att kunna identifiera skillnader i gödslingsrespons beroende på jordens fosforklass, samt för att hitta försöksplatser med olika fosforklasser varje år. Analysresultat från alla jordprover på samtliga försöksplatser presenteras i Tabell 13.

Tabell 13. Analysvärden från samtliga jordprover från alla platser alla år, samt information om förfrukt, sort och såteknisk information.

Soil Analysis	2021		2021		2021		2022		2022		2022		2023		2023		2023		2024		2024		2024	
Trial number	270 Trää		271 Pete		272 Bjäl		270 Alna		271 Gisl		272 Toft		270 Borg		271 Hvid		272 Ädel		270 Kabb		271 Vrag		272 Ädel	
	Klass		Klass		Klass		Klass		Klass		Klass		Klass		Klass		Klass		Klass		Klass		Klass	
pH-värde	6,8		6,4		7,0		7,3		7,3		7,4		6,6		6,2		7,0		7,1		7,1		7,8	
P-AL (mg/100 g jord)	4,6	III	3,8	II	9,2	IVA	4,4	III	5,9	III	9,1	IVA	3,6	II	8,7	IVA	5,3	III	3,1	II	8,4	IVA	6,6	
K-AL (mg/100 g jord)	8,3	III	5,5	II	10,5	III	7,3	II	5,7	II	8,4	III	8,3	III	12,0	III	10,9	III	6,5	II	7,2	II	7,2	
Ca-AL (mg/kg jord)	276		205		373		194		256		283		279		170		310		227		271		303	
Organic matter (%)	2,8		1,7		2,2		2,3		2,2		1,9		3,1		4,3		2,2		2,0		3,2		2,4	
Clay (%)	15		14		27		12		14		18		13		17		18		18		17		18	
Pre-crop	Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete		Höstvete	
Variety	Caprianna		Smart Rivetta		Caprianna		Caprianna		Smart Sinja		Caprianna		Smart Sinja		Caprianna		Fabienna		Smart Iberia		Gabriela		Smart Iberia	
Row spacing	48		48		48		48		48		48		48		48		48		48		48		48	
Seeds/m	5,6		5,6		5,6		5,4		5,4		5,4		5,4		5,4		5,4		5,5		5,5		5,5	
Plot length	8		8		9		8		8		8		8		8		8		8		8		8	

Betgrödan i försöksserien har odlats året efter höstvetete i samtliga försök. Mellan åren och försöksplatserna har såväl sockerbetsorterna som planttätheten vid sådd skiljt sig åt. Radavstånden i alla försök har varit 48 centimeter och antalet betor per löpmeter har varierat mellan 5,4–5,6 vilket ger en utsädesmängd om 112 500–116 667 plantor/ha. För att veta den faktiska planttätheten har planräkning skett i alla försöken, alla år. Dessutom har försöken fotograferats med drönare under säsong för att kunna se visuella effekter på fosforstegarna samt att säkerställa att försöksrutorna ser bra ut och inte skall tas bort ur statistiken. Försöken har skördats i samband med försöksvärdens sockerbetor. Det innebär att försöken är skördade vid olika datum, vilket kan påverka resultatet.

3.2.1 Väderdata

För att studera nederbördsmängden påverkan på effekten av att radmylla fosfor samlades öppna mätdata in från olika väderstationer som tillhandahölls av Lantmet, SMHI och Trafikverket. Mätområdet sattes med utgångspunkt i Örtofta som är centrum på odlingsområdet och medelvärde från alla mätstationer inom en mils radie samlades in. Tidsperioden för insamlad nederbörd (15 april – 1 juli) bestämdes i samråd med Joakim Ekelöf, NBR som även hjälpte till att tillhandahålla väderdata.

3.2.2 Ekonomi

De ekonomiska beräkningarna har gjorts i Microsoft Excel 365 (Microsoft 2025) och det är endast intäkten från sockerskörden som tas hänsyn till, vilket påverkas av rotskörd, sockerskörd och renhet då priset för socker är samma för all data som bearbetats. Priset på sockerbetor som använts för att räkna på ekonomin i de olika gödslingsstrategierna är grundpriset för betodlare som ska leverera sockerbetor kampanjen 2025/2026. Avtalet är satt efter förhandling mellan betodlarföreningen och Nordic Sugar. Grundpriset är satt till 36 €/ton med en eurokurs om 11,40 kronor, vilket blir ca 410 kronor/ton. Grundpriset gäller för vikten rena betor med en sockerhalt om 17%, i priset som används ingår inga tillägg för tidig eller sen leverans, täckningstillägg eller kontrakteringsbonusar (Nordic Sugar 2024a). Data som redovisar intäkterna har tillhandahållits av NBR. I praktiken hade då det ekonomiska utfallet kunnat bli annorlunda, då det finns många kostnader förknippat till gödslingsstrategier för sockerbetsodling. Till exempel kan gödselprodukt och pris variera mellan olika företag och år.

3.3 Statistisk analys och datahantering

3.3.1 Datahantering

Data från de långliggande bördighetsförsöken har tillhandahållits av institutionen för mark och miljö vid Sveriges Lantbruksuniversitet, och data från försöksserien ”Ettårseffekter av fosfor” erhöles av NBR som är beställare av försöksserien. All data från båda försöksserierna har analyserats i Microsoft Excel 365 (Microsoft 2025) där det stora jobbet har varit att sortera och filtrera fram data som kan svara på studiens frågeställningar och som ger en större överblick över datamängden med möjligheten att upptäcka om data saknas från olika fält eller år. Data som har saknats i ursprungsfilerna för bördighetsförsöken har kompletterats med ej digitaliserade data från försöksresultatspärmar på SLU Ultuna, i den mån det har gått.

3.3.2 Regressionsanalys 727 Bördighetsförsöken

Linjära regressioner utfördes i Microsoft Excel 365 (Microsoft 2025) för att undersöka samband mellan P-AL, sockerskörd och betans fosforinnehåll, samt hur dessa variabler förändrats över tid. Analyserna genomfördes separat för varje fosforgödslingsnivå. Vid signifikanta resultat ($p < 0,001$) har trendlinjer markerats som heldragna i figurerna. Förklaringsgrad (R^2), estimat och k -värden redovisas i Tabell 14). Data som har används för analyserna har varit ledvis och inte rutvis då det har saknats digitaliserad rutvisa data för till exempel, P-AL-värden mellan åren 1995–2015. Beroende på hur kompletta dataseten har varit så olika tidskalor används. För sockerskörd har data från åren 1984–2024 analyserats, P-AL-värden mellan åren 1963–2023 och fosforinnehållet i blast och betrot från åren 1964–2020. I analyser av sockerskörd och fosforkoncentration har kvävenivåerna med 0 och 210 kg kväve/ha filtrerats bort för att få mindre variation, eftersom för låga och höga givor har stor påverkan på skörd och fosforkoncentration. Kvävenivåerna 70- och 140 kg kväve/ha har använts, då de nära den rekommenderade kvävegödslingsnivån i Sverige. För att underlätta datahanteringen och regressionsanalyserna har markkarteringsdata från markkarteringen som utförs året innan betorna i växtföljden behandlats som representativa för betåret. Alla k -värden för trendlinjerna har kontrollerats med hjälp av regressionsanalyser i R (R Core Team 2024) och RStudio (Posit Team 2024) när de sammansatta diagrammen har gjorts för att säkerställa att lutningen på trendlinjerna är samma i Excel som i R. Följande R-paket har används i analyserna:

- cowplot (för att göra sammansatta diagram)
- ggplot2 (för visualisering)
- readexl (för att läsa in Excel-filer)

Tabell 14. Visar vilka samband som har undersökts i regressionsanalyser för att besvara frågeställningarna med utgångspunkt ur bördighetsförsöket. X markerar om regressionsanalys har utförts mellan variablerna på y- och x-axeln.

	X-axel		
	P-AL (mg P/100g jord)	Tid (år)	Mängd extra tillförd fosfor (kg P/ha)
Y-axel			
P-AL (mg P/100 g jord)		X	X
Fosforinnehåll i betrot (%)	X	X	
Fosforinnehåll i blast (%)	X	X	
Sockerskörd (ton/ha)	X	X	

3.3.3 Statistisk analys Ettårseffekter av fosfor

För att göra en statistisk analys på hur appliceringsmetod och fosforgödselgiva påverkar sockerskörden har data från försökserien "Ettårseffekter av fosfor" analyserats. Analysen genomfördes med hjälp av R (R Core Team 2024) och RStudio (Posit Team 2024) och var en "linear mixed-effects model" från lme4-paketet som användes med syftet att analysera data med upprepade mätningar från de olika försöken. Modellen används för att undersöka effekten av appliceringsmetod (Applicering) och fosforgiva (Fosforgiva) på sockerskörden (Socker). Där appliceringsmetoderna som jämförs är radmyllning och bredspridning på nivåerna 30-, 60- och 90 kg tillförd fosfor/ha. Den använda modellen var:

```
sugarmodel <- lmer (Socker ~ Fosforgiva + Applicering + Fosforgiva:Applicering
+ (1|År) + (1|År:trialno) + (1|År:trialno:Block), data = data).
```

För att modellen inte skulle bli viktad eller obalanserad filtrerades 15 kg radmyllad fosfor samt 0- och 120 kg bredspridd fosfor bort. "Effects model" betyder att modellen har fasta effekter (fixed) där modellen ser om appliceringsmetod och fosforgiva har någon interaktion, modellen testas exempelvis om effekten på fosfornivå skiljer sig beroende på appliceringsmetod. Modellen tar även hänsyn till att det kan finnas variationer mellan åren (År), plats (trialno) och blocken i varje

försöksplats (Block) och antar att det finns slumpmässiga variationer i datan. Efter den mixade modellen testades statistisk signifikans ($p < 0,001$) för de fasta effekterna och deras interaktion testade med en variationsanalys (ANOVA) med Kenward-Roger-korrektion.

För att undersöka om jordens fosforstatus har någon påverkan på sockerskörden beroende på hur fosfor appliceras och i vilken mängd användes en statistisk modell där en parvis jämförelse genomfördes med hjälp av emmeans-paketet i R. Tukeys-korrigerade t-tester användes för att undersöka skillnader i sockerskörd mellan de olika grupperna. Innan analysen exkluderades observationer där det saknades data för att säkerställa korrekt analys.

Följande R-paket användes i analysen:

- dplyr (för datamanupulation)
- ggplot2 (för visualisering)
- lmerTest, lme4 och pbkrtest (för linjära mixade modeller)
- readexl (för att läsa in Excel-filer)
- emmeans (för post-hoc jämförelser).

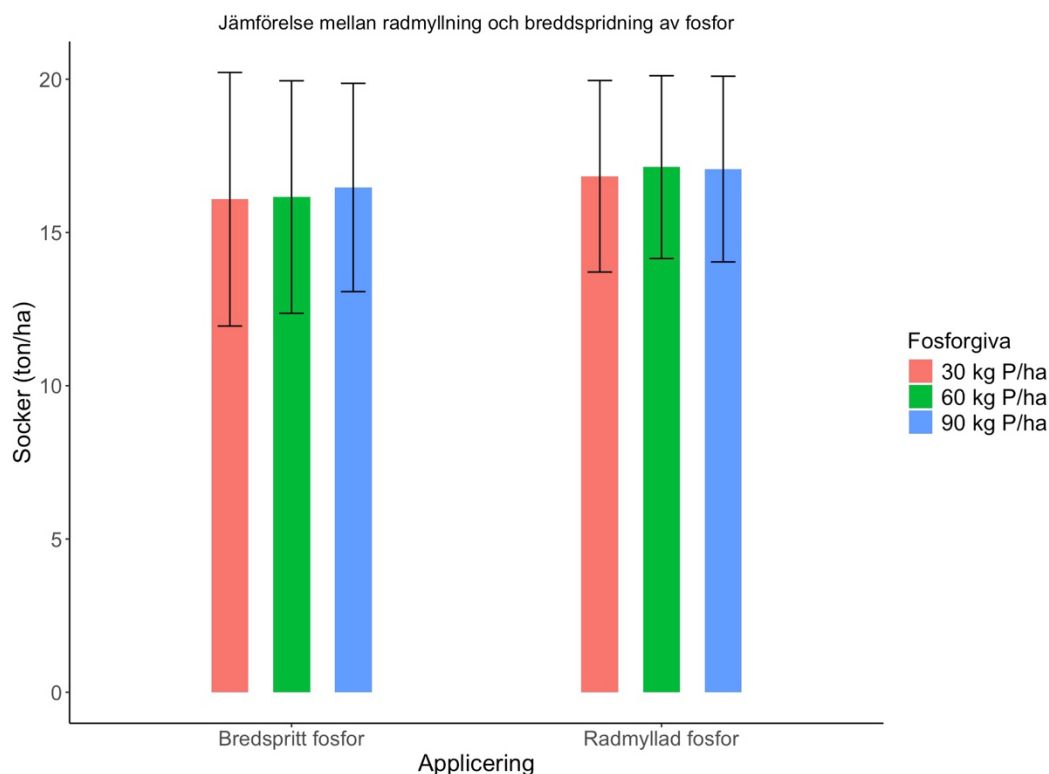
4. Resultat

4.1 Fosforgödslingsstrategi för optimal skörd och lönsamhet ur ett ettårsperspektiv

4.1.1 Appliceringsmetodens och fosforgivans effekt på sockerskörden

Radmyllning hade en signifikant positiv effekt på sockerskörden ($p < 0,001$) i jämförelse med bredspridning, medan stigande fosforgiva inte gav signifikanta skördeökningar ($p = 0,23$) (Figur 1). Vid jämförelse mellan de båda appliceringsmetoderna gav radmyllning en skördeökning om 0,75 ton socker/ha, i jämförelse med bredspridning före sådd. Ingen signifikant interaktion observerades vid stigande fosforgiva eller för sambandet mellan appliceringsmetod och fosforgiva ($p = 0,88$), vilket tyder på att effekten av ökad fosfortillförsel är densamma oavsett appliceringsmetod och skördeökningen i modellen är kopplat till appliceringsmetod enbart. Skördeökningarna till följd av radmyllning och ökade fosforgivor illustreras i Figur 1.

Av de slumpmässiga effekterna block, år och försöksplats i den linjära mixade modellen, var det variationen mellan försöksplatserna som hade störst påverkan på den slumpmässiga variansen. Detta visar att fältförhållande och odlingslokal spelar en avgörande roll för sockerskörden, medan variationer mellan år och block hade mindre påverkan i modellen. Det är dock viktigt att beakta att variationen mellan år och plats inte är helt oberoende av varandra, eftersom förhållandena på de olika platserna kan kopplas till väderfaktorer, som kan variera mellan olika år.



Figur 1. Illustration av skillnaden i sockerskörd (ton/ha) beroende på om fosfor har radmyllats eller bredspridits i samband med sådd. De tre fosforgivorna som har inkluderats i ANOVA-analysen jämförs inbördes i respektive appliceringsmetod. Felstaplarna visar standardavvikelsen. Medelskörden är samlad från alla försöksplatser åren 2021–2024 från led 2,3,4,7,8 och 9.

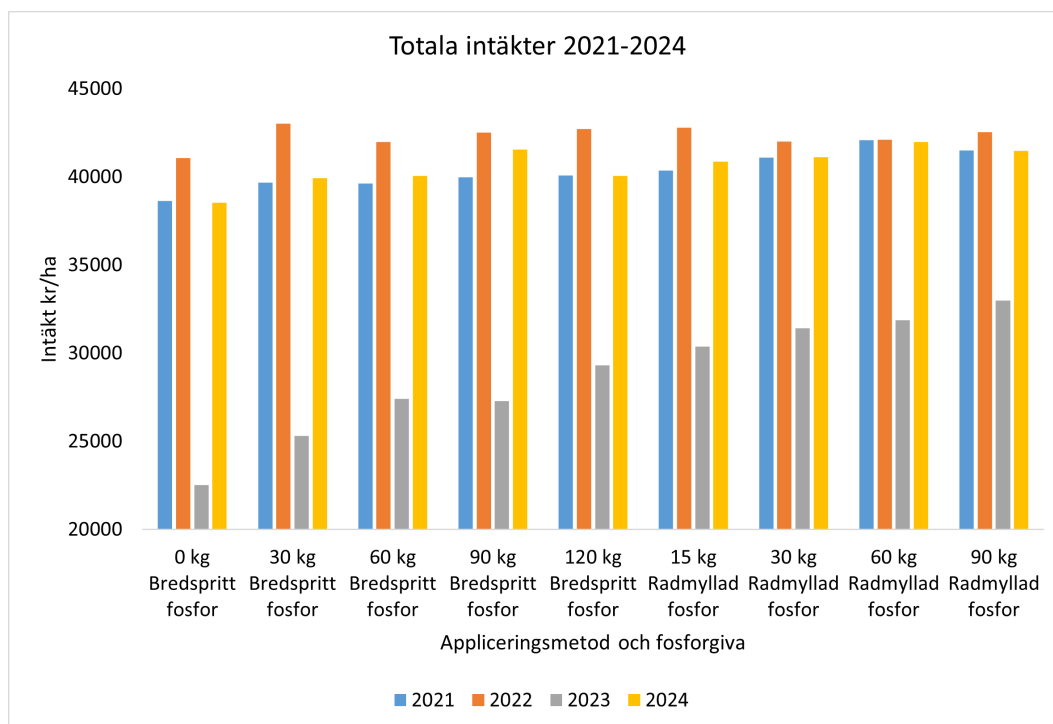
4.1.2 Appliceringsmetodens och fosforgivans effekt på betodlingens lönsamhet

Detta försök visar att för att uppnå högst möjliga intäkt i betodling ska höga fosforgivor radmyllas vid sådden. Resultaten från beräkning av intäkten i medeltal/ha beroende på appliceringsmetod och fosforgödselgiva, för alla försök, alla år illustreras i Tabell 15. 0 kg tillförd fosfor är referensled och tabellen visar att medelintäkten ökar med stigande fosforgiva (ej signifikant) samt om fosfor radmyllas vid sådd, vilket är ett resultat av stigande rotskörd och sockerhalt. Högst medelintäkt om 39 499 kr/ha erhöles om 90 kg fosfor radmyllades, vilket är 4587 kronor mer än referensledet/ha. Ett uppseendeväckande resultat är att leden som fick 15 kg radmyllad fosfor hade högre medelsockerskörd och medelintäkter än 120 kg bredspridd fosfor, över försöksseriens fyra år.

Tabell 15. Medelintäkten för alla led mellan åren 2021–2024, med 0 kg tillförd fosfor som referensled. Från vänster: rotskörd (ton/ha), sockerhalt (%), sockerskörd (ton/ha), relativtal sockerskörd, intäkt (kr/ha), intäktsökning mot referensled (kr/ha).

Sammanställning intäkter			Rot	Socker	Socker	Socker	Ekonomi	Ekonomi
Ettårseffekter av fosfor alla platser 2021–2024			Ton/ha	%	Ton/ha	Relativtal	kr/ha	kr/ha
Led	Fosforgiva	Applicering						
1	0 kg		86,3	17,4	15,5	100	34 912	0
2	30 kg	Bredspridd fosfor	90,2	17,4	16,1	104	36 713	1 801
3	60 kg	Bredspridd fosfor	90,9	17,5	16,2	105	37 062	2 150
4	90 kg	Bredspridd fosfor	91,8	17,5	16,4	106	37 560	2 648
5	120 kg	Bredspridd fosfor	92,5	17,5	16,5	107	37 863	2 951
6	15 kg	Radmyllad fosfor	92,9	17,6	16,7	108	38 437	3 524
7	30 kg	Radmyllad fosfor	93,9	17,6	16,8	109	38 887	3 975
8	60 kg	Radmyllad fosfor	95,2	17,6	17,1	110	39 493	4 580
9	90 kg	Radmyllad fosfor	95,4	17,6	17,1	111	39 499	4 587

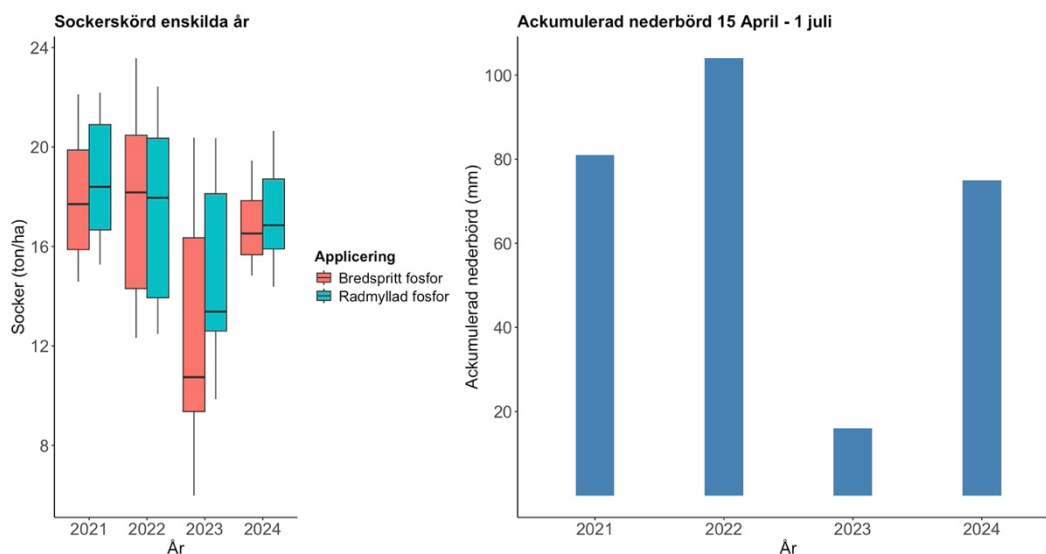
Om medelintäkten delas upp för varje enskilt år, syns trenden att såväl högre fosforgiva som radmyllning ökar intäkterna, vilket illustreras i Figur 2. Vidare kan sägas att 2023 sticker ut med lägre intäkt/ha och att det är en väldigt tydlig trend att radmyllad fosfor samt ökade fosforgödselgivor hade en stark positiv effekt på intäkten 2023. Det år med generellt högst intäkter var 2022, ett år där appliceringsmetod och fosforgiva ser ut att ha minst effekt på intäkterna. Resultatet i Figur 2 visar medelintäkten för åren 2021–2024 men det är viktigt att ta i beaktning att de tydliga skillnaderna mellan leden under 2023, med stora effekter på intäkterna av radmyllning och högre fosforgiva, starkt påverkar medelvärden. Den starka positiva korrelationen mellan radmyllning och högre fosforgivor är därför till stor del driven av utfallet från 2023.



Figur 2. Totala intäkter (kr/ha) för varje led, varje enskilt år mellan perioden 2021–2024

4.1.3 Nederbörds mängden i betornas tidiga tillväxtstadiers påverkan på effekten av radmyllning av fosfor

Eftersom försöken utfördes på nya platser varje år gick det inte att särskilja effekten av plats, nederbörds mängd och år i den statistiska modellen. Detta innebär att det inte går att dra några säkra slutsatser angående nederbörds mängdens inverkan på effekten av radmyllning. En jämförelse av ackumulerad nederbörd för perioden 15 april- 1 juli åren 2021–2024 med sockerskörden vid de olika appliceringsmetoderna i Figur 3, antyder dock att effekten av radmyllning ökar vid mindre nederbörd, även om detta samband inte är statistisk säkerställt. År 2023 var betydligt torrare än de andra åren under perioden, med en ackumulerad nederbörd på 16 mm, jämfört med 75–104 mm övriga år. Under 2023 observerades störst skillnad i avkastning mellan bredspridd och radmyllad fosfor, motsvarande 2400 kg socker/ha. Skillnaden var betydligt större än de andra åren i försöksserien, där skörden i snitt ökade med 1000 kg socker/ha om fosfor radmyllades och den genomsnittliga nederbörds mängden var 69 mm. 2022 var året med högst ackumulerad nederbörd på 104 mm och minst skillnad i avkastning mellan appliceringsmetoderna. Medelskörden var 150 kg socker/ha högre i de bredspridda leden.



Figur 3. Sockerskörd(ton/ha) för samtliga enskilda år (2021–2024) där effekten av radmyllad och bredspridd fosfor jämförs (t.v). Akkumulerad nederbördsmängd (mm) mellan 15 april – 1 juli för samtliga försöksår (2021–2024) (t.h)

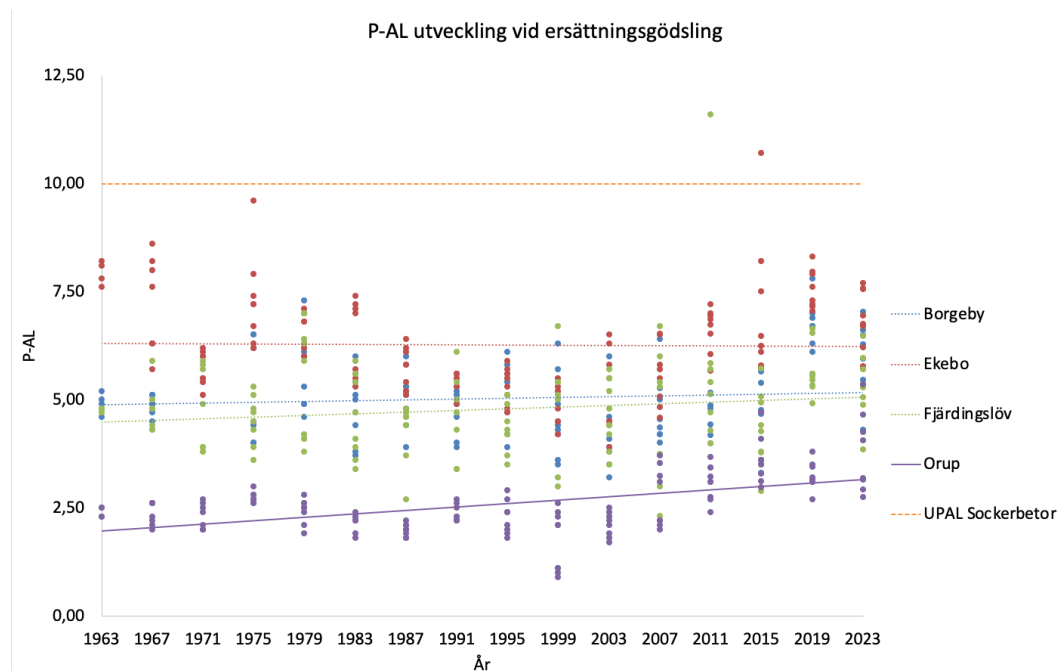
4.2 Hur påverkas skördenivån av jordens fosforstatus och hur ska man gödsla för att uppnå optimal fosforstatus och skördepotential i betodlingen?

4.2.1 Långsiktig fosfortillförsel och dess effekt på jordens fosforstatus

Ersättningsgödslning

När fosfor gödslas enligt ersättningsprincipen kan bibehållet alternativt ökat P-AL-värde observeras över tid på de olika lokalerna. De linjära regressionerna har olika lutning och det är enbart i Orup som det finns en statistiskt signifikant förändring av P-AL-värdet ($p < 0,001$). Av de fyra regressionsanalyserna som gjordes för samtliga platser var Orup även den plats där tidsfaktorn har störst påverkan på P-AL-talet. För övriga platser finns ingen signifikans ($0,10 < p < 0,94$) och förändringen av P-AL över tid är extremt svag. Borgeby, Ekebo och Fjärdingslöv har större spridning i sina värden kring regressionslinjen vilken antyder att relationen mellan P-AL och tidsfaktorn är svag. Förändringarna i P-AL-värdet är väldigt långsamma och alla platser har låga fosfortal, vilket illustreras i Figur 4. Jordarna ligger inom intervallet för P-AL-klass II och III, vilket är lägre än UPAL för sockerbetor på 10 mg P/100 gram jord (Klass IVA). Resultatet tyder på att

jordens fosforstatus håller sig på en stabil nivå när ersättningsgödsling baserat på uträkning av fosfor bortforslad med skörd appliceras över lång tid.



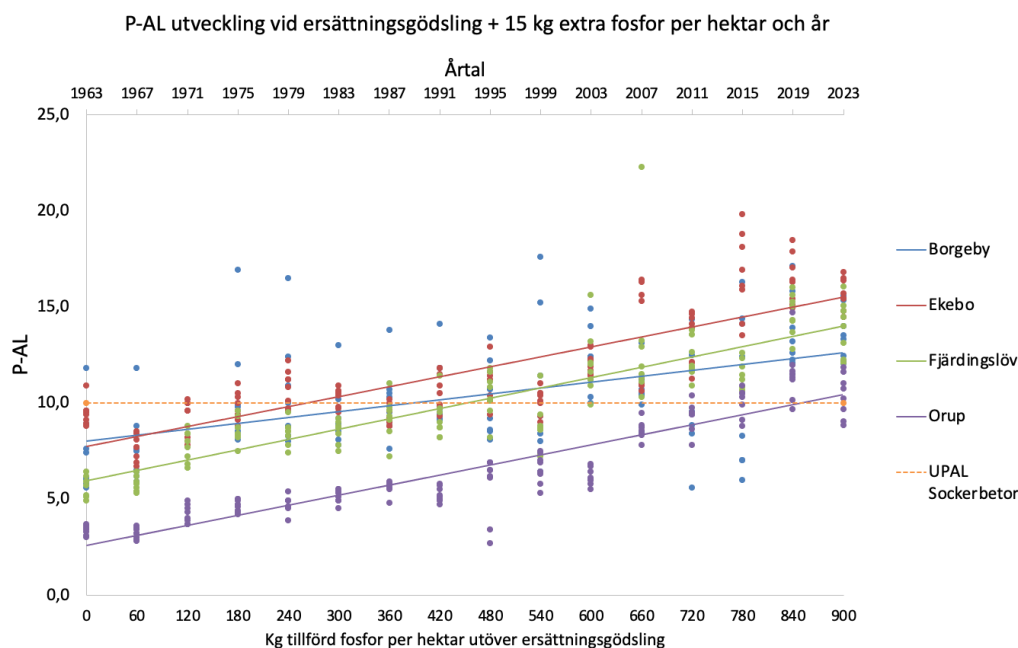
Figur 4. Utvecklingen av P-AL-värdena (mg P/100g jord) mellan åren 1963–2023 på lokalerna Borgeby, Ekebo, Fjärdingslöv och Orup när fosfor har gödslats enligt ersättningsprincipen. Heldragen trendlinje indikerar att p -värdet $<0,001$ och att där finns en statistisk signifikant skillnad. Den orangea linjen är nivån för rekommenderat underhålls P-AL (UPAL) för sockerbetor.

Ersättningsgödsling + 15 kg fosfor per hektar

Resultatet från regressionsanalysen i Figur 5 illustrerar att överskottsgödsling med 15 kg fosfor leder till signifikant ökning av P-AL-värdet på alla platserna över tid ($p < 0,001$). Lutningen för regressionen är större än vid enbart ersättningsgödsling och idag är alla jordar i P-AL-klass IVA och IVB. P-AL-utvecklingen i de olika jordarna i relation till mängden tillförd fosfor skiljer sig mellan platserna där Borgeby sticker ut med långsammast gödslingsrespons. Av samtliga platser hade Borgeby lägst R^2 -värde och därmed lägst förklaringsgrad mellan mängden tillförd fosfor och P-AL värdet. Det justerade R^2 -värdet var 0,24 vilket betyder att 24% av variationen i P-AL kan förklaras av fosforgivan och att det var en god modellanpassning. Ekebo, Fjärdingslöv och Orup har lika lutning på trendlinjerna (figur 5) vilket antyder att det är en jämn P-AL-respons/kg tillförd fosfor. Det sambandet förstärks med ekvationerna för respektive trendlinje där k -värdena för Ekebo, Fjärdingslöv och Orup ligger inom intervallet $0,0086 < k < 0,0089$. Det innebär att P-AL ökar med 0,0086–0,0089/kg tillförd extra fosfor. Vid 15 kg överskottsgödsling per år har det då krävts mellan 112–116 kg extra fosfor för att

öka P-AL-talet en enhet för de olika platserna (1 mg P/100 gram jord), en process som i snitt har tagit 8 år.

Borgebys k -värde för ekvationen är 0,0051 vilket bekräftar att det krävs mer fosfor för att öka P-AL-värdet vilket illustreras i Figur 5. I Borgeby har det krävts 196 kg extra fosfor och 13 år för att öka P-AL-talet med en enhet. De justerade R^2 -värdena för Ekebo, Fjärdingslöv och Orup var betydligt högre än för Borgeby (0,69, 0,70 och 0,83), det innebär att modellenpassningen var bättre och att en större procentuell andel av variationen av P-AL berodde på fosforgödslingen över tid.



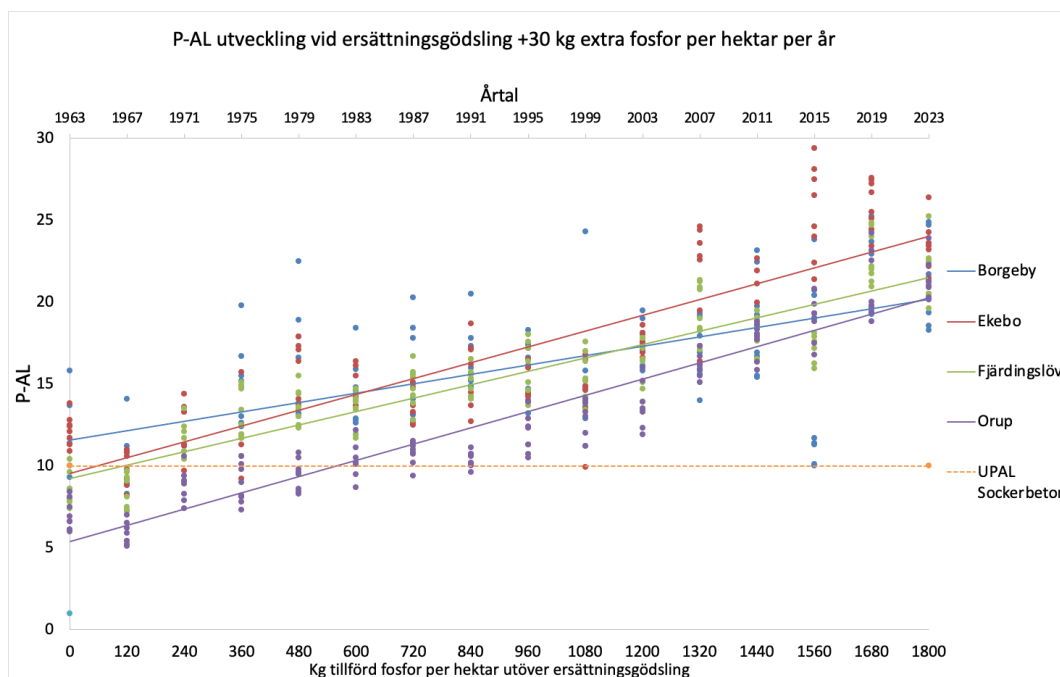
Figur 5. Visar utvecklingen av P-AL-värdena (mg P/100g jord) mellan åren 1963–2023 på lokalerna Borgeby, Ekebo, Fjärdingslöv och Orup när fosfor har gödslats enligt ersättningsprincipen + 15 kg extra fosfor/hektar och år. På den nedre x-axeln visas mängden extra fosfor som har gödslats utöver ersättningsgödslingen varje växtföljd från 1963, mängden fosfor korrelerar med årtalet på den övre x-axeln. Heldragna trendlinjer tyder på signifikanta skillnader och ett p -värde $<0,001$. Den orangea linjen är nivån för rekommenderat underhålls P-AL (UPAL) för sockerbeter.

Ersättningsgödsling + 30 kg fosfor per hektar

Om fosfor gödslas enligt ersättningsprincipen + 30 kg extra fosfor/ha erhålls den snabbaste ökningen av P-AL-värdet i jämförelse mellan de tre gödslingsstrategierna (Figur 6). Ökningen är statistiskt signifikant på alla platser ($p < 0,001$) och regressionslinjerna är brantare än för ersättningsgödsling samt ersättningsgödsling + 15 kg fosfor. Samtliga platser har vid tiden för studien ett P-AL-värde > 20 vilket innebär fosforklass V. Ackumulering av växttillgänglig fosfor skiljer sig mellan de olika platserna (k -värden), vilket illustreras av de olika lutningarna på de olika trendlinjerna (Figur 6).

Modellen för Orup var starkast av samtliga fyra regressionsanalyser. Alla platser uppvisade väldigt hög signifikans där Orup hade lägst p -värde ($5,5 \cdot 10^{-62}$) och högst justerat R^2 -värdet om 0,90, vilket betyder att 90% av variationen av P-AL kan förklaras med mängden tillförd fosfor över tid och att modellen har en väldigt stark förklaringskraft. Likt leden som fick ersättningsgödsling + 15 kg fosfor/ha hade Borgeby lägst förklaringsgrad och högst p -värde, följt av Ekebo och Fjärdingslöv.

För samtliga platser krävdes det mindre fosfor för att uppnå UPAL i jämförelse med leden som fick 15 kg extra fosfor, detta på grund av högre startvärden. P-AL responsen är dock nästan densamma.



Figur 6. Utvecklingen av P-AL-värdena (mg P/100g jord) mellan åren 1963–2023 på lokalerna Borgeby, Ekebo, Fjärdingslöv och Orup när fosfor har gödslats enligt ersättningsprincipen + 30 kg extra fosfor/ha och år. På den nedre x-axeln visas mängden extra fosfor utöver ersättningsgödslingen som har gödslats varje växtföljd från 1963, mängden fosfor korrelerar med året på den övre x-axeln. Heldragna trendlinjer tyder på signifikanta skillnader och ett p -värde $<0,001$. Den orangea linjen är nivån för rekommenderat underhålls P-AL (UPAL) för sockerbeter.

4.2.2 Utveckling av sockerskörden i relation till jordens fosforstatus

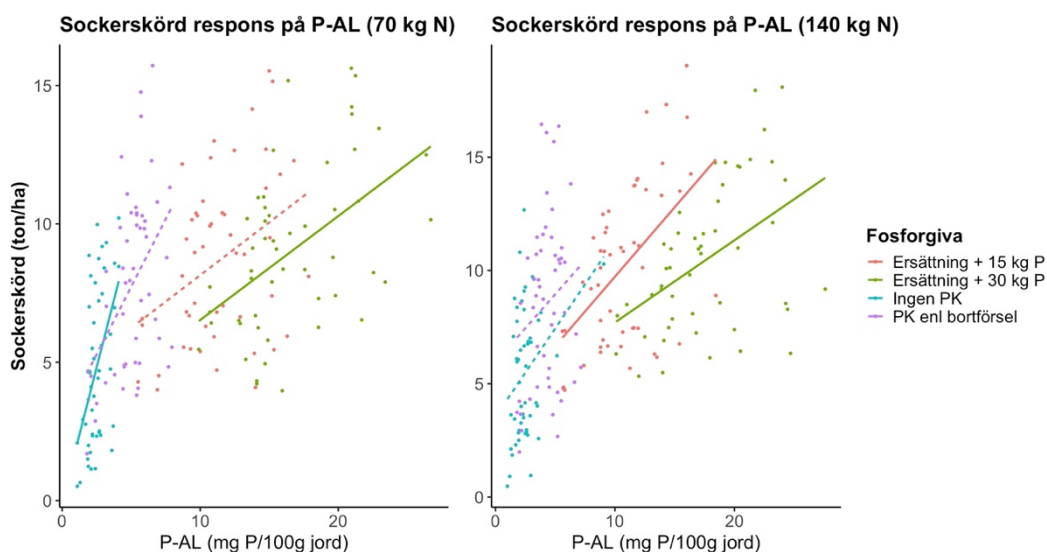
Efter analys av försöksdata från R3-9001 och jämförelse mellan utvecklingen av försöksplatsernas P-AL-värde och sockerbetsskördar mellan åren 1984–2024 är resultatet varierande beroende på vilken kvävegödslingsnivå som har analyserats.

I rutorna som fått 70 kg kväve/ha är det ett signifikant samband ($p < 0,001$) mellan högre P-AL-värde och stigande sockerskörd i rutorna utan fosfortillförsel samt med 30 kg överskottsgödsling, vilket visas i vänstra delen av Figur 7. Liknande trend (fast med lägre signifikantsnivå) fanns även då fosfor gödslades enligt ersättningsprincipen ($p = 0,0011$) eller med 15 kg överskottsfosfor ($p = 0,0069$).

Om betorna istället gödslas med 140 kg kväve/ha så illustreras ett signifikant ($p < 0,001$) samband i figurens högra sida om 15- och 30 kg överskottsgödsling. Utan PK-tillförsel ($p = 0,02$) och vid ersättningsgödsling ($p = 0,15$) har sambandet inte samma höga statistiska säkerhet ($p < 0,001$). Modellerna för regressionerna har olika förklaringsgrad (R^2), där variationen 14–24% av skördeskillnaderna kan förklaras

av P-AL vid 70 kg kväve och 4–26% vid 140 kg kväve. Förklaringsgraden är högst för de rutor vars p -värde $<0,001$.

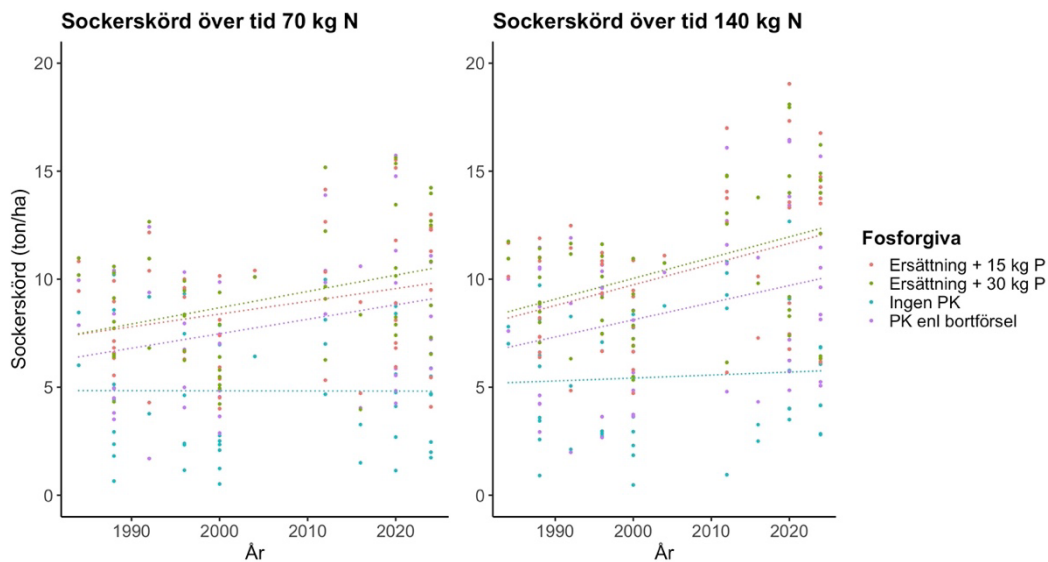
Vid jämförelse av trendlinjernas lutning i Figur 7 kan det konstateras att stigande P-AL-värde har större positiv respons på sockerskörden ju lägre fosforgiva som tillförs. Lutningen för trendlinjen är högst för rutorna utan PK-tillförsel följt av rutorna med ersättningsgödsling. Responsen på sockerskörden är betydligt lägre när 15- och 30kg extra tillförs vilket syns i figuren. Även om det inte finns ett signifikant samband för alla fosfornivåer så pekar trendlinjernas lutning mot att ett högre P-AL har en positiv effekt på sockerskörden.



Figur 7. Illustrerar sockerskörden (ton/ha) i relation till jordens P-AL-tal (mg P/100g jord) vid en kvävetillförsel om 70 kg N/ha (t.v) och 140 kgN/ha (t.h) Sockerskörden som visas är sammanslaget från Borgeby, Ekebo, Fjärdingslövs och Orup och trendlinjerna representerar de fyra olika fosforgödslingsstrategierna i de långliggande bördighetsförsöken. På x-axeln visas de representerade P-AL-talen och y-axeln visar sockerskörden i ton socker/ha. Heldragen trendlinje indikerar på signifikanta värden ($p < 0,001$).

Resultatet från regressionerna som har gjorts för att undersöka förändringen av sockerskörden över tid presenteras i Figur 8. Variationen i sockerskörd är stor för samtliga gödslingsstrategier och ingen signifikant skördeökning kan observeras över tid när 70- och 140 kg kväve/ha har tillförts vid signifikantsnivån $p < 0,001$. Vid en signifikansnivå på $p < 0,05$ ses signifikanta skördeökningar både vid 70 och 140 kg kväve i kombination med fosfor, antingen enligt ersättningsprincipen eller vid 30 kg överskottsgödsling. Även vid 15 kg överskottsgödsling i kombination med 140 kg kväve är ökningen signifikant. Det finns en tydlig trend där p -värdet minskar i takt med ökande mängder kväve och fosfor.

Förklarandegraden är extremt låg för rutorna utan PK-tillförsel ($R^2 \leq 0,1\%$), vilket tyder på att tiden inte verkar vara en stark faktor för förändring av sockerskörden om ingen PK tillförs över tid. Förklarandegraden ökar med stigande fosforgiva samt vid 140 kg kväve/ha, där högsta förklarandegraden är ca 17% vid 30 kg överskottsfosfor. Om k -värdena för respektive gödslingsstrategi jämförs så går det från negativt k -värde om ingen PK och 70 kg kväve tillförs ($k = -0,00067$) och stiger med ökande fosforgiva. När 140 kg kväve gödslas har alla trendlinjer positiva k -värden som ökar för varje fosfornivå. Efter 40 års försök med olika fosforgödslingsgivors effekt på sockerskörden kan det konstateras att ingen signifikant ($p < 0,001$) ökning av sockerskörden har skett över tid i någon behandling.



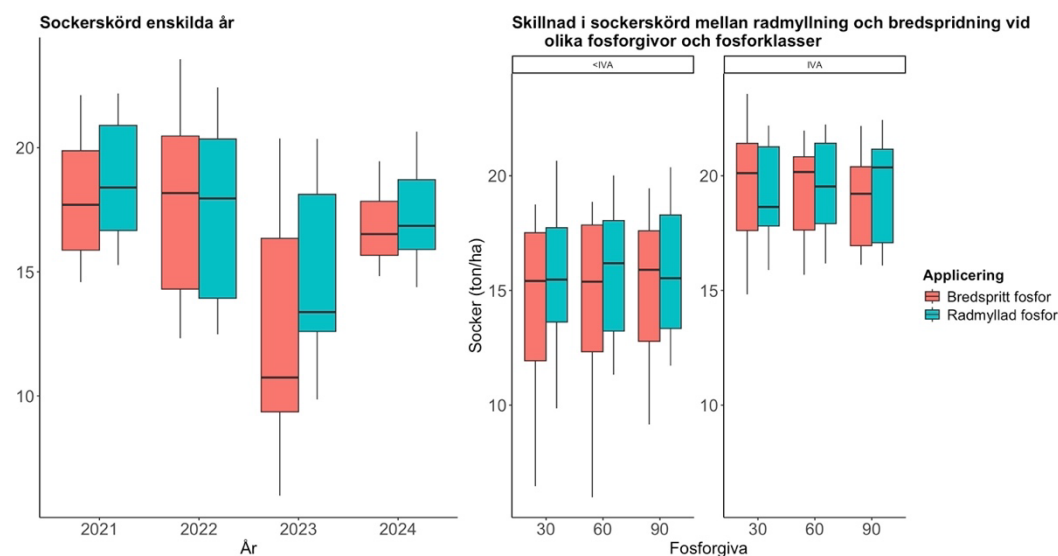
Figur 8. Illustrerar förändring av sockerskörd (ton/ha) över tid mellan åren 1984–2024 vid en kvävetillförsel om 70 kg N/ha (t.v) och 140 kg N/ha (t.h). Sockerskörden som visas är sammanslaget från Borgeby, Ekebo, Fjärdingslövs och Orup och trendlinjerna representerar de fyra olika fosforgödslingsstrategierna i de långliggande bördighetsförsöken. På x-axeln visas tidslinjen från åren som sockerskördar har analyserats och y-axeln visar sockerskörd (ton socker/ha). Heldragen trendlinje indikerar på signifikanta värden ($p < 0,001$).

Skillnad i sockerskörd mellan jordar med P-AL-klass <IV och P-AL-klass IVA

Resultatet från t-testet visar att sockerskörden var signifikant högre på försöksplatserna i försöksserien ”Ettårseffekter av fosfor” som hade P-AL-klass IVA än försöksplatserna med P-AL-klass II och III. Skillnaden mellan grupperna

var statistiskt säkerställd ($p < 0,001$) oavsett om fosfor radmyllades eller bredspriddes.

Skillnaden i medelskörd mellan olika fosforklasser för alla fosforgödslingsnivåer (30, 60 och 90 kg fosfor/ha) var störst i de bredspridda leden, där medelskörd för jordarna med klass IVA var 19,28 ton socker/ha i jämförelse med 14,80 ton socker/ha hos jordarna med P-AL-klass <IVA. Skördeskillnaden var även stor i de radmyllade leden med skördar om 19,40- (IVA) och 15,82 ton socker/ha (<IVA). Skördeskillnaden mellan fosforklasserna illustreras i Figur 9, där skördenivåerna jämförs med medelskörd för varje år som försöksserien pågått.



Figur 9. Boxplot-diagram över medelsockerskördarna (ton socker/ha) mellan åren 2021–2024 med jämförelse mellan radmyllad och bredspridd fosfor (t.v). T.h illustreras skillnaden i medelsockerskörd (ton/ha) mellan alla jordar i försöksserien som har ett P-AL-tal <IVA med jordarna som har fosforklass IVA, samt skillnaden i medelskörd beroende på fosforgiva (kg P/ha) och på om fosfor har radmyllats eller bredspridits. Medelskördarna är sammanslagna från åren 2021–2024

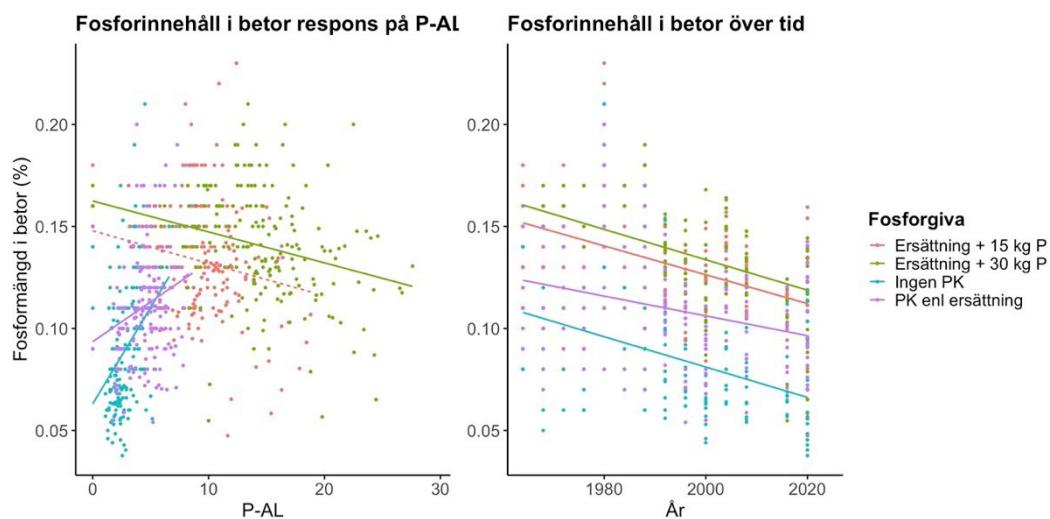
4.3 Sambandet mellan jorden P-AL-värde och koncentrationen fosfor i blast och rot

Fosforkoncentration i roten

Resultaten från regressionsanalyserna där P-AL-värdets effekt på fosforinnehållet i betrotten vid olika fosforgivor har studerats visar att det finns ett signifikant samband ($p < 0,001$) för alla PK-nivåer förutom vid 15 kg överskottsgödsling ($p =$

0,0038). I vänstra delen av Figur 10 så har trendlinjerna väldigt varierande lutning vilket innebär att sambanden ser olika ut för de olika gödslingsstrategierna. Rutorna utan PK-gödsling samt med ersättningsgödsling har ett positivt samband, det vill säga att stigande P-AL-värde ökar fosforkoncentrationen i roten. Rutorna som överskottsgödslas med fosfor har däremot en negativ korrelation till P-AL-värdet i jorden vilket innebär att högre P-AL leder till lägre fosforkoncentration i roten.

I högra delen av Figur 10 kan det tydligt urskiljas att fosforkoncentrationen i betrotten har minskat över tid. Det kan stärkas med att k -värdena för samtliga regressionsanalyser har negativa värden samt att signifikant förhållande mellan fosforinnehåll och tidsaxeln erhöles för samtliga fosforstrategier ($p < 0,001$).



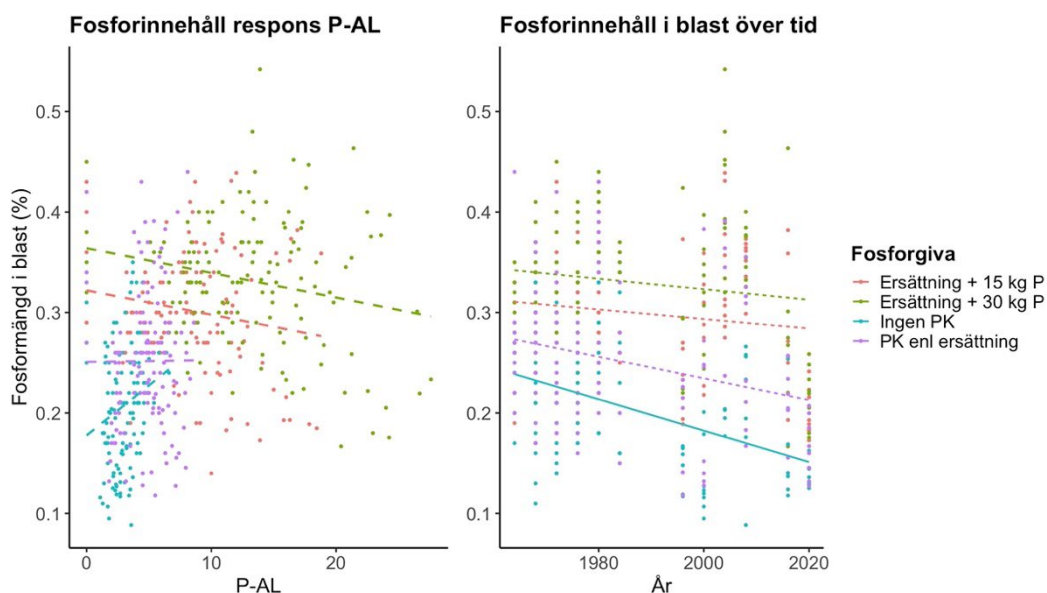
Figur 10. Visar sambandet mellan sockerbetornas fosforinnehåll (%) och jordens P-AL-tal (mg P/100g jord), trendlinjer för de fyra olika fosforstrategierna visas (t.v). T.h i figuren visas utvecklingen av sockerbetornas fosforinnehåll (%) mellan 1964–2020 beroende på fosforstrategi. Heldragen linje indikerar på signifikanta värden ($p < 0,001$).

Fosforkoncentration i blasten

När regressionsanalys har gjorts på P-AL-talets påverkan på fosforinnehåll i blasten har inga signifikanta samband observerats vid signifikansnivån $p < 0,001$, däremot finns ett signifikant samband om signifikansnivån sätts till $p < 0,05$ i rutorna utan PK-tillförsel eller vid 30 kg överskottsgödsling. Relationen mellan blastens fosforinnehåll mellan de olika fosforgödslingsnivåerna och P-AL-nivåerna skiljer sig åt. I jordarna utan PK-tillförsel eller med ersättningsgödsling så ökar fosforkoncentrationen i blasten med stigande P-AL-värde ($k > 1$), däremot är det en negativ korrelation mellan P-AL och fosfornivå vid överskottsgödsling ($k < 1$). Den negativa korrelationen innebär att fosforkoncentrationen i blasten minskar med

stigande P-AL. I båda fallen är förklarandegraden (R^2) låg vilket tyder på att P-AL har väldigt liten påverkan på fosforinnehållet i blasten ($R^2 < 4,7\%$). I rutorna med enbart ersättningsgödsling är sambandet extremt svagt ($R^2 < 0,002\%$) vilket innebär att det inte finns någon effekt av P-AL på fosforinnehållet i blasten vid ersättningsgödsling. Trendlinjerna för sambandet mellan fosforinnehållet i blasten och P-AL visas i vänstra delen av Figur 11.

Fosforinnehållet i blasten har minskat signifikant ($p < 0,001$) när ingen PK har tillförts, och 23% av variationen i fosforkoncentrationen kan förklaras av P-AL-värdet ($R^2 = 23\%$). Högra delen av Figur 10 illustrerar att fosforkoncentrationen tenderar att minska över tid även i rutorna med ersättning- och överskottsgödsling, som vid ersättningsgödsling är signifikant vid signifikantsnivån $p < 0,05$ ($p = 0,0027$). Förklarandegraden är låg för de olika behandlingarna ($R^2 < 7,4\%$) och variationen i datamaterialet är väldigt stor.



Figur 11. Visar sambandet mellan blastens fosforinnehåll (%) och jordens P-AL-tal (mg P/100g jord), trendlinjer för de fyra olika fosforstrategierna visas (t.v). T.h i figuren visas utvecklingen av sockerbetornas fosforinnehåll (%) mellan 1964–2020 beroende på fosforstrategi. Heldragen trendlinje indikerar på signifikanta värden ($p < 0,001$).

5. Diskussion

5.1 Vilken fosforstrategi bör tillämpas för optimal skörd och lönsamhet ur ett ettårsperspektiv?

5.1.1 Appliceringsmetodens och fosforgivans effekt på sockerskörden

Resultaten från försöksserien ”Ettårseffekter av fosfor” är tydliga och pekar mot att radmyllning av fosfor vid sådd i medeltal ger en merskörd om ca 750 kg socker/ha jämfört med bredspridning innan sådd. Ökningen i sockerskörd är signifikant ($p < 0,001$) och resultatet presenteras i Figur 1. Att skörden ökar vid radmyllning kan bero på flera aspekter. Sockerbetor är som mest känsliga för fosforbrist tidigt under säsongen, särskilt torra och kalla vårar när fosforörligheten är låg i kombination med långsam rottillväxt hos betorna (Sims & Smith 2001). Att fosfor ligger placerat nära fröet kan då vara avgörande för att uppnå hög skörd, vilket var väldigt tydligt 2023 när nederbörds mängden var låg (Figur 3). Det är vanligt att använda sammansatta NPK-produkter vid sådd av sockerbetor. Om gödselmedlet innehåller surgörande kväve kan det på alkaliska jordar öka fosforlösligheten nära fröet om pH-värdet i jorden är högt, vilket kan gynna fosforupptaget och även upptag av bor, mangan, zink och magnesium (Ekelöf 2017). Att de små betplantorna har tillgång till både kväve och fosfor tidigt på säsongen är även positivt då sockerbetor tycks vara sambegränsade av kväve och fosfor vilket innebär att båda växtnäringsämnen alltid behövs för optimal skörd (Spohn 2024).

Resultatet i den här studien stämmer överens med tidigare försök gjorda i Sverige (Ekelöf 2020) och i USA (Sims & Smith 2001), där högre och stabilare sockerskördar uppnåddes när fosfor radmyllades. Att radmyllning har positiva effekter på skörden har även iakttagits i praktisk betodling. 2016 var ett år där betorna hade svårt att tillgodose behovet av växtnäring vilket Olsson (2017) beskrev som ett bra ”radmyllningsår”. Dessutom visade praktiska odlarförsök på högre skörd när 90% av gödselgivan radmyllades i jämförelse med att en ”full” gödselgiva bredspriddes (Olsson 2017). I 5T-projektet där betskördarna hos några av Danmark och Sveriges bästa betodlare jämfördes med övriga odlare, kunde skördeskillnaden delvis härledas till att fosfor radmyllades vid sådd (Olsson 2018). En annan viktig anledning till 5T-gårdarnas höga sockerskörd var deras tidiga sådatum. Vid tidig sådd när jorden är kall ökar risken för fosforbrist i sockerbetorna och att radmylla fosfor blir troligtvis viktigare ju tidigare sådden sker för att säkerställa plantornas fosforbehov.

I Figur 8 redovisas skördeskillnaden mellan jordar i P-AL-klass IVA och lägre fosforklasser (klass II – III), högst skördar erhöles när fosfor radmyllades oavsett

fosforklass. Skördeskillnaden mellan radmyllad- och bredspridd fosfor var dock större i jordarna med fosforklass <IVA. Den stora skillnaden i sockerskörd mellan appliceringsmetoderna vid lägre P-AL-värde innebär att det finns stor potential att öka sockerskörden genom radmyllning om betor odlas på fosforfattig jord. För framtida forskning hade det varit intressant att ha fler försöksplatser och försöka jämföra radmyllningens effekt beroende på jordens P-AL-värde ytterligare. Noterbart är att oavsett fosforklass så erhöles ingen signifikant skördeökning vid stigande fosforgiva. Resultatet är anmärkningsvärt och kanske kan indikera att jordens fosforinnehåll har större betydelse än fosforgödslingen för att uppnå höga skördar.

Resultatet från skördedata visar dock att låga radmyllade fosforgivor ger högre sockerskörd än höga bredspridda givor. I Tabell 15 syns det att efter fyra år med tre försöksplatser om året har medelskörden varit högre för 15 kg radmyllad fosfor än för 120 kg bredspridd fosfor, vilket kan motivera låga radmyllade fosforgivor av många anledningar. Dels minskade fosforkostnader och högre intäkter, dels de miljömässiga aspekterna med minskad risk för fosforläckage och minskat behov av importerad fosfor vilket är enhetligt med svenska regeringens miljömål (Havs- och vattenmyndigheten et al. 2024). Långsiktigt bör dock inte fosforgivan underskrida bortförseln med grödan, eftersom det kan leda till minskning av jordens P-AL.

Även vetenskapen om att man kan uppnå höga skördar med enbart 15 kg radmyllad fosfor och att radmyllning ger högre skörd på jordar med höga P-AL-värden kan det vara motiverat att köra en liten fosforgiva på gårdar med höga P-AL-värden eller på djurgårdar med begränsad spridningsareal där organiska gödselmedel kontinuerligt sprids på sockerbetsarealen. Det går även att implementera kunskapen genom att radmylla fosfor efter styrfil, om betor odlas på fält med stora variationer i fosforkartan så vet vi att 15 kg fosfor/ha kan räcka för fullgod skörd där det är höga P-AL-värden. Samtidigt går det att ligga i ett högre gödslingsintervall på fältets sämre fläckar utan att tära på jordens fosforförråd. Det kan leda till mer ekonomisk och miljömässig hållbarhet i svensk sockerproduktion. Sammanfattningsvis finns det starka motiv för att radmylla fosfor till sockerbetor med den försöksdata som har tillhandahållits för den här rapporten i kombination med för ämnet relevant litteratur.

5.1.2 Appliceringsmetoden och fosforgivans effekt på betodlingens lönsamhet

Lönsamhet kan definieras som ett företags ekonomiska effektivitet (Nationalencyklopedin 2025) och för att besvara frågan huruvida radmyllning ökar lönsamheten i betodlingen behövs ett större perspektiv än enbart intäktssidan. Lönsamheten beror nämligen inte enbart utav intäkterna. Kostnaderna är också en

viktig punkt som måste tas i beaktning. I Tabell 15 och Figur 2 presenteras den genomsnittliga intäkten för alla år som försöksserien varit aktivt, samt den genomsnittliga intäkten för varje enskilt år. Resultatet vittnar om att intäkterna ökar genom ökad rot- och sockerskörd över en fyraårs-period om fosfor radmyllas med hög fosforgödselgiva vid sådd. En hög sockerskörd är viktigt för att förbättra lönsamheten då det generar intäkt, men om intäkten är förenad med väldigt höga kostnader kan lönsamheten minska. Vid jämförelse av 60- och 90 kg radmyllad fosfor i Figur 2 skiljer det endast 7 kr på intäktssidan (ej signifikant), i det fallet är det inte motiverat att gödsla med 90 kg då kostnaderna för 30 kg extra fosfor snabbt åter upp intäktsökningen om 7 kr.

Om man studerar skillnaden mellan radmyllad och bredspridd fosfor närmare är intäkterna högre för alla radmyllade led. Vid jämförelse mellan leden som får samma mängd fosfor vid de olika appliceringsmetoderna måste intäktsökningen vara större än kostnaden för radmyllningen för att kunna motiveras. Enligt HIR Skåne är medelkostnaden för inhyrd sådd av sockerbetor med radmyllning 988 kr/ha och 760 kr/ha utan radmyllning (Sundberg 2025). Då fosfor inte radmyllas, utan sprids före sådd tillkommer även kostnaden för att sprida fosfor med gödningsspridare vilket varierar mellan 55–63 kr/ha vid normal användning med 24 meters arbetsbredd, samt harvning där kostnaden ligger mellan 115–120 kr/ha (6–10 meters harv) vid normal användning (HIR Skåne 2024). Kostnadsskillnaden mellan radmyllning och bredspridning kan då variera mellan 45–58 kr/ha. Den lilla skillnaden på kostnadssidan motiverar att radmylla fosfor om kostnadsskillnaden ställs mot intäktskillnaden i Tabell 15. Dock så skiljer sig jordbearbetningsstrategi, etableringsmetod, fosforgödselmedel och kostnaderna förknippat till detta väldigt mycket mellan olika lantbruksföretag. Därför är det viktigt att på fältnivå räkna på skillnad mellan intäkt och kostnader vid val av appliceringsmetod.

Om radmyllning skall jämföras mot bredspridning får dels kostnaden för radmyllningsmomentet tas i beaktning men framför allt att man får högre intäkt med lägre fosforgödselgiva för alla radmyllade led jämfört med de bredspridda. För att sätta resultaten i denna studie i en större kontext och jämföra med Danmark och Sveriges främsta betodlare så hade 5T-gårdarna i medeltal 1000 kr mer på kostnadssidan än de genomsnittliga gårdarna, samtidigt som intäktssidan var ca 6000 kr högre (Olsson 2019). Författaren nämner att den viktigaste faktorn för ett högt positivt ekonomiskt netto är ökade sockerskördar, vilket innebär att intäktssidan som visas i resultatet skulle kunna vara en god indikator på hur radmyllning kan påverka lönsamheten positivt. I 5T-projektet stack 5T-gårdarna ut eftersom merparten radmyllade fosfor trots att det är förknippat med högre kostnader. Kostnaderna för handelsgödsel var marginellt högre än den genomsnittliga gården (Olsson 2019). Nordic Beet Research har sammanställt data

från 128 olika fosforförsök över 40 år och resultatet visade att radmyllad fosfor gav en merintäkt, kunde minska behovet av specialgödselmedel som Probeta med 50% och öka odlingssäkerheten i betodlingen (Ekelöf 2020), vilket stämmer överens med resultatet i Tabell 15 och Figur 2. Att kunna minska mängden dyra specialgödselmedel kan minska betgrödans gödselkostnader.

I Figur 2 sticker 2023 års medelintäkter ut, då de är långt under medelintäkterna för resterande år som försöksserien varit aktiv. Dessutom är det en väldigt stark korrelation mellan intäktsökning och en högre giva radmyllad fosfor. Det skulle kunna innebära att torra vårar som 2023, när betornas upptag av fosfor begränsas är det en säkerhet att radmylla fosfor för att bättre tillgodose betans behov av fosfor på våren och minska risken för intäktsförlust. 2022 som var det mest nederbördsrika året under försökets gång, var intäktsskillnaderna små mellan de olika appliceringsmetoderna och fosforgivorna. Det väcker frågan kring vilken fosforgödslingsstrategi som är mest lönsam på bevattnade betarealer.

Hur stor fosforgiva som bör appliceras beror på varje företags förutsättningar och mål. Höga intäkter drivs av högre sockerskördar men kostnaderna för fosfor och jordens P-AL bör tas i beaktning vid beslut om fosforgiva. Vid P-AL-klass IVA som är rekommendationen för betor behöver inte mer än 30 kg spridas för att uppnå medelskörd vid jämförelse av Jordbruksverkets, HIR Skånes och sockerindustrins gödslingsrekommendationer (Tabell 2, Tabell 3 och Tabell 4). För att nå maximal lönsamhet är det dock rimligt att sträva högre än normskörden runt 65–70 ton betor/ha, vilket kan motivera mellan 30–60 kg radmyllad fosfor. Vid P-AL-klass IVA är skillnaden i sockerskörd relativt liten oavsett om 30-, 60- eller 90 kg fosfor myllas vilket illustreras i Figur 8, om jorden tillhör klass IVB eller V kan skillnaden troligtvis vara ännu lägre.

År med höga priser på fosfor kan det vara lockande att avstå från fosforgödsling och istället tära på markens befintliga förråd för att minska företagets kostnader. Resultatet från de ekonomiska beräkningarna tyder dock på att endast 15 kg radmyllad fosfor kan öka intäkterna med mer än 3500 kr i medeltal mot referensledet, vilket kan motivera att radmylla fosfor även år med högre fosforpriser, samtidigt som tärandet av jordens fosforförråd minskar. I de fall där sockerbetor odlas på mark med korta arrendeavtal är det rimligt att anta att lantbruksföretagare inte vill investera pengar i jorden genom att gödsla upp fosfortalen. Även då tycks 15 kg radmyllad fosfor vara ett bra kortsiktigt alternativ som kan generera goda intäkter och kostnadsbesparingar.

Vid lägre P-AL kan det vara motiverat att ligga i de högre gödslingsintervallen om målet är att öka lönsamheten på sikt i sin betodling. Med vetskapen om att det

krävdes minst 100 kg överskottsfosfor för att öka P-AL med en enhet i bördighetsförsöken (Figur 5 & Figur 6), så kan det absolut vara motiverat att gödsla med 90 kg fosfor/ha för att snabbare uppnå mål-P-AL. Kostnaden blir stor för det enskilda året men som lantbruksföretagare kanske det är rimligt att dela ut kostnaden över hela växtföljden. En uppgödsling kommer även att gynna övriga fosforkrävande grödor i växtföljden och odlas till exempel potatis (*Solanum tuberosum*) eller raps (*Brassica napus suspb. napus*) kan incitamenten öka ytterligare för att på sikt höja P-AL (Andersson et al. 2024). Att ligga i det högre gödslingsintervallen för att bygga upp jordens P-AL är troligen lönsamt över tid, då högre P-AL-värde kan korrelera med högre sockerskörd vilket visas i Figur 7. När önskvärt P-AL har uppnåtts kan fosfor med fördel gödslas enligt ersättningsprincipen, det kommer ge god lönsamhet både kortsiktigt och långsiktigt då höga sockerskördar kan uppnås utan att riskera minskning av P-AL-talen över tid. Vid uppgödsling av jorden är det dock viktigt att jobba förebyggande mot fosforförluster, till exempel genom dränering för att minska läckage med ytavrinning och erosion. Det är viktigt då fosforläckage kan ha stor negativ inverkan på miljön men även på lönsamheten.

Att radmyllning ökar intäkterna över en fyraårsperiod samt minskar intäktsförlusterna torra år som 2023, i en gröda där det ekonomiska nettot till stor del beror på ökad intäkt vid ökad sockerskörd, är resultatet tydligt att radmyllning är att föredra och att radmyllad fosfor kan öka lönsamheten över tid i svensk betodling.

5.1.3 Påverkar nederbördsmängden på våren effekten av att radmylla fosfor?

Det gick inte att dra en säker slutsats kring nederbördsmängdens effekt av att radmylla fosfor i försöksseriens utformning, detta då det i den valda modellen i R inte gick att separera nederbördsmängd från år och försöksplats. Att använda en annan modell som kunde separera faktorerna var inte heller möjlig, eftersom försöken bytte plats varje år, dessutom var det bara ett av fyra år som var väldigt torrt. Det finns dock underlag som stärker tron om att effekten av att radmylla fosfor förstärks nederbördsfattiga år.

Litteraturen visar att radmyllning bör ge större positiv effekt torra år när fosfor är svårörlig i marken och rottillväxten är begränsad (Andersson et al. 2024; Draycott 1993; Syers et al 2008). När fosfor placeras i nära anslutning till betfröna genom radmyllning kan växtrötterna snabbare nå den växttillgängliga fosfor. Dessutom leder denna metod till en mättnad av jorden kring gödseln nära fröna, vilket minskar risken för fosforbrist och ökar tillgången för plantorna (Ekelöf 2020).

Med kunskapen om faktorer som påverkar växtupptaget av fosfor från litteraturen och sambandet mellan mindre nederbörd på våren och större effekt av radmyllning som presenteras i Figur 3, tyder mycket på att effekten av att radmylla fosfor ökar nederbördsfattiga vårar. Den positiva skördeeffekten av att radmylla har i genomsnitt varit ca 1000 kg socker/ha vid jämförelse mellan alla år och alla fosforgödslingsnivåer. Perioden 15 april – 1 juli, år 2023 var mängden ackumulerad nederbörd endast 16 mm, lägre än övriga år i försöksserien. Den låga nederbördsmängden hade negativ påverkan på sockerskörden oavsett appliceringsmetod men skillnaden mellan de olika appliceringsmetoderna var ca 2400 kg socker/ha, den största skillnaden av alla år. Att det var stora skillnader mellan appliceringsmetoderna 2023 förstärks vid jämförelse av intäkterna från de olika leden i försöken som presenteras i Figur 2. Att radmyllning har goda effekter på sockerskörden torra vårar kan även bekräftas från praktisk erfarenhet ute hos svenska betodlare. 2023 visades sig radmyllning ge goda effekter i hela svenska betodlingsområdet (Lindell 2023), framförallt på lerjordarna där betorna hade begränsat växtnäringsupptag på grund av torkan. Torråret 2018 syntes också tydliga positiva effekter där fosfor myllades vid sådd (Lindkvist 2018).

Även fast att inget signifikant samband har fastställts i den här studien tror jag att man säkert kan säga att potentialen för att nå höga sockerskördar nederbördsfattiga vårar ökar kraftigt om fosfor radmyllas vid sådd. Det kan sägas då litteratur, försöksresultat och tidigare erfarenhet från den praktiska odlingen stämmer väl överens. I motsats till 2023 var mängden ackumulerad nederbörd och sockerskörden högst 2022. Samtidigt var skillnaden i sockerskörd mellan appliceringsmetoderna lägst 2022, med högre medelskörd i de bredspridda leden. Att skörden var hög och skiljde sig väldigt lite mellan appliceringsmetoderna när det var en nederbördsrik vår väcker frågor kring om effekten av att radmylla fosfor minskar i betfält där det finns bevattningsmöjligheter och är något som bör undersökas i framtiden.

5.2 Hur påverkas skördenivån av jordens fosforstatus och hur ska man gödsla för att uppnå optimal fosforstatus och skördepotential i betodlingen?

5.2.1 Långsiktig fosfortillförsel och dess effekt på jordens fosforstatus

Resultat från de långliggande bördighetsförsöken visar att fosforgödslingsstrategin har stor betydelse för hur markens P-AL-värde utvecklas över tid. Resultaten

bekräftat att ersättningsgödsling, kan bibehålla ett stabilt P-AL-värde under flera decennier. På nästan alla platser i den här studien har fosforförsörjningen varit i balans med bortförseln vid ersättningsgödsling, vilket bekräftas av att P-AL-talen har hållit sig oförändrade. Orup är dock ett undantag, då en signifikant men marginell ökning av P-AL har observerats ($p < 0,001$), vilket kanske kan bero på att det finns en faktor som har mobiliserat mer fosfor i Orup än på de andra platserna. Resultatet ligger i linje med tidigare studier av Carlgren & Mattsson (2001) som fann att P-AL-värdet höll sig väldigt stabilt över tid om fosfor ersättningsgödslades, utan några signifikanta förändringar på vid någon av försöksplatserna. Att det ca 25 år senare enbart skett signifikant förändring av P-AL-värdet på en av försöksplatserna vittnar om hur långsamma processer relaterat till jordens fosforförråd är.

Att beräkna ersättningsgödslingen utifrån faktiska skördedata snarare än utifrån schablonvärden är sannolikt avgörande för att uppnå en stabil fosforbalans. Faktiska skördedata tar hänsyn till variationer i upptag mellan olika sorter, årsmånsvariation samt skillnader i jordarnas fysikaliska och kemiska egenskaper. Hade ersättningsgödslingen istället baserats på till exempel Jordbruksverkets schablonvärden, kunde potentiellt P-AL-värdena ha förändrats mer, antingen genom att bortförseln överskattats och lett till övergödsling, eller genom att gödslingen skulle ha underskattats och resulterat i sjunkande P-AL-värden.

Om mer fosfor tillförs än vad som förs bort med grödan så ackumuleras växttillgängligt fosfor i marken, vilket också bekräftas av försöksresultaten. Oberoende om ersättningsgödsling + 15- eller 30 kg extra fosfor/ha spridits, har P-AL-talen ökat signifikant för samtliga försöksplatser ($p < 0,001$). Dock så varierade fosforresponsen mellan jordarna. I Borgeby krävdes det 202 kg extra fosfor/ha och i Orup 117 kg/ha, i medeltal över leden med 15- och 30 kg överskottsfosfor. Beroende på om 15- eller 30 kg överskottsgödslades tog det 13 respektive 7 år att öka fosfortalet i Borgeby, för övriga platser tog det 8 år respektive 4–5 år. Det tar följaktligen väldigt lång tid att öka jordens fosforstatus och krävs väldigt mycket fosfor. I Orup som hade snabbast ackumulation av växttillgänglig fosfor tog det ca 38 år och krävdes ungefär 570 kg extra fosfor för att gå från P-AL 5 till P-AL 10 i leden som fick 15 kg överskottsfosfor. Vid gödsling med 30 kg extra fosfor krävdes ungefär samma mängd fosfor men det tog ungefär 19 år. Betydelsen av vetskapen att det tar lång tid att öka fosfortalen i jorden, ökar incitamenten att ha en långsiktig gödslingsplan för fosfor för att uppnå sitt mål-P-AL beroende på produktionsform och produktionsmål.

Skillnader i respons på fosforgödsling kan observeras både mellan och inom försöksplatserna. Det krävdes några mer kilo fosfor/ha för att öka P-AL-talet vid

30- än 15 kg överskottsfosfor i Borgeby, Ekebo och i Orup. Fjärdingslöv stack dock ut i studien och det krävdes 35 kg mer fosfor för att öka P-AL-talet där 30 kg överskottsgödselade i jämförelse med 15 kg. Tidigare studier på bördighetsförsöken av Jansson (1983) och Carlgren & Mattsson (2001) har visat att responsen på fosforgödsling kan variera beroende på jordens fosforstatus vid försökets början, där jordar med låga ursprungs P-AL tenderar att ackumulera mer fosfor vid ökad tillförsel. En möjlig förklaring till den något lägre responsen vid högre fosforgivor är kanske att en större andel av fosfor immobiliseras i marken eller förloras genom erosion och med dräneringsvatten. Braun (2020) påpekade att markens fosforbuffringskapacitet i hög grad styrs av pH, koncentration utbytbara Ca^{2+} -joner och mängden oxalatextraherbart järn och aluminium. Framåt vore det intressant att studera och jämföra fosforackumuleringen och fosforbindningskapaciteten i de olika försöksjordarna med de markfysikaliska egenskaperna. Börling (2003) har redovisat att jordars fosforbindningskapacitet korrelerar med förekomsten av järn- och aluminiumföreningar, vilket kan binda fosfor hårt och göra det otillgängligt för växterna (Braun 2020). Så genom att jämföra utvecklingen av P-AL-värdena i de långliggande bördighetsförsöken med olika markegenskaper, till exempel mängden oxalatextraherbart järn och aluminium, finns det kanske en möjlighet att bättre förstå varför olika jordar som Borgeby och Orup har olika P-AL-utveckling över tid med samma mängd överskottsgödsel. I framtiden kanske det kan förbättra kunskapen om hur olika jordar med olika egenskaper skall fosforgödslas för optimal växtodling.

Efter 15 växtföljdsomgångar och 60 års försök står det klart att P-AL ökar med tiden om mer fosfor tillförs än vad som förs bort. Samtliga försöksplatser har högre P-AL-nivåer än rekommendationen för sockerbetor om 10 mg P/100 gram jord, det vill säga klass IVA. Resultatet innebär att kontinuerlig överskottsgödsling leder till en gradvis ackumulering av fosfor i marken, men hur stor ökningen blir beror på jordens egenskaper.

I framtiden vore det värdefullt att analysera fördelningen av fosfor i de olika fosforpoolerna som beskrivs av Syers et al. (2008) för att kunna optimera fosforstrategier. En kombination av fosforpoolsanalyser och bedömningar av jordarnas fosforbuffringskapacitet, enligt Braun (2020) och Pederson et al. (2023), hade kanske kunnat bidra till en mer precis styrning av framtida fosforgödsling. Både för att säkerställa tillfredställande nivåer av växttillgänglig fosfor och för att minimera risken för onödigt överskott och potentiell negativ miljöpåverkan.

Vidare hade det varit relevant att utvärdera metoder för att bedöma mängden växttillgänglig fosfor, särskilt på jordar med högt pH. Borgeby och Fjärdingslöv har haft $\text{pH} > 7$ i många år och vissa rutor har haft pH närmre 8, vilket ökar risken

för fastläggning och minskad växttillgänglighet (Eriksson et al. 2011). Internationellt används Olsen-P för att mäta mängden växttillgänglig fosfor på kalkrika jordar, vilket skulle kunna vara ett komplement till P-AL-metoden på svenska jordar med högt pH. Eftersom rekommenderat pH ligger mellan 7-7,5 (Kirchmann et al. 2020), kan en jämförelse mellan P-AL och Olsen-P bidra till att finslipa fosforrekommendationerna för svenska betodlare, vilket förhoppningsvis kan leda till högre sockerskördar med mindre negativ miljöpåverkan.

5.2.2 Ökar sockerskörden av att överskottsgödsla fosfor över flera årtionden

Resultatet i den här studien visar att sockerskörden kan öka med högre fosfortal i jorden, även om sambandet inte var signifikant för alla fosforgödselstrategierna i bördighetsförsöken. Det var dock en positiv respons för alla gödslingsnivåer ($k > 1$), vilket antyder att högre P-AL har en positiv effekt på skörden. I nyare data från försöksserien ”Ettårseffekter av fosfor” var det signifikant högre skörd i fosforklass IVA än i klass II och III (Figur 9), vilket ökar tron om att jordens P-AL-tal har stor effekt på skördenivån. Att effekten av P-AL på sockerskörden är positiv för båda försöken gör det mer applicerbart till dagens gödslingsrekommendationer. I bördighetsförsöket bör sockerskördarna ha ökat av fler anledningar än enbart fosforgödsling under perioden 1984 – 2024. Till exempel tidigarelagd sådd, introduktion av bladsvampsbekämpning och bättre sortmaterial (SBU 2003). Sockerbetorna i de ettåriga försöken är odlade med dagens teknik, modernt sortmaterial och aktuella odlingsrekommendationer, vilket innebär att resultatet kanske är mer applicerbart på dagens betodling. Resultatet blir att man kan se långsiktiga trender i bördighetsförsöket där stigande P-AL ger stigande sockerskördar, vilket kan bekräftas av de ettåriga försöken. Det kan konstateras att resultat från långliggande försök är av stor vikt, framförallt när data kan jämföras med modernare försöksdata.

I bördighetsförsöken tycks högre P-AL-tal haft störst positiv skördeeffekt (k -värde) i rutorna utan fosfortillförsel eller med ersättningsgödsling vilken kan anses vara rimligt då skörden troligen i högre grad begränsas av fosforbrist. I rutorna med 70 kg kväve var det ett signifikant ($p < 0,001$) samband utan PK-tillförsel och vid 30 kg överskottsfosfor vilken kan vara lite förvånande. Det kan kanske bero på att jordens P-AL-tal ”överskuggar” effekten av fosforgivan och att höga skördar kan uppnås med låga fosforgivor om P-AL-statusen i jorden är bra. En hypotes som kan stärkas av att det inte var någon signifikant skördeökning av ökade fosforgivor i Figur 1 och att skördarna var högre i P-AL-klass IVA än klass II och III i Figur 9. Om signifikantsnivån justerades ner till $p < 0,05$ var det dock signifikanta skördeökningar för alla fosforgödslingsnivåer.

Där 140 kg kväve spreds var sambandet signifikant ($p < 0,001$) om fosfor överskottsgödslade men betydelsen av ett högt P-AL minskade vid stigande fosforgivan (lägre k -värde), något som kan bero på att fosforgödsling direkt påverkar förrådet av löslig fosfor i jorden (Christenson & Draycott 2006). Vid signifikantsnivån $p < 0,05$ fanns ett signifikant för samtliga fosforgivor förutom ersättningsgödsling ($p = 0,15$) vilket stärker hypotesen om att P-AL ”överskuggar” effekten av fosforgivan.

Idag i Sverige är rekommenderat P-AL-tal för sockerbetor 10 mg P/100 gram jord (Andersson et al. 2024; Hansson 2024; Nordic Sugar 2024c). Kirchmann et al. (2020) fann ett tröskel-P-AL med skördeökningar upp till om P-AL-tal 12,6. Vid observation av leden som fått 30 kg extra fosfor Figur 7 så har de flesta punkter P-AL > 10 men har fortfarande positiv skörderespons vid stigande P-AL-värden. Det kan kanske innebära att det kan vara motiverat att ha P-AL > 10, om målet är att maximera sockerskörden. I de svenska fosforgödslingsrekommendationerna är normskörden kring 65–70 ton betor/ha, men det finns många duktiga betodlare som har medelskörden om 85–90 ton betor/ha, och för dem kan det kanske vara motiverat att ligga i en högre fosforklass än dagens rekommendationer.

Vid beaktning av den positiva skördeeffekten som erhålls vid stigande P-AL-tal och jämför med jordarnas P-AL-utveckling över tid är det rimligt att anta att sockerskördarna bör ha ökat mycket över tid i leden där fosfor har övergödslats. Resultatet från regressionsanalyserna tyder på skördeökningar. Beroende på om signifikantsnivån är $p = 0,05$ eller $p = 0,001$ erhålls olika svar. Vid $p = 0,05$ har det varit signifikanta skördeökningar över tid för några av gödslingsstrategierna men vid $p = 0,001$ har inga signifikanta skördeökningar observerats (Figur 8). Att skördarna inte har ökat signifikant trots överskottsgödsling och stigande P-AL-tal tyder på att det är andra faktorer som påverkar sockerskördarna på försöksplatserna i bördighetsförsöken, något som kan bekräftas av R^2 -värdet som var $\leq 17\%$. Att skörden inte har ökat signifikant vid signifikantsnivån $p = 0,001$ på 40 år är exceptionellt och kan bero på flera olika anledningar. Vid hantering av datamaterialet från bördighetsförsöken har det saknats data på grund av svampangrepp, ogräsproblematik och vildsvinsskador för att nämna några anledningar. Att försök har behövt strykas på grund av stora skördebortfall kopplat till ogräs och svampsjukdomar kan vara ett tecken på otillräcklig skötsel genom årens lopp. En annan faktor som är uppseendeväckande är de stora variationerna i sockerskörd inom de olika fosforgödslingsnivåerna i Figur 8. För rutorna där det överskottsgödslas 15 och 30 kg fosfor/ha har avkastningsskillnaden nästan uppnått 10 ton socker/ha 2020 och 2024, något som troligen kan kopplas till bristfällig skötsel. I rutorna utan fosfortillförsel och med ersättningsgödsling är risken större

att ogräsen har negativ påverkan på skörden, detta eftersom konkurrensen om växttillgänglig fosfor ökar när koncentrationen löslig fosfor i jorden är låg. Med vetskapen om att skördeutvecklingen har varit lägre i leden med överskottsgödsling än för hela svenska betodlingsområdet under samma tidsperiod NBR (2025) och att försöksdata har använts för svenska gödslingsrekommendationerna Jordan-Meille et al. (2012) och Andersson et al. (2024) väcks en oro över den bristfälliga hanteringen av sockerbetsodlingen i bördighetsförsöken. Fortsättningsvis kan det vara en god idé att fortsätta använda Convisobetor alternativt sortmaterial med högre tolerans mot svampangrepp för att minska behovet av insatser med växtskyddsmedel under säsong, vilket minskar behovet av tidskrävande skötselåtgärder. I framtiden finns det mycket att önska gällande både den praktiska odlingen och hantering av försöksresultaten för att säkerställa goda resultat. Det är av stor vikt om fosforgödselrekommendationerna även i framtiden kommer baseras på skördedata från bördighetsförsöken.

5.2.3 Korrelationen mellan jordens P-AL-värde och sockerbetornas fosforkoncentration

Fosforkoncentrationen i sockerbetan har ett signifikant samband med jordens P-AL-värde för alla gödslingsstrategier utom ersättningsgödsling, medan fosforkoncentrationen i blasten inte har något signifikant samband för någon gödslingsstrategi vid signifikantsnivån $p = 0,001$. Därmed går det att konstatera att jordens P-AL-tal har en påverkan på sockerbetornas fosforupptag men inte på translokeringen av fosfor i betan. Koncentrationen i roten och i blasten har samma tendenser i relation till jordens P-AL. För leden utan tillförsel eller med ersättningsgödsling finns ett positivt samband ($k > 0$) och för leden som överskottsgödsas finns ett negativt ($k < 0$). Utvecklingen av koncentrationen över tid har också haft samma tendenser mellan rot och blast, där fosforkoncentrationen i blast och rot har minskat de senaste 60 åren. Vid granskning av Figur 10 och Figur 11 kan det se konstigt ut att det är en positiv lutning på kurvorna utan PK-tillförsel och ersättningsgödsling i vänstra delen av figurerna men positiv i högra delen. Men att fosforinnehållet över tid minskar i rutorna utan PK kan bero på att det var en positiv korrelation mellan P-AL och fosforkoncentrationen, och under årens lopp har P-AL sjunkit utan fosfortillförsel vilket leder till sjunkande fosforkoncentration. Vid ersättningsgödsling har P-AL varit stabilt (Figur 4) vilket inte borde leda till lägre koncentration men sockerskörden ser ut att ha ökat över tid (Figur 8). Även om ökningen inte är signifikant ($p > 0,001$) kan det eventuellt skett en utspädning av fosfor i betorna när P-AL inte ökar i takt med skörden. För leden med överskottsgödsling är korrelationen negativ mellan fosforkoncentration och P-AL, över tid har det varit en minskning av koncentrationen och ökning av såväl P-AL

som sockerskörd. Det förstärker tron om att fosforkoncentrationen i roten späds ut med ökade skördenivåer. Att koncentrationen har minskat i roten kan även kanske bero på att nytt sortmaterial har blivit sämre på att ta upp fosfor med tiden, något som hade kunnat undersökas mer i framtiden.

Varför koncentrationen minskar i blasten är svårare att förklara, potentiellt kan det kanske ligga andra bakomliggande orsaker än fosforgödslingen såsom större påverkan av svampsjukdomar, frostsador eller nyare sortmaterial med sämre fosforupptag. En hypotes var att kvävegödslingen påverkade koncentrationen av fosfor i blasten. Om kväve mineraliseras och tas upp av betorna sent på säsongen kan det leda till onödig blasttillväxt som inte är önskvärt, det sker som regel om för mycket kväve sprids, eller om en för stor andel kväve sprids i form av organiska gödselmedel. Dagens kvävegödslingsrekommendationer är 80–100 kg kväve om kvävet myllas och 100–120 kg om kvävet bredsprids innan sådd (Ekelöf 2018; Nordic Sugar 2025). Försöket gödslas i fyra olika gödselstegar enligt Tabell 8 och i leden där blastanalysen utförs sprids det även 25 ton flytgödsel på hösten innan sockerbetorna sås. Något som över tid (>30 år) dessutom kan öka markens kväveleverans (Anderson et al. 2024). Med 140kg kväve, flytgödsel och eventuell markleverans så kan det finnas risk för ogynnsamt stor blasttillväxt sent på säsongen som kanske kan minska koncentrationen fosfor i blasten. Det vill säga att det blir en utspädningseffekt vid överoptimala kvävegivor. Hypotesen kan stärkas då stallgödselgivan ökade med start 2007 och minskningen av koncentrationen fosfor i blasten har sjunkit mer efter 2004, sambandet kan observeras i Figur 11. I den här studien filtrerades rutorna med 210 kg kväve/ha bort. Trenden med minskade fosforkoncentrationer i blasten var dock densamma när 210 kg inkluderades i regressionen, vilket delvis kan förkasta hypotesen.

Resultatet tyder på att det finns ett samband mellan P-AL, sockerskörd och fosforkoncentration i blasten och i betan. Att resultaten i större utsträckning är signifikant för koncentrationen i betroten än för blasten känns rimligt då upptaget sker i roten innan fosfor translokeras till blasten. Resultatet stämmer även överens med Christenson & Draycott (2006) studier som redovisade att blasten innehåller en större procentuell andel fosfor än roten. De redovisade att det krävdes >0,15% fosfor i roten och 0,34% i blasten för att uppnå goda skördar, i figurerna som visar fosforinnehållet över tid (Figur 10 & Figur 11), tycks koncentrationerna vara lägre än dessa nivåer men med en viss spridning vilket stämmer överens med den stora spridningen i sockerskörden över tid (Figur 8). Det kan även sannolikt vara lägre fosforkoncentrationen i bördighetsförsöken eftersom proverna är tagna i samband med skörd sent på säsongen. Gällande hur stor en god skörd är enligt Christensen & Draycott (2006) framgår inte i litteraturen, men medelskördarna i bördighetsförsöket är lägre än de är i det svenska betodlingsområdet (NBR 2025)

och kan därmed inte betraktas som goda. Av den anledningen är kanske fosforkoncentrationen i en rimlig nivå för bördighetsförsöken. Alternativt har sortmaterialet utvecklats och förändrats mycket sedan studien gjordes.

Fosforkoncentrationen i roten och blasten skulle kunna vara en indikator på skördepotentialen i betor. Om det är lågt innehåll av fosfor är det rimligt att anta att skördepotentialen minskar enligt Christenson & Draycott (2006). Fosforinnehållet i den här studien mäts efter skörd sent på säsongen. Sims & Smith (2001) beskrev att fosforbrist är mest förekommande tidigt på säsongen och att betorna som regel kan växa ifrån bristen under säsong men att skördereduktionen följer med hela säsongen. Därför hade det varit mer intressant att göra fosforanalyser i blast och rot tidigt på säsongen för att kunna dra slutsatser om på vilken typ av jordar risken för fosforbrist är störst och hur man ska gödsla i förhållande till jordens P-AL, för att inte tappa skördepotential tidigt på säsongen.

6. Slutsats

Förbättrade fosforgödslingsstrategier är avgörande för höga sockerskördar och god lönsamheten i svensk betodling. Resultatet visade att radmyllning av fosfor vid sådd gav en signifikant högre skörd och odlingssäkerhet jämfört med bredspridning, särskilt under torra vårar som 2023 när betornas fosforupptag är begränsat. Den positiva effekten av radmyllning överstiger effekten av högre fosforgivor, vilket gör metoden både ekonomiskt och miljömässigt fördelaktig. Resultaten från försöksdata som har använts i den här rapporten stämmer väl överens med vetenskaplig litteratur, tidigare försök och odlarerfarenheter kring radmyllning. Storleken på fosforgivan har inte signifikant effekt på sockerskörden oberoende av appliceringsmetod, så vilken fosforgiva som är bäst för den enskilde lantbrukaren beror på långsiktiga skörd- och lönsamhetsmål samt om det finns motiv till att öka fosfortalen i jorden. I de fall där jorden har mål-P-AL kan fosfor med fördel gödslas efter ersättningsmetoden utan att riskera sämre sockerskörd eller stagnerande P-AL-värden.

Högre fosfortal är kopplade till högre sockerskördar, och det kan i vissa fall vara motiverat att sträva efter högre P-AL-tal än dagens rekommendationer, särskilt om det odlas fosforkrävande grödor i den övriga växtföljden. Samtidigt är det viktigt med en balanserad strategi för att minimera risken för fosforläckage, som är negativt för lönsamheten och belastningen på miljön. Tack vare de långliggande bördighetsförsöken har det varit möjligt att studera hur markens fosforstatus byggs upp långsamt över tid och kräver stora mängder överskottsfosfor. Men även att P-AL kan bibehållas relativt stabilt om ersättningsgödsling baseras på beräknad mängd bortförd fosfor.

För att optimera fosforgödslingsstrategier ytterligare i framtiden vore det värdefullt att undersöka kopplingen mellan jordens egenskaper och utvecklingen av P-AL över tid. Att jämföra P-AL med andra extraktionsmetoder som Olsen-P som kanske kan leda till bättre förståelse för fosforgödslingens effekt på sockerbetsskörden, särskilt för jordar med höga kalciumtal och pH-värden. Samt att studera effekten av radmyllning på jordar med olika P-AL-tal eller i kombination med bevattning. Denna kunskap kan bidra till mer precisa och hållbara gödslingsrekommendationer för olika jordtyper och kan troligen leda till högre sockerskördar och lönsamhet för svenska sockerbetsodlare i framtiden.

Referenser

- Andersson, E., Frostgård, G., Hjelm, E. & Kvarmo, P. (2024). Rekommendationer för gödsling och kalkning 2024.
https://www2.jordbruksverket.se/download/18.4627c3ef191fdbf8ba3520f/1726670182663/jo23_17.pdf
- Ashley, K., Cordell, D. & Mavinic, D. (2011). A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere*, 84 (6), 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.001>
- Bergström, L., Linder, J. & Andersson, R. (2008). *Fosforförluster från jordbruksmark - vad kan vi göra för att minska problemet*. (Jordbruksinformation 27-2008).
https://www2.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/trycksaker/Pdf_jo/jo08_27.pdf
- Bertilsson, G., Rosenqvist, H. & Mattsson, L. (2005). *Fosforgödsling och odlingsekonomi med perspektiv på miljömål*. (5518). Naturvårdsverket.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1634487/FULLTEXT01.pdf> [2025-02-18]
- Börling, K. (2003). *Phosphorus Sorption, Accumulation and Leaching*.
https://pub.epsilon.slu.se/379/1/Agraria_428.pdf [2025-03-02]
- Braun, S. (2020). *Long-term phosphorus supply in agricultural soils : size and dynamics of fast- and slow-desorbing phosphorus pools*. (2020:57). Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences.
https://pub.epsilon.slu.se/18682/1/braun_s_201117.pdf [2022-12-11]
- Carlgrén, K. & Mattsson, L. (2001). Swedish Soil Fertility Experiments. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 51 (2), 49–76. <https://doi.org/10.1080/090647101753483787>
- Christenson, D.R. & Draycott, A.P. (2006). Nutrition - Phosphorus, Sulphur, Potassium, Sodium, Calcium, Magnesium and Micronutrients - Liming and Nutrient Deficiencies. I: *Sugar Beet*. John Wiley & Sons, Ltd. 185–220.
<https://doi.org/10.1002/9780470751114.ch9>
- Condon, L.M., Turner, B.L. & Cade-Menun, B.J. (2005). Chemistry and Dynamics of Soil Organic Phosphorus. I: *Phosphorus: Agriculture and the Environment*. John Wiley & Sons, Ltd. 87–121.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c4>
- Cordell, D., Drangert, J.-O. & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19 (2), 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Draycott, A.P. (1993). Nutrition. I: Cooke, D.A. & Scott, R.K. (red.) *The Sugar Beet Crop*. Springer Netherlands. 239–278. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0373-9_7

- Ekelöf, J. (2014). *Phosphorus Application Strategies in Potato- Constraints and potential improvements*. (2014:61). Faculty of Landscape Architecture, Horticulture and Crop Production Science Department of Biosystems and Technology. https://pub.epsilon.slu.se/11413/1/ekelof_j_140819.pdf [2025-01-20]
- Ekelöf, J. (2016). Fosfor i sockerbetsodlingen - del 1. *Betodlaren*, 2016 (2). https://www.nordicbeet.nu/wp-content/uploads/2017/01/betis-2-16_fosfor1.pdf [2024-12-26]
- Ekelöf, J. (2017). Säkra betans växtnärbingsbehov. *Betodlaren*, 2017 (1), 60–63
- Ekelöf, J. (2018). Tema växtnäring till sockerbetor - DEL 6 KVÄVE. *Betodlaren*, 2018 (2), 57.59
- Ekelöf, J. (2020). 40 år och 128 försök Vad har vi lärt oss om radmyllning. *Betodlaren*, 2020 (1), 45–48
- Eriksson, A.K., Ulén, B., Berzina, L., Iital, A., Janssons, V., Sileika, A.S. & Toomsoo, A. (2013). Phosphorus in agricultural soils around the Baltic Sea – comparison of laboratory methods as indices for phosphorus leaching to waters. *Soil Use and Management*, 29 (s1), 5–14. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00402.x>
- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M. (2011). *Marklära*. 1:6. Författarna och Studentlitteratur. [2024-12-11]
- Fogelfors, H. (2015). *Vår Mat*. 1:3. Författarna och Studentlitteratur. [2023-03-15]
- Fujita, Y., Robroek, B.J.M., De Ruiter, P.C., Heil, G.W. & Wassen, M.J. (2010). Increased N affects P uptake of eight grassland species: the role of root surface phosphatase activity. *Oikos*, 119 (10), 1665–1673. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18427.x>
- Gesslein, S. (2001). Cropping system, plan nutrition and soil fertility.
- Grunwald, D., Stracke, A. & Koch, H.-J. (2023). Cover crop effects on soil structure and early sugar beet growth. *Soil Use and Management*, 39 (1), 209–217. <https://doi.org/10.1111/sum.12800>
- Gruvaeus, I. (2024). Bli inte lurad av markkartan på mullrika jordar | Yara Sverige. *Växtpressen*, 2024 (2). <https://www.yara.se/vaxtnaring/aktuellt/mullrika-jordar/> [2025-02-10]
- Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H. & Kandeler, E. (2019). Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant and Soil*, 434 (1), 7–45. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7>
- Hansson, G. (2024). *Vårsådd -gödsling. Mina sidor HIR Skåne*. <https://minasidor.hirskane.se/default.aspx?a=49d51856-9cf5-4d99-9c76-34c641516e73> [2024-12-20]

- Havs-och vattenmyndigheten, Statens jordbruksverk & Naturvårdsverket (2024). Regeringsbeslut Etappmål för minskad övergödning. Klimat- och näringslivsdepartementet.
<https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/minskad-overgodning/> [2025-02-10]
- Hellgren, O. (2003). Maximum growth rate of sugar beet as a result of nutrient supply, pH and other environmental factors. *Proceedings of Proceedings of the 66th IIRB Congress, 26th February-1st March 2003*, San Antonio Texas, 2003. 435
- HIR Skåne (2024). Maskinkostnader 2024. HIR Skåne.
- Islam, M.S., Haque, md, Khan, M.M., Hidaka, T. & Karim, M. (2004). Effect of fertilizer potassium on growth, yield, water relations of bushbean (*Phaseolus vulgaris* L.) under water stress conditions. *Japanese Journal of Tropical Agriculture*, 48, 1–9
- Jansson, S.L. (1983). *Tjugofem års bördighetsstudier i Sverige*.
- Johnston, A.E., Warren, R.G. & Penny, A. (1970). The value of residues from long-period manuring at Rothamsted and Woburn IV The value to arable crops of residues accumulated from superphosphate. *Rothamsted Experimental Station Report*, 1969 (Part 2), 39–68.
<https://doi.org/10.23637/ERADOC-1-34863>
- Jordan-Meille, L., Rubæk, G.H., Ehlert, P. a. I., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolò, G. & Barraclough, P. (2012). An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management*, 28 (4), 419–435.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00453.x>
- Kirchmann, H., Börjesson, G., Bolinder, M.A., Kätterer, T. & Djodjic, F. (2020). Soil properties currently limiting crop yields in Swedish agriculture – An analysis of 90 yield survey districts and 10 long-term field experiments. *European Journal of Agronomy*, 120, 126132.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126132>
- Körschens, M. (2006). The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research - A review. *Plant, Soil and Environment*, 52, 1–8
- Larsen, S. (1967). Soil Phosphorus. I: Norman, A.G. (red.) *Advances in Agronomy*. Academic Press. 151–210. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60735-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60735-X)
- Lindell, I. (2023). Tillväxt t o m augusti - God potential för årets betskörd. *Betodlaren*, 2023 (3), 8–9
- Lindkvist, A. (2018). Tillväxt tom agusti Ett år vi vill glömma. *Betodlaren*, 2018 (3), 10–12
- Mattsson, L., Börjesson, T., Ivarsson, K. & Gustafsson, K. (2001). *Utvidgad tolkning av P-AL för mark- och skördeanpassad fosforgödsling*. (202).

- Institutionen för markvetenskap Avd för växtnärlingslära.
https://pub.epsilon.slu.se/3226/1/Rapport_202.pdf [2024-12-27]
- Microsoft (2025). *Microsoft Excel 365* (365). Microsoft.
<https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>
- Mosaad, I.S. & Fouda, K.F. (2016). Effect of Potassium and Nitrogen Fertilization on Some Macro-nutrients Utilization Efficiency by Wheat. *Egyptian Journal of Soil Science*, 56 (3), 373–384.
<https://doi.org/10.21608/ejss.2016.3173>
- Nationalencyklopedin (2025). *Lönsamhet. Nationalencyklopedin*. [Uppslagsverk].
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/l%C3%B6nsamhet> [2025-01-17]
- NBR (2025). *Sockerkördar Sverige*. NBR. [2025-02-17]
- Nilsson, T. (2010). *Fältförsök tvingas bort. ATL*. [Lantbruksmedia].
<https://www.atl.nu/faltforsok-tvingas-bort> [2025-01-20]
- Nordic Sugar (2023). *Balanserad gödsling | sockerbetor.nu*.
[https://www.sockerbetor.nu/irj/portal/nordzucker/sv?NavigationTarget=navext\(ROLES://portal_content/nz_agri/admin/navigation/rl.base/c64280c6-1506-4204-8f53-5e4bdea5de2b|OPENTEXT_EXTERNAL://_OT-DS-Server_agriportal/09FF2B7B1FBB49C2BA18FFFF0074AB73--recursion=0/~//9D894AC125C8451784F044BAA7BDA950/C67AA3DB8EA34EBFA7E9084B0F515EDF\)&sapDocumentRenderingMode=Edge&windowId=WID1679579517991&NavMode=0](https://www.sockerbetor.nu/irj/portal/nordzucker/sv?NavigationTarget=navext(ROLES://portal_content/nz_agri/admin/navigation/rl.base/c64280c6-1506-4204-8f53-5e4bdea5de2b|OPENTEXT_EXTERNAL://_OT-DS-Server_agriportal/09FF2B7B1FBB49C2BA18FFFF0074AB73--recursion=0/~//9D894AC125C8451784F044BAA7BDA950/C67AA3DB8EA34EBFA7E9084B0F515EDF)&sapDocumentRenderingMode=Edge&windowId=WID1679579517991&NavMode=0) [2023-03-23]
- Nordic Sugar (2024a). *Avtal klart för betodling 2025 | sockerbetor.nu*. [Branschspecifik informationsplattform].
[https://www.sockerbetor.nu/irj/portal/nordzucker/sv?NavigationTarget=pcd:portal_content/other_vendors/specialist/com.opentext.pct.wsmppm/iviews/com.opentext.pct.wsmppm.smartview&DynamicParameter=paraurl%3Dhttp%3A%2F%2Fgut210146.nordzucker.lan%3A8080%2Fcps%2Frd%2Fchg%2Fagriportal%2Ftarget_news_archive.xsl%2F20661.htm%26paraconfig%3DOT-DS-Server_agriportal&sapDocumentRenderingMode=Edge&HistoryMode=2&NavigationContext=navext\(ROLES://portal_content/nz_agri/admin/navigation/rl.base/08fa3aba-0c16-47c2-8781-0c352b34f4eb|OPENTEXT_EXTERNAL://_OT-DS-Server_agriportal/F17BA5A009D24F80BE6CF1F3A35A8819--recursion=0/~//77D2FCB5CDB44CBE87880856867C2B77\)&windowId=WID1736237879048&NavMode=0](https://www.sockerbetor.nu/irj/portal/nordzucker/sv?NavigationTarget=pcd:portal_content/other_vendors/specialist/com.opentext.pct.wsmppm/iviews/com.opentext.pct.wsmppm.smartview&DynamicParameter=paraurl%3Dhttp%3A%2F%2Fgut210146.nordzucker.lan%3A8080%2Fcps%2Frd%2Fchg%2Fagriportal%2Ftarget_news_archive.xsl%2F20661.htm%26paraconfig%3DOT-DS-Server_agriportal&sapDocumentRenderingMode=Edge&HistoryMode=2&NavigationContext=navext(ROLES://portal_content/nz_agri/admin/navigation/rl.base/08fa3aba-0c16-47c2-8781-0c352b34f4eb|OPENTEXT_EXTERNAL://_OT-DS-Server_agriportal/F17BA5A009D24F80BE6CF1F3A35A8819--recursion=0/~//77D2FCB5CDB44CBE87880856867C2B77)&windowId=WID1736237879048&NavMode=0) [2025-01-07]
- Nordic Sugar (2024b). *Balanserad gödsling | sockerbetor.nu. Sockerbetor.nu*. [Branschspecifik informationsplattform].
<https://www.sockerbetor.nu/irj/go/to/sv/betodling/odlingsrad/balanserad-godsling> [2025-01-03]

- Nordic Sugar (2024c). *Behov och gödslingsråd P, K, Na* | *sockerbetor.nu*.
Sockerbetor.nu. [Branschspecifik informationsplattform].
[https://www.sockerbetor.nu/irj/portal/nordzucker/sv?NavigationTarget=navext\(ROLES://portal_content/nz_agri/admin/navigation/rl.base/c64280c6-1506-4204-8f53-5e4bdea5de2b|OPENTEXT_EXTERNAL://_OT-DS-Server_agriportal/09FF2B7B1FBB49C2BA18FFFF0074AB73--recursion=0/~//9D894AC125C8451784F044BAA7BDA950/C67AA3DB8EA34EBFA7E9084B0F515EDF/6E45DE60E8E54E2AB8F0E375634080C2\)&sapDocumentRenderingMode=Edge&windowId=WID1734614666004&NavMode=0](https://www.sockerbetor.nu/irj/portal/nordzucker/sv?NavigationTarget=navext(ROLES://portal_content/nz_agri/admin/navigation/rl.base/c64280c6-1506-4204-8f53-5e4bdea5de2b|OPENTEXT_EXTERNAL://_OT-DS-Server_agriportal/09FF2B7B1FBB49C2BA18FFFF0074AB73--recursion=0/~//9D894AC125C8451784F044BAA7BDA950/C67AA3DB8EA34EBFA7E9084B0F515EDF/6E45DE60E8E54E2AB8F0E375634080C2)&sapDocumentRenderingMode=Edge&windowId=WID1734614666004&NavMode=0) [2024-12-19]
- Nordic Sugar (2025). *Behov och gödslingsråd N* | *sockerbetor.nu*. *Sockerbetor.nu*.
 [Branschspecifik informationsplattform].
[https://www.sockerbetor.nu/irj/portal/nordzucker/sv?NavigationTarget=navext\(ROLES://portal_content/nz_agri/admin/navigation/rl.base/c64280c6-1506-4204-8f53-5e4bdea5de2b|OPENTEXT_EXTERNAL://_OT-DS-Server_agriportal/09FF2B7B1FBB49C2BA18FFFF0074AB73--recursion=0/~//9D894AC125C8451784F044BAA7BDA950/C67AA3DB8EA34EBFA7E9084B0F515EDF/454225C4FD7E4D59ADE18DA984D589ED\)&sapDocumentRenderingMode=Edge&windowId=WID1740139101866&NavMode=0](https://www.sockerbetor.nu/irj/portal/nordzucker/sv?NavigationTarget=navext(ROLES://portal_content/nz_agri/admin/navigation/rl.base/c64280c6-1506-4204-8f53-5e4bdea5de2b|OPENTEXT_EXTERNAL://_OT-DS-Server_agriportal/09FF2B7B1FBB49C2BA18FFFF0074AB73--recursion=0/~//9D894AC125C8451784F044BAA7BDA950/C67AA3DB8EA34EBFA7E9084B0F515EDF/454225C4FD7E4D59ADE18DA984D589ED)&sapDocumentRenderingMode=Edge&windowId=WID1740139101866&NavMode=0) [2025-02-21]
- Olsen, S.R. (1954). *Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate*. U.S. Department of Agriculture.
- Olsson, R. (2017). Praktiska odlarförsök för förbättring. *Betodlaren*, 2017 (1), 66–70
- Olsson, R. (2018). Mer att hämta i svensk betodling. *Betodlaren*, 2018 (2).
https://www.nordicbeet.nu/wp-content/uploads/2019/01/218_5t-mer-att-haemta-i-svensk-betodling.pdf [2025-01-04]
- Olsson, R. (2019). Är hög skörd lika med högt netto? *Betodlaren*, 2019 (1), 60–64
- Olsson, Å., Persson, L. & Olsson, S. (2019). Influence of soil characteristics on yield response to lime in sugar beet. *Geoderma*, 337, 1208–1217.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.020>
- Pedersen, I.F., Munkholm, L.J., Lemming, C., Mäenpää, M. & Rubæk, G.H. (2023). Additional phosphorus intensity analysis needed to identify phosphorus requirement on acid sandy soils with high Olsen-P contents. *Field Crops Research*, 300, 109004. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109004>.
- Posit Team (2024). *RStudio: Integrated development environment for R* (2024.09.1+394 (2024.09.1+394)). Posit Software, PBC. <https://posit.co/>
- R Core Team (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/> [2024-12-10]

- Rasmussen, P.E., Goulding, K.W.T., Brown, J.R., Grace, P.R., Janzen, H.H. & Körschens, M. (1998). Long-Term Agroecosystem Experiments: Assessing Agricultural Sustainability and Global Change. *Science*, 282 (5390), 893–896. <https://doi.org/10.1126/science.282.5390.893>
- Ringeval, B., Kvakić, M., Ciais, P., Goll, D., Mueller, N., Müller, C., Nesme, T., Vuichard, N., Wang, X. & Pellerin, S. (2021). Insights on Nitrogen and Phosphorus Co-Limitation in Global Croplands From Theoretical and Modeling Fertilization Experiments. *Global Biogeochemical Cycles*, 35. <https://doi.org/10.1029/2020GB006915>
- SBU (2003). *Mot sockerskörd på Europeanivå*. 7000. uppl. SBU. <https://www.nordicbeet.nu/wp-content/uploads/2017/02/mot-sockerskoerd-pa-europeaniva.2.pdf> [2025-02-18]
- Schachtman, D.P., Reid, R.J. & Ayling, S.M. (1998). Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology*, 116 (2), 447–453. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>
- Sims, A.L. & Smith, L.J. (2001). Early Growth Response of Sugarbeet to Fertilizer Phosphorus in Phosphorus Deficient Soils of the Red River Valley. *Journal of Sugarbeet Research*, 38 (1), 1–17. <https://doi.org/10.5274/jsbr.38.1.1>
- Spohn, M. (2024). Interactions of nitrogen and phosphorus in plant nutrition - Analysis of a 60-years old field experiment. *Plant and Soil*,. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06920-3>
- Sundberg, J. (2025). Kostnad betsådd
- Syers, J.K., Johnston, A.E. & Curtin, D. (2008). *Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (FAO fertilizer and plant nutrition bulletin; 18)
- Wuenschel, R., Unterfrauner, H., Peticzka, R. & Zehetner, F. (2015). A comparison of 14 soil phosphorus extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. *Plant, Soil and Environment*, 61 (2), 86–96. <https://doi.org/10.17221/932/2014-PSE>
- YARA (n.d). *YaraMila Probeta*. *Yara Sverige*. [Produktsida]. <https://www.yara.se/vaxtnaring/godselmedel/yaramila/yaramila-probeta/> [2025-01-04]

Populärvetenskaplig sammanfattning

Sockerbetor är en av de mest fosforkrävande grödorna som odlas i Sverige, de är väldigt känsliga för fosforbrist, vilket kan leda till stora skördeförluster. För att undvika brist är det viktigt med en genomtänkt strategi gällande fosforgödslingen, där sockerbetorna ska prioriteras av de grödor som odlas i växtföljden. På senare tid har det blivit ännu viktigare att tänka strategiskt med fosfor, dels för att sockerskördarna har ökat, dels för att fosfor har blivit dyrare och för att minska risken för fosforläckage i miljön. I den här rapporten har data från nya ettåriga fältförsök (2021–2024) och äldre långliggande fältförsök (1963–2024), samlats in och analyserat för att undersöka olika fosforgödslingsstrategier. Syftet var att förstå hur olika gödslingsmetoder påverkar jordens fosforstatus (P-AL-värde) och hur det påverkar sockerbetornas skörd, lönsamhet och odlingssäkerhet.

Resultatet visade att radmyllning, där fosfor placeras nära sockerbetsfröna i jorden vid sådd, ger högre skördar och intäkter redan vid låga fosforgivor. Radmyllning visade sig också vara extra bra torra vårar, detta då betornas fosforupptag ofta är begränsat när det är torrt på våren. De långliggande försöken visade att jordens fosfornivåer kan hållas stabila om fosfor ersätts i samma mängd som bortförseln hos skörden. Att övergödsla med fosfor höjer jordens P-AL-värde, men det tar lång tid och kräver stora mängder fosfor. I försöket syntes inga signifikanta skördeökningar trots att stigande fosforhalter i jorden.

Slutsatsen är att radmyllning är den bästa appliceringsmetoden oavsett jordens fosforstatus, men hur mycket fosfor som behövs beror på varje lantbrukares förutsättningar och mål. Vid låga fosforvärden i jorden kan det vara klokt att gödsla med mer fosfor än betorna tar upp för att bygga upp jordens långsiktiga potential. När jorden är uppgödslad och har nått önskvärd fosforstatus (P-AL-klass IVA) kan man sedan underhållsgödsla genom att ersätta mängden fosfor som försvinner med skörden. I framtiden kan det finnas mer potential att ytterligare förbättra fosforgödslingsrekommendationerna genom att bättre anpassa dem till jordens egenskaper och testa andra fosforanalyser. Till exempel Olsen-P, som kan lämpa sig bättre i en typisk sockerbetsjords med höga pH-värden. Det vore också intressant att studera effekten av att radmylla fosfor på fält som bevattnas. Genom att anpassa gödslingsstrategier efter både miljömässiga och agronomiska förutsättningar kan vi skapa en mer lönsam och hållbar sockerbetsodling, något som gynnar både lantbrukarna och miljön.

Tack

Jag vill rikta ett stort tack till min huvudhandledare Sabina Braun som har varit till stor hjälp under arbetes gång. Jag vill även tacka NBR och framförallt min biträdande handledare Joakim Ekelöf som har hjälpt till med datahantering, litteratur och praktiska erfarenheter kring betodling.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU kan publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver i sådana fall godkänna publiceringen. I samband med att du godkänner publicering kommer SLU även att behandla dina personuppgifter (namn) för att göra arbetet sökbart på internet. Du kan närsomhelst återkalla ditt godkännande genom att kontakta biblioteket.

Även om du väljer att inte publicera arbetet eller återkallar ditt godkännande så kommer det arkiveras digitalt enligt arkivlagstiftningen.

Du hittar länkar till SLU:s publiceringsavtal och SLU:s behandling av personuppgifter och dina rättigheter på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>

☒ JA, jag, Frederik Falck har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

☐ JA, jag, författares namn har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

☐ NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse till att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.