
RAPPORT NR. 22



GUDENÅUNDERSØGELSEN
Sedimentkarakteristik

GUDENÅUNDERSØGELSEN

Sedimentkarakteristik

Rapport vedr. projekt B.I. 1.

Hans-Henrik Schierup
Botanisk Institut
Aarhus Universitet

INDHOLD:

	side
Indledning	1
Undersøgelsens formål	2
De undersøgte søer	2
Sedimentprøvetagning	4
Sedimentforbehandling	4
Sedimentanalysemetoder	4
Analyseresultater	6
Referencer	14
Figurerne 2-17	

1. Indledning: Projekt B.I. 1., sedimentkarakteristik, optoges allerede i "Gudenåundersøgelsens" forundersøgelse, med det formål at fastlægge hvilken metodik der skulle anvendes ved prøvetagning af profundalsedimenter, samt hvilke parametre der burde analyseres med henblik på at karakterisere de enkelte søers sediment. I den indledende undersøgelse gennemførtes også analyse af forskellige vandløbssedimenter. Det blev dog i forundersøgelsen klart, at vandløbssedimenter p.g.a. deres aflejringsmåde og heraf følgende meget store inhomogenitet ville fordre en helt afvigende prøvetagnings- og analysemetodik. Projektet som optoges som B.I. 1., omfatter derfor udelukkende søers profundalsediment. Til projektet er udvalgt følgende søer, som repræsenterer forskellig grad af eutrofiering: Skanderborg Sortesø, Skanderborg Lillesø, Skanderborg sø, Mossø, Ravnsø, Knudsø; samt referencesøerne: Kalgård sø, Slåen sø og Torup sø, som repræsenterer henholdsvis forholdene i en oligotrof sø, i en naturligt eutrof sø og i en oprindeligt oligotrof sø med landbrugsforurening.

Nærværende rapport skal betragtes som en foreløbig rapportering udelukkende baseret på egne analyseresultater. En endelig rapportering af undersøgelsens resultater vil ske i sammenhæng med data vedrørende sedimentudvekslings forsøg, vandkemiske undersøgelser og hydrauliske måleresultater indsamlet af andre deltagende i Gudenåundersøgelsen, når disse data bliver tilgængelige via Gudenåundersøgelsens database.

2. Undersøgelsens formål: Det har været undersøgelsens formål at optage data til belysning af eutrofieringseffekt i søers profundalsediment. Ved den anvendte metodik er det desuden tilstræbt at belyse de enkelte søers sedimentudvikling i relativ kronologi. Ved valget af de undersøgte søer har det været hensigten at karakterisere sedimenter fra et bredt spektrum af søer m.h.t. trofiniveauer spændende fra oligotrofi over naturlig eutrofi til massiv spildevandsbelastning.
3. De undersøgte søer: Vedr. areal, max. dybde og middeldybde se tabel 1.

Til det ovenfor beskrevne formål er udvalgt følgende søer i Gudenåens afstrømningsområde:

Kalgård sø: Oligotrof referencesø uden åbne til- og afløb.

Slåen sø: Naturligt eutrof opstemmet sø uden åbne tilløb og med afløb til Borre sø. Slåen sø er i perioder belastet med følgerne af forstmæssig afdrift i de nære omgivelser.

Torup sø: Hovedsageligt eutrofieret ved landbrugspåvirkning med enkelte tilløb af husspildevand fra landbruget. Et enkelt kildetilløb. Afløb til Halle sø.

Sorte sø (tidligere Svane sø): Siden 1968 svært belastet med mekanisk rensed spildevand fra Skanderborg rensningsanlæg (ca. 10.000 personækvivalenter), herudover mindre betydende tilløb fra Døjsø og Eskebæk mose. Afløb til Lillesø.

Lillesø (tidligere Henning sø): Belastet med afløbet fra Sorte sø og afstrømningen fra rørsumpen mellem Sorte sø og Lillesø. Modtager desuden dårligt biologisk rensset spildevand fra et ældre rensningsanlæg (ca. 800 personækvivalenter) ved Søtoften.

Skanderborg sø: Belastet med afløbet fra Lillesø. Modtager derudover tilløb fra Ringkloster å, samt fra flere mindre tilløb. Skanderborg sø har op til 1968 været påvirket af vekslende mængder hus- og industrispildevand fra Skanderborg by. Søen har, via Vrold sø, Tåning sø og Tåning å, afløb til Mossø.

Mossø: Belastet med tilløbet fra Skanderborg sø (Tåning å), den forurenede Illerup å, mindre tilløb i form af grøfter og bække, samt Gudenå. Afløb: Gudenå.

Ravnø: Dyb naturligt eutrof sø kulturpåvirket af landbrugsjord omkring søen, samt i en periode af mekanisk rensset spildevand. Afløb gennem Knudå til Knudsø.

Knudsø: Dyb naturligt eutrof sø med forholdsvis lavvandet vestlig del. Skovklædte omgivelser tildels af overdrevagtig karakter. I en fireårig periode belastet med biologisk rensset spildevand fra Ry rensningsanlæg. Dette ledes nu i Gudenå gennem Birk sø. Knud sø har afløb til Birk sø.

	Areal ha	Max. dybde m	Middeldybde, ca. m
Kalgård sø	10,6	8	4
Slaaen sø	21,7	11,5	4
Torup sø	19,5	10,5	6
Sorte sø	13,0	2	0,6
Lillesø	24,2	3,8	2
Skanderborg sø	861,8	18,8	8
Mossø	1688,7	22,2	8,5
Ravnø	186,5	33	18
Knudsø	200,8	29	12

4. Sedimentprøvetagning: Alle analyser er foretaget på opdeltede intakte sedimentsøjler. Sedimentsøjler er i alle tilfælde udtaget fra båd med en let modificeret model af Kajak-bundhenteren (Kajak 1965), eller i de meget lavvandede søer Sorte sø og Lillesø med et stift udstyr med stempel der kan udtage uforstyrrede sedimentsøjler på op til 2 m længde af gangen. Dette prøvetagningsudstyr er fremstillet på Botanisk Instituts værksted og kan anvendes i indtil 3 m vanddybde. Der er som regel udtaget 5 parallelsøjler pr. station.
5. Sedimentforbehandling: De udtagne sedimentsøjler er i alle tilfælde forblevet i prøvetagerens plexiglasrør og opbevaret i kølerum ved 4°C indtil analyseprocedurens start. Ved søjlernes opdeling er anvendt opsugning af det øverste ukonsoliderede sediment. Den konsoliderede del er skåret ud i skiver, enten for hver 2 cm, eller, hvor der har været en let erkendelig naturlig stratifikation, i skiver af det enkelte stratums udstrækning. Udskæringen er sket ved med et stempel at presse søjlen ovenud af plexiglasrørerne. Parallelprøver er herefter slået sammen og blandet omhyggeligt før analyse. For analyser foretaget på frisk sediment er analysen fortsat umiddelbart, for analyser foretaget på tørret sediment er tørring sket til konstant vægt ved 105°C. Tørrede prøver er inden analyse knust i morter.
6. Sedimentanalysemetoder:
- 6.1 Stratifikation og farve: Bestemt på de intakte søjler i plexiglasrør, stratifikation ved opmåling, farve ved Munsell-notation.

- 6.2 Tørstofbestemmelse: Foretaget som vandinholdsbestemmelse efter tørring til konstant vægt ved 105°C . Angivet som tørstofindhold af frisk prøve i g/kg.
- 6.3 Glødetab: Bestemt som glødetab efter glødning ved 550°C i et døgn og afkøling i eksikator. Angivet som askeindhold af tørret prøve i g/kg.
- 6.4 Total C: Bestemt på LECO-carbon analyser på tørret sediment.
- 6.5 Organisk C: Bestemt efter Tyurins metode, modificeret til potentiometrisk titrering efter "Handledning i mark- og vækstkemisk arbejdsmetodik", G. Tyler et al., Lund 1971. Angivet i mg/kg tørt sediment.
- 6.6 Uorganisk C: Bestemt som difference mellem 6.4 og 6.5. Angivet i mg/kg tørt sediment.
- 6.7 Total P: Bestemt efter destruktions i $\text{HClO}_4:\text{HNO}_3$, 1:4, med vanadat-metoden, og målt kolorimetrisk (Tyler 1971). Angivet: mg/kg tørt sediment.
- 6.8 Kjeldahl N: Målt titrimetrisk efter oxydativ destruktions. Angivet i mg/kg tørt sediment.
- 6.9 Total S: Målt ved iodometrisk autotitrering efter forbrænding i LECO-induktionsovn. Angivet i mg/kg tørt sediment.
- 6.10 Metaller: (Na, K, Ca, Mg, Fe og Cu). Målt som atomabsorption efter destruktions i $\text{HClO}_4:\text{HNO}_3$, 1:4. Angivet i mg/kg tørt sediment.
- 6.11 Fosforfraktionering: Som angivet af Chiang og Jackson 1957, (Jackson 1958) men modificeret til udgangspunkt i frisk sediment i stedet for tørret. Angivet som mg/kg tørt sediment.

7. Analyseresultater: De opnåede analyseresultater fremlægges i form af de til VKI indsendte analyseskemaer, her figureerne 1 - 17.

7.1 Stratifikation og farve: Stratifikationen er noteret som gennemsnitsværdier for parallelle prøver. Overgange mellem farvemæssigt forskellige strata er oftest glidende, grænsen er lagt midt i overgangszonen. Farver er noteret i Munsell-notation (Munsell 1971), og er behæftet med de fejl en subjektiv komparativ metode indebærer i form af personligt fejlskøn.

7. Analyseresultater: De opnåede analyseresultater fremlægges i form af de til VKI indsendte analyseskemaer, her
figurerne 1 - 17.

7.1 Stratifikation og farve: Stratifikationen er noteret som gennemsnitsværdier for parallelle prøver. Overgange mellem farvemæssigt forskellige strata er oftest glidende, grænsen er lagt midt i overgangszonen.
Farver er noteret i Munsell-notation (Munsell 1971), og er behæftet med de fejl en subjektiv komparativ metode indebærer i form af personligt fejlskøn.

3.1 Stratifikation og farve

	Kal	Farve	Bemærkninger
cm	0		
	10	2,5 Y 3/0 Very dark grey	
	20		Sandet gytje med
	30	2,5 Y 2,5/0 Black	svovlbrintelugt
	40		
cm	0		
	10		
	20	2,5 Y 2,5/0 Black	Gytje med svovlbrinte-
	30		lugt
	40		
cm	0		
	10	2,5 Y 4/2 Dark greyish brown	
	20	2,5 Y 3/2 Very dark greyish brown	
	30	2,5 Y 3/1 Very dark greyish brown	Gytje uden særlig
	40	10 YR 4/2 Dark greyish brown	lugt
cm	0		
	10	7,5 YR 2,5/0 Black	Kultursediment med
	20	5Y 6/4 Pale olive	kloaklugt
	30	10 YR 5/4 Yellowish brown	Kalkgytje uden særlig
	40		lugt
	50	10 YR 3,5/2 Dark greyish brown	
	60		

fig 1

(fig 1 forts.)

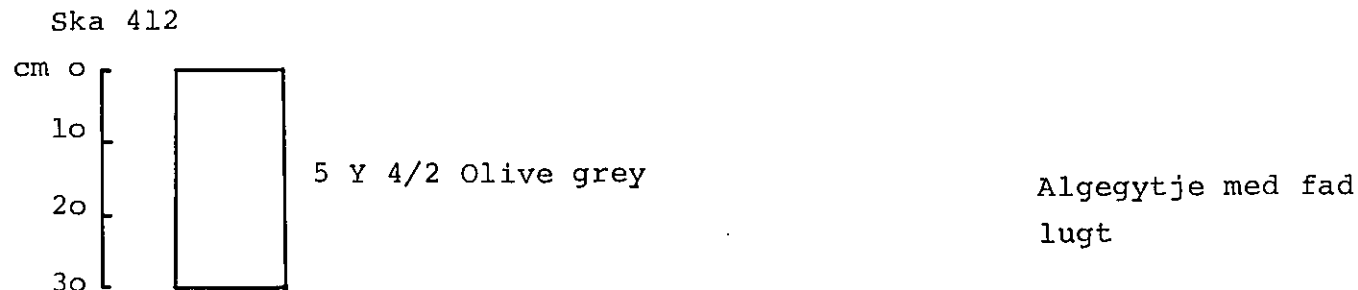
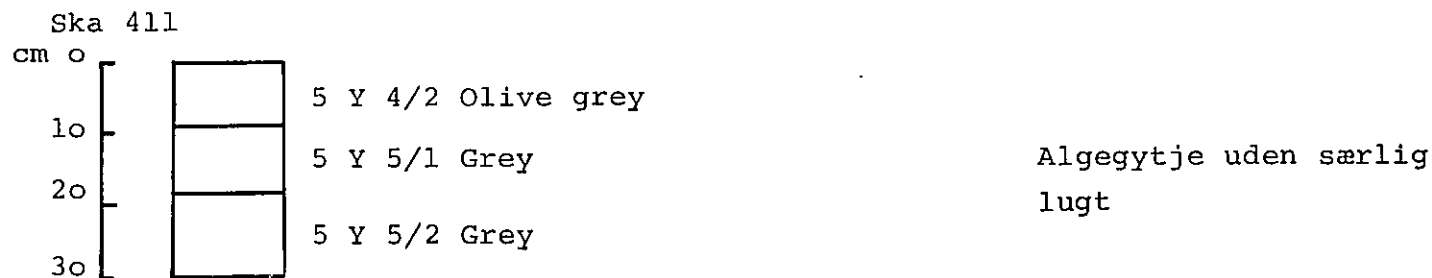
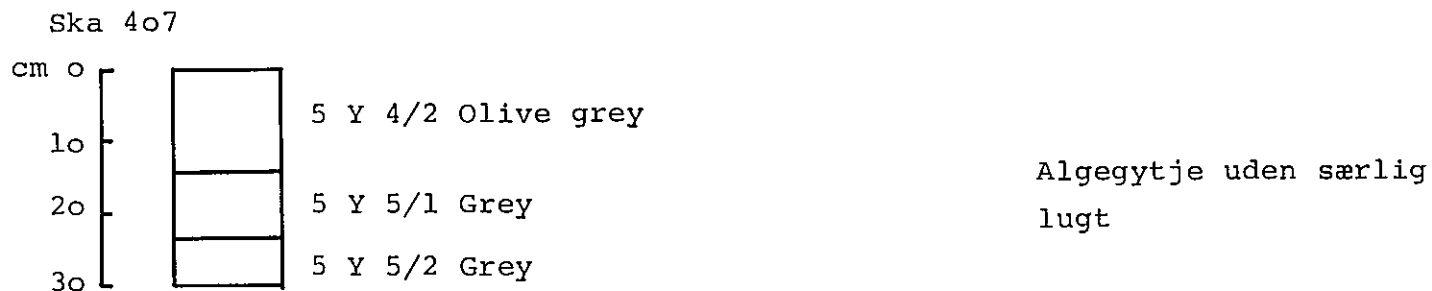
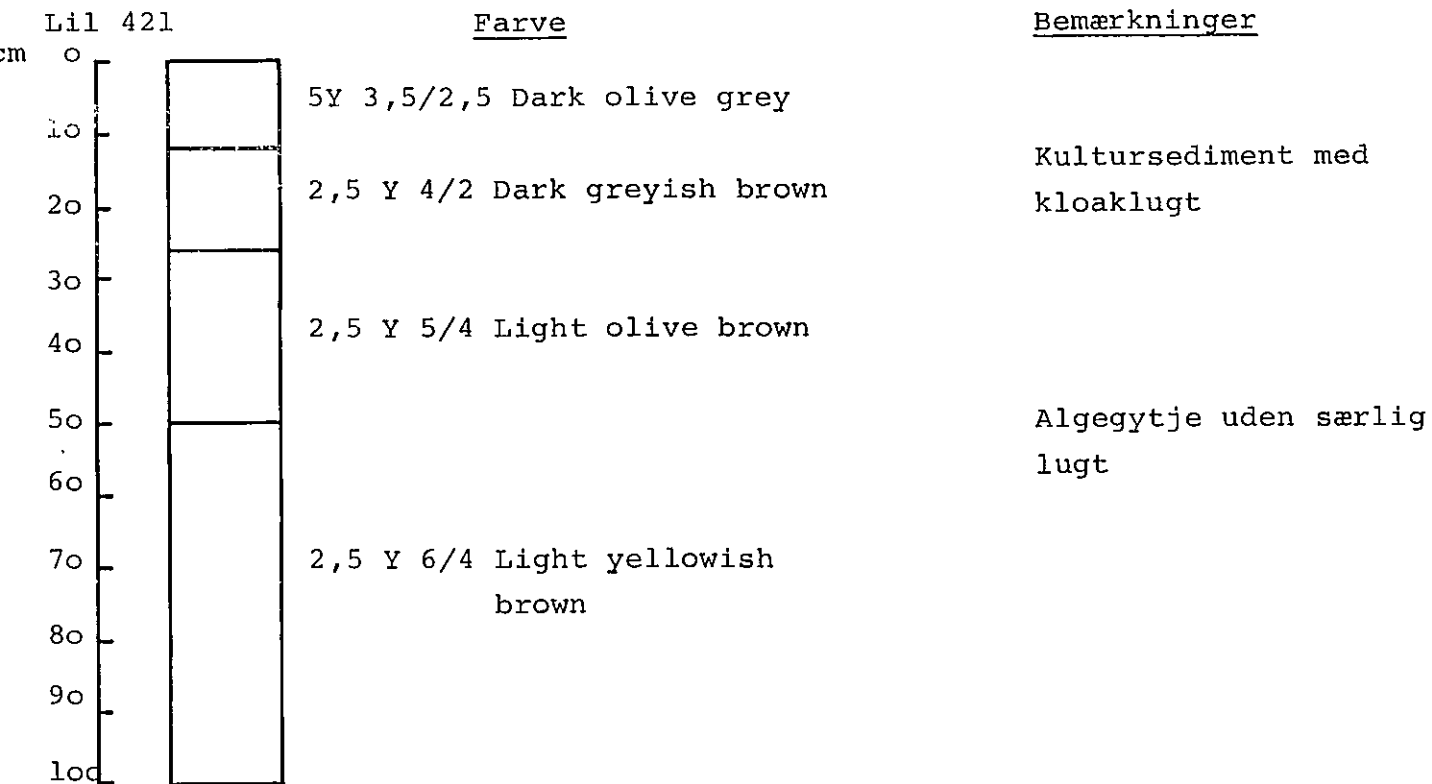


fig. 1 forts.

(fig. 1 forts.)

		<u>Farve</u>	<u>Bemærkninger</u>
Mos 424			
cm	0		
	10	10 YR 4/1 Dark grey	Algegytje uden særlig lugt
	20	10 YR 4,5/1 Grey to dark grey	
	30		
Mos 425			
cm	0	2,5 YN 3/0 Very dark grey	Stærkt sandet detritus gytje med svovlbrintelugt
	10	10 YR 4/1 Dark grey	
	20	10 YR 3,5/1 Dark grey	
Rav 420			
cm	0	2,5 YN 3,5/0 Dark to very dark grey	Leret gytje uden særlig lugt
	10	10 YR 4/1 Dark grey	
	20	10 YR 4,5/1 Grey to dark grey	
	30		
Knu 420			
cm	0	2,5 Y 3/1 Very dark greyish brown	Leret algegytje med svag svovlbrintelugt
	10	10 YR 4/1 Dark grey	
	20	10 YR 4,5/1 Grey to dark grey	
	30		
	40		
Knu 423			
cm	0	2,5 YN 3/0 Very dark grey	Stærkt sandet gytje med svovlbrintelugt
	10	2,5 Y 4/1 Dark greyish brown	
	20	2,5 Y 4/1 Dark greyish brown	
	30		

fig. 1 forts.

7.2 Tørstofindhold: (fig. 2).

Tørstofindholdet stiger generelt med dybden som følge af tiltagende konsolidering. Afvigelsen i den generelle tendens i Kalgård sø skyldes vekslende indhold af gaslommer i sedimentet og i Knudsø 423 vekslende mængder af sand og kalk i forskellige dybder.

7.3 Askeindhold: (fig. 3).

Askeindholdet viser karakteristisk værdier omkring 60%. Afvigelserne for KAL, TOR og SOR 422 er ret nøje sammenfaldende med værdierne for organisk C i disse søer, mens de høje askeindhold i MOS 425 og KNU 423 skyldes det høje sandindhold i de pågældende sedimenter.

7.4 Organisk C: (fig. 4).

Referencesøerne KAL, SLA og TOR viser relativt høje værdier, hvilket kan forklares ved et lavt lerindhold i forhold til de øvrige sedimenter. Denne antagelse bekræftes af lignende forhold for det sandede sediment på MOS 425. Søsystemet SOR 422, LIL 421, SKA, MOS 424 viser et faldende indhold af organisk C med tiltagende afstand fra spildevandsudledningen svarende til at en væsentlig del af producenterens organiske stof, alt andet lige, sedimenteres i de enkelte bassiner, samtidig med at en initialt høj plantenæringsstofkoncentration har en effekt gennem hele søsystemet. RAV 420 og KNU 420 støtter de hidtidige antagelser at Ravnsø oprindeligt ligger på et højere eutrofiniveau end Knudsø.

7.5 Uorganisk C: (fig. 5).

Indholdet af uorganisk C er først og fremmest tilstede som karbonater. Figur 5 viser et faldende forløb af

uorganisk C i systemet SOR-MOS, med LIL 421 som en uforklarlig undtagelse. Den lave værdi i KAL og TOR skyldes det karbonatfattige udgangsmateriale i omgivelserne.

7.6 Total P: (fig. 6).

Den anvendte destruktionsmetode giver et tilnærmet mål for den absolutte P-forekomst i sedimentet, idet siliciumgitterbundet P ikke måles. Det relativt ensartede niveau for total-P i søerne indikerer intet om den på kortere sigt for søernes organismer tilgængelige P-mængde. Total-P analysen er således en dårlig parameter til vurdering af sedimenters dynamiske betydning for produktiviteten i søer.

7.7 Kjeldahl N: (organisk bundet N) (fig. 7).

KAL viser et aftagende indhold af organisk N mod overfladen, hvilket kunne tydes som en aftagende produktivitet i søen og måske specielt i søens omgivelser. Antagelsen støttes af resultatet for måling af organisk C. De øvrige sedimenter viser principielt den modsatte tendens, et stigende indhold af organisk N mod overfladen, mest markant for den landbrugspåvirkede Torup sø. Relativt lavt niveau forekommer i MOS 425 og KNU 423 som følge af det tidligere omtalte høje sandindhold i disse stationers sedimenter.

7.8 Total S: (fig. 8).

Værdierne for total S viser for søsystemet SOR 422, LIL 421, SKA 411, SKA 412, SKA 407 og MOS 424 et faldende indhold. Resultaterne er vanskelige at tyde, og vil i højere grad kunne belyses ved en mere indgående analyse af S-systemerne i de enkelte søers sedimenter.

7.9 Na: (fig. 9).

Det fremgår af analyseresultaterne, at det naturlige niveau for Na ligger omkring 250 mg/kg. Der er en øjensynlig stabilitet i niveauet i de ikke spildevandsbelastede referencesøer uafhængigt af deres trofiniveau. Der kan konstateres en gradient faldende fra LIL - MOS. En fordobling i Na-indholdet i 2 cm dybde i KNU 420 afspejler sandsynligvis den kortvarige periode med spildevandsbelastning.

7.10 K: (fig. 10).

Forholdene for K kan ikke tydes udfra de foreliggende analyser. En bearbejdelse i sammenhæng med vand- og primærproduktionsdata kan muligvis kaste lys over værdierne.

7.11 Ca: (fig. 11).

KAL og TOR viser lave Ca-værdier, 10 - 15% af indholdet i den naturligt eutrofe SLA 420, hvis Ca-indhold er under 5% af de øvrige undersøgte søers. Ca er sammen med indholdet af Fe overordnede stoffer for sedimenternes fældnings- og sorptionskapacitet m.h.t. P. Deres kvantitative betydning for P-udveksling mellem søernes vand- og sedimentfase skal vurderes ud fra variationerne i redox- og pH-forhold i de enkelte søers sediment- og vandfase, samt ved samarbejdning af de foreliggende analyseresultater med de udvekslingsforsøg der er foretaget af Ebbe Lastein Hansen.

7.12 Mg: (fig. 12).

Resultaterne for Mg viser generelt en sammenhæng med resultaterne for Ca, således at der ved stabile Ca-værdier op gennem sedimentet er stabile Mg-værdier. Stigende Ca-værdier mod sedimentoverfladen følges af faldende Mg-værdier og omvendt.

7.13 Fe: (fig. 13).

Fe-indholdet viser for et flertal af de undersøgte stationer et gennemsnitsniveau på 20-30 g/kg. Ekstremt høje værdier er målt i SLA 420. Disse kan henføres til det iøjnefaldende stærkt jernførende kildefelt i søens SØ-del, hvor der på lavt vand forekommer kraftige okkerudfældninger. Betydningen af Fe i sedimentets P-kredsløb er berørt under pkt. 7.11 Ca.

7.14 Cu: (fig. 14).

Det naturlige niveau for Cu ligger på ca. 20 mg/kg. Cu-indholdet følger i nogen grad indholdet af organisk C, hvilket kunne ventes p.g.a. tungmetallers affinitet til organisk stof. Effekten af det til SOR 422 tilførte spildevand er tydelig også for LIL 421. For SOR 422 bekræfter forløbet af Cu-værdierne den antagelse man får udfra sedimentprofilets stratifikation og farve, at kultursediments udstrækning i Sorte sø er ca. 10 cm. Det høje Cu-indhold i de øverste 2 cm af MOS 424 profilet skal muligvis ses i sammenhæng med udløbet fra Klostermølle.

7.15 Fosforfraktionering: (fig. 15, 16 og 17).

Den anvendte fosforfraktionerings procedure (Jackson 1958) underestimerer muligvis Al-P fraktionen og overestimerer Ca-P fraktionen specielt for Ca-rige sedimenter (Williams 1971).

7.15.1 Ca-P: (fig. 15).

Analyseresultaterne viser, at for de Ca-rige sedimenter er en betydelig P-mængde fældet som Ca-apatit, som formodentlig kun vil kunne udveksles over vand-sediment kontaktzonen ved pH-værdier under neutralpunktet. Resultaterne

viser en tiltagende Ca-fældning af P mod sedimentoverfladen i samtlige eutrofierede søer med MOS 424 som en uforklarlig undtagelse.

7.15.2 Fe-P: (fig. 16).

En sammenligning mellem analyseresultaterne for Fe og Fe-P viser, at for de af de undersøgte søer der er udsat for eutrofiering, blokeres en stigende del af Fe-forbindelsernes adsorptive kapacitet mod overfladen, igen med MOS 424 som en uforklarlig undtagelse. De redoxlabile Fe-P forbindelser udgør det hurtigst reagerende P-potentiale ved anaerobe forhold i stagnationsperioder og ved sedimentation af organisk stof i højproduktive søer. En ikke gennemført del af sedimentundersøgelsen vedr. måling af årstidsvariationen af pH, og redoxpotentiale ville have kunnet belyse dynamikken vedr. Ca-P og Fe-P.

7.15.3 Al-P: (fig. 17).

Mængden af Al-adsorberet P, sensu Jackson, viser store variationer uden systematisk fordeling på eutrofiniveauer. En vurdering af Al-P fraktionens kvantitative betydning i relation til sedimentets Al-kapacitet kan kun foretages i sammenhæng med Al-analyser, og årstidsvariationer i sediment-pH og specielt redoxforhold. Det kan imidlertid konstateres, at Al-P i visse søer udgør en betydelig fraktion af det uorganiske P.

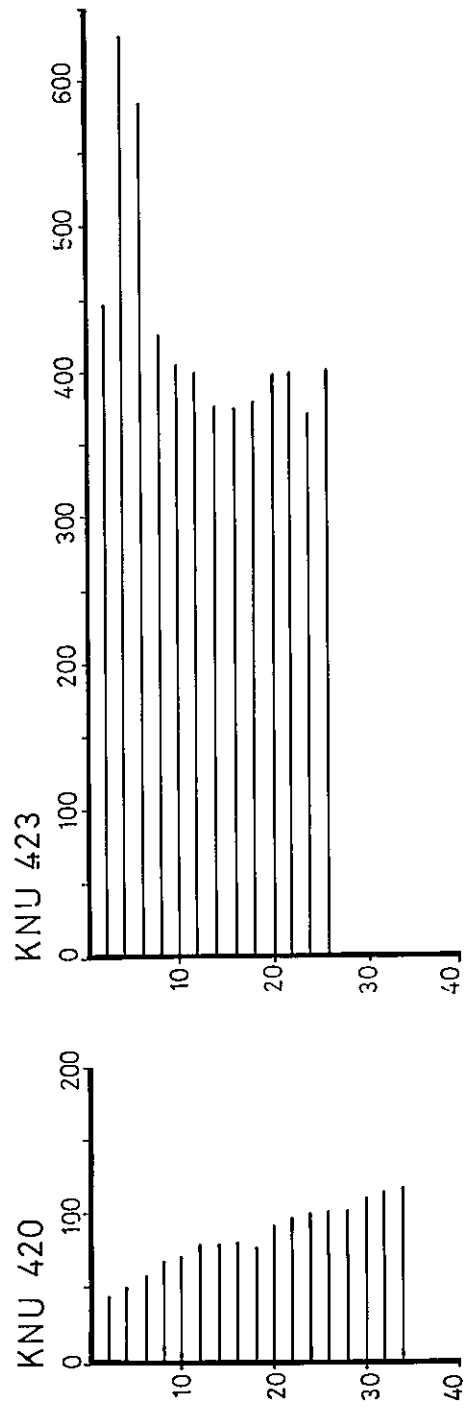
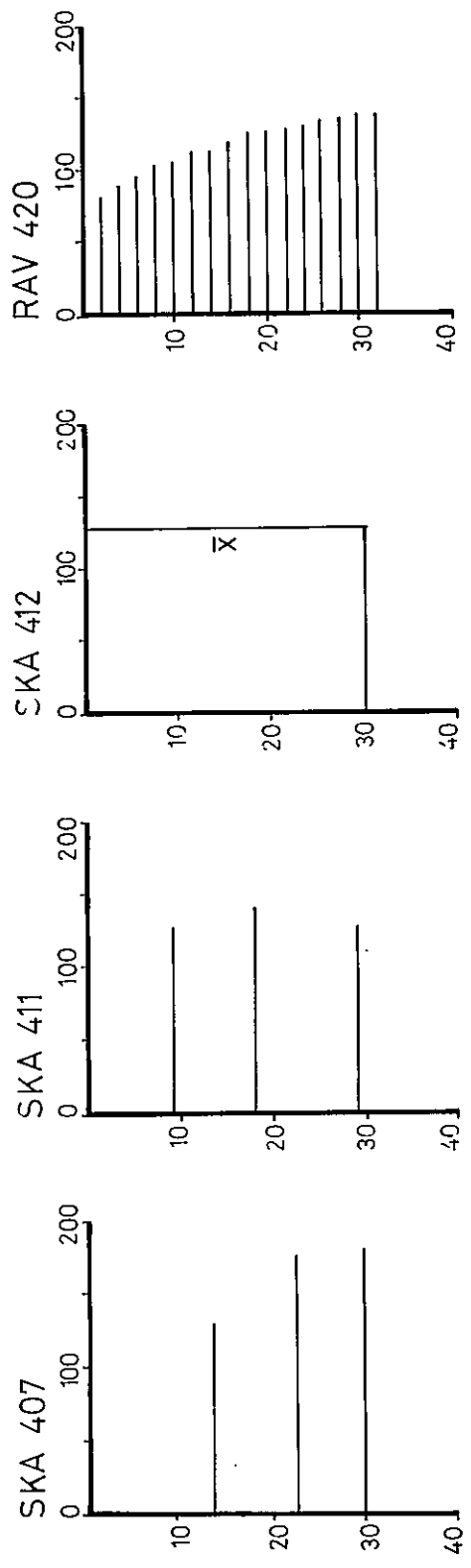
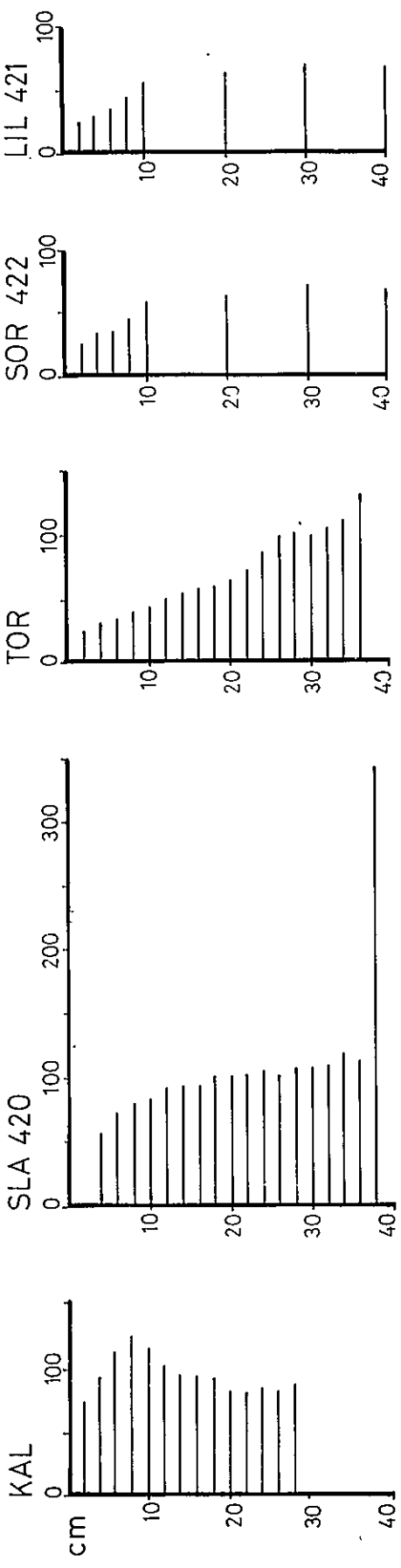
8. Referencer: Jackson, M. L. 1958: Soil Chemical Analysis Prentice-Hall, Inc.

Kajak, S. et al. 1965: Tube bottom sampler for taking samples of micro and macro benthos, and for sampling of undisturbed structures of mud samples for experimental purposes.
Ekol. Pol. (B):11.

Munsell Soil Color Charts, 1971 edition,
Baltimore, U.S.A.

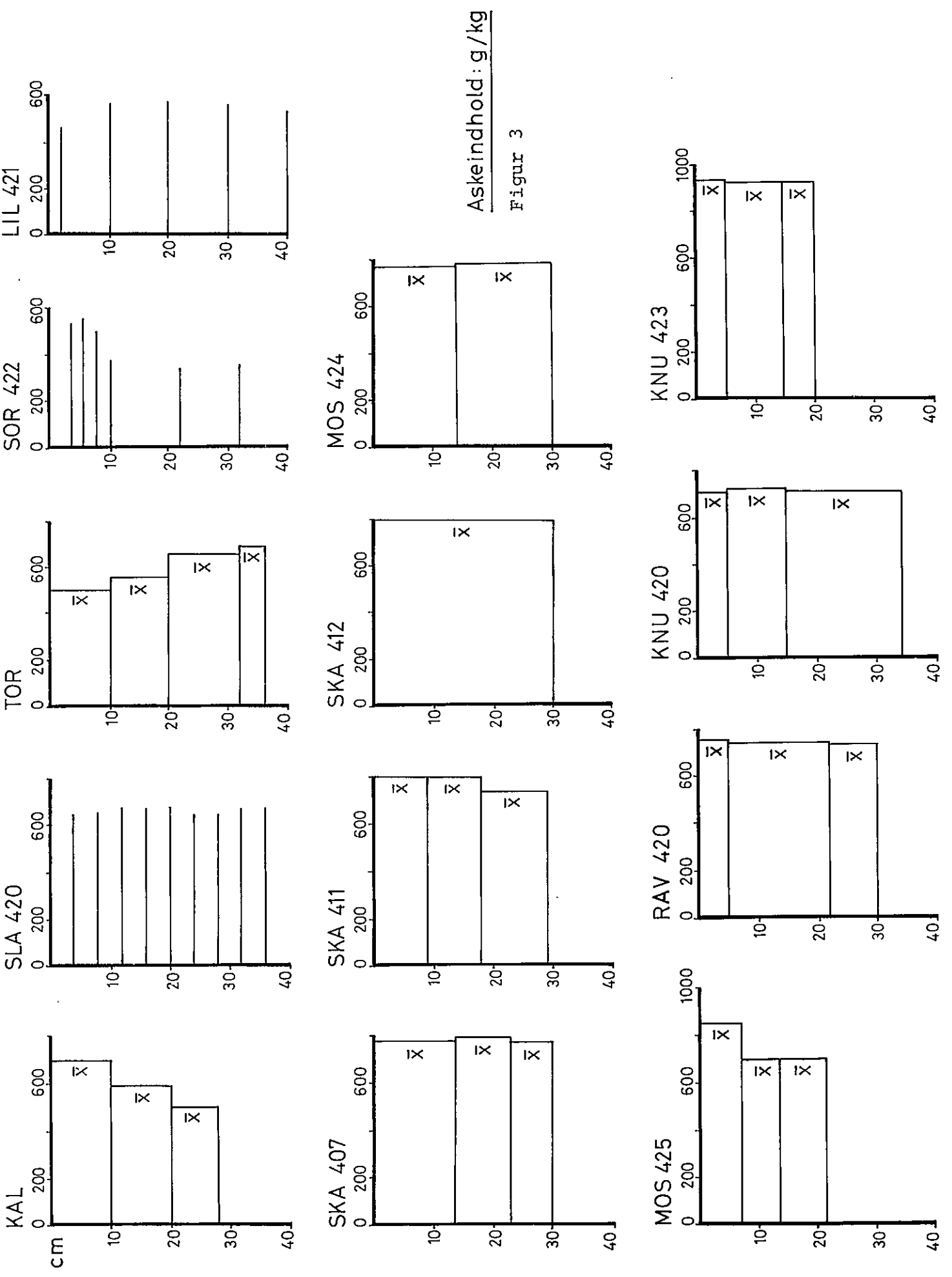
Tyler, G. et al. 1971: Handledning i mark- och
växstkemisk arbetsmetodik, 4:e upplagen.
Lund.

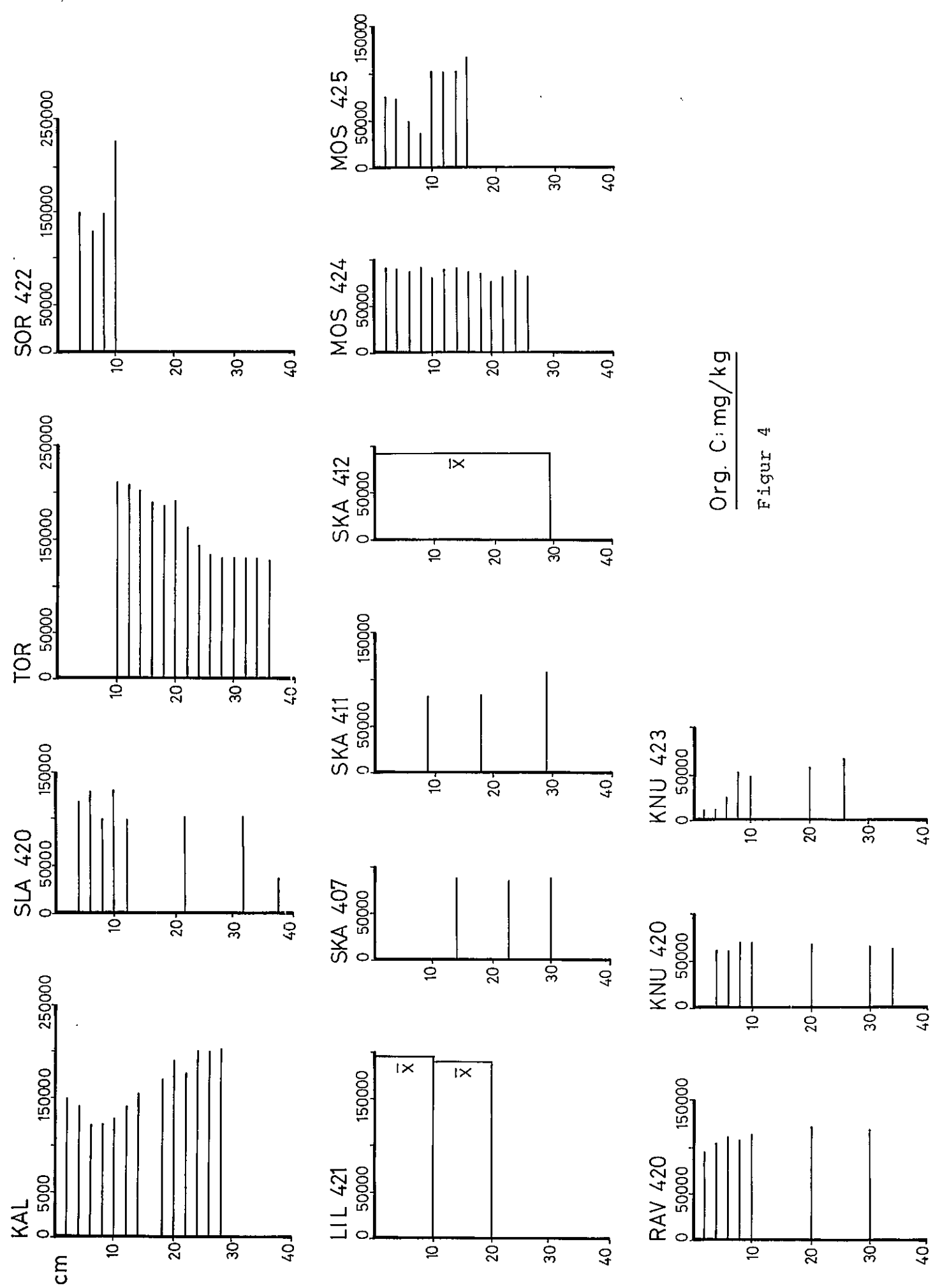
Williams, J. D.H. et al. 1971: Fractionation of
unorganic phosphate in calcareous lake
sediments.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35.



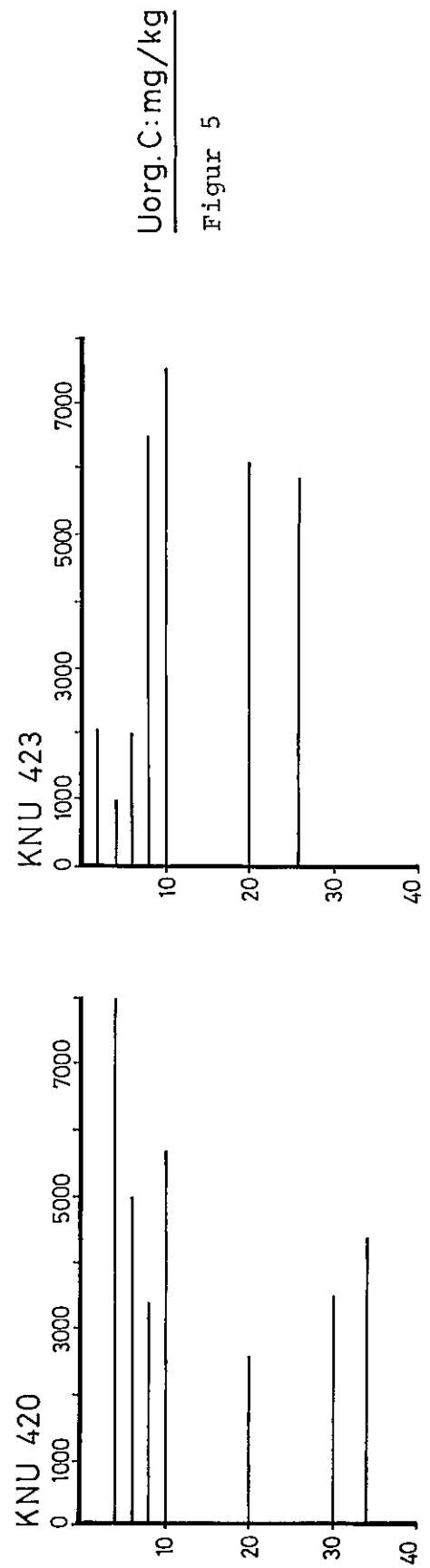
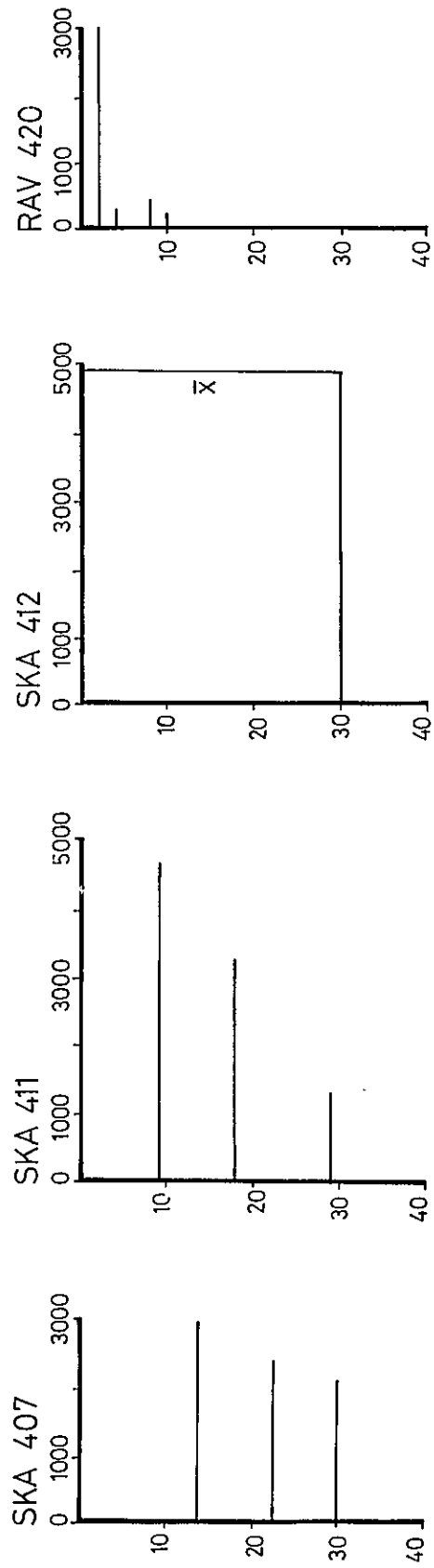
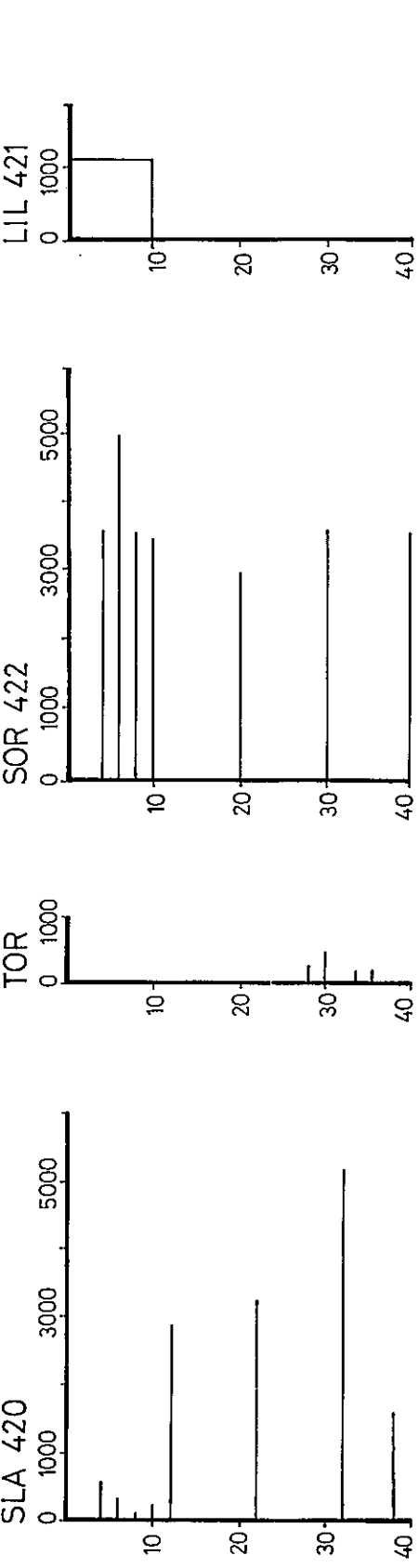
Tørstof: g/kg

Figur 2

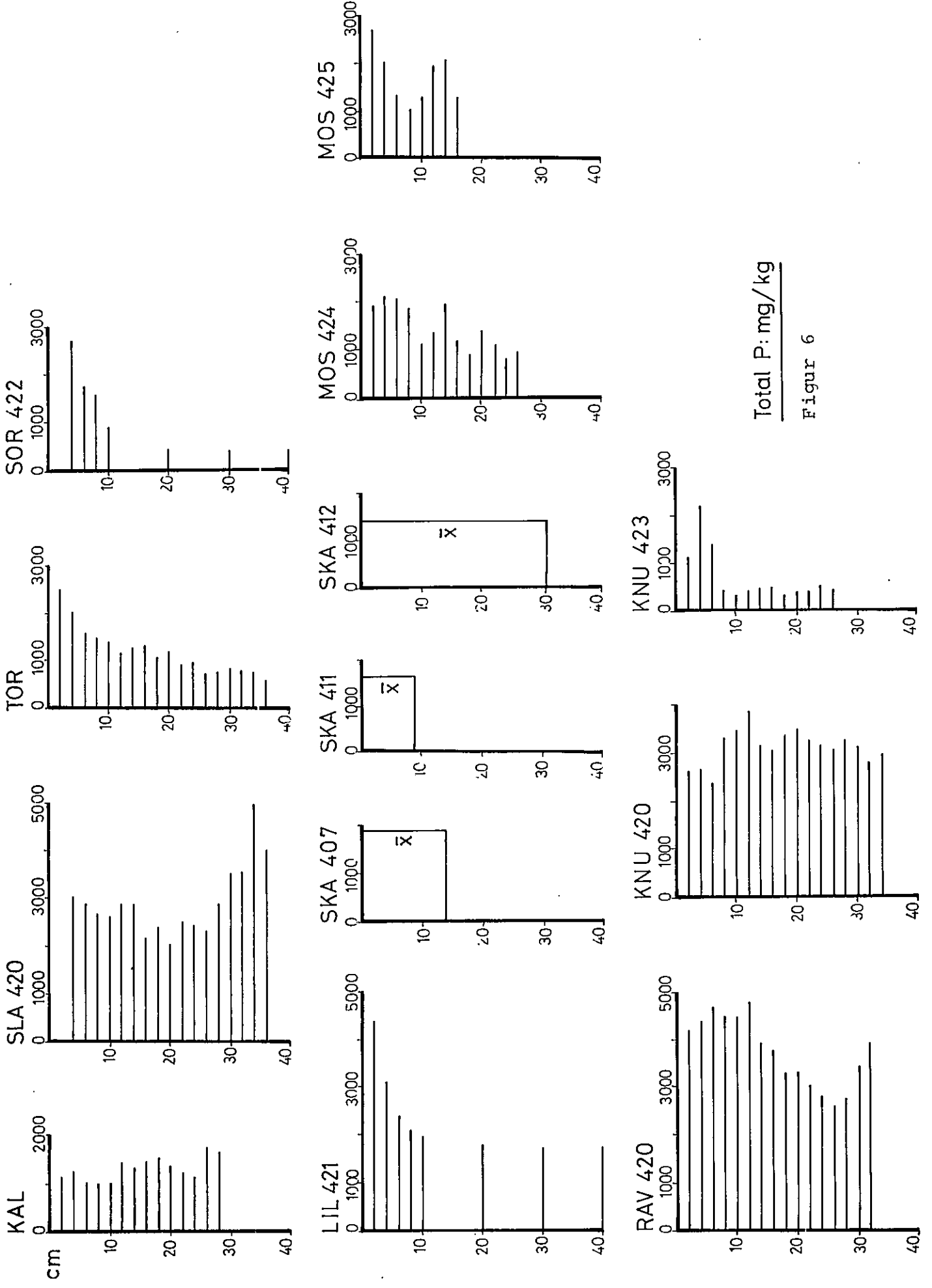




Org. C: mg/kg
Figur 4



Uorg. C: mg/kg
 Figur 5



Total P: mg/kg

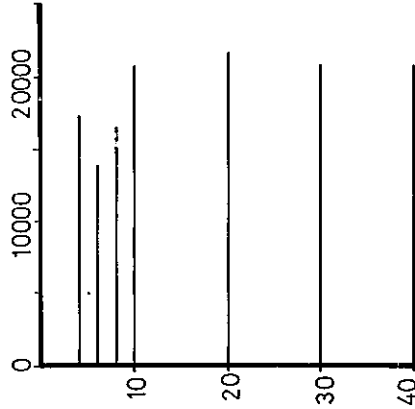
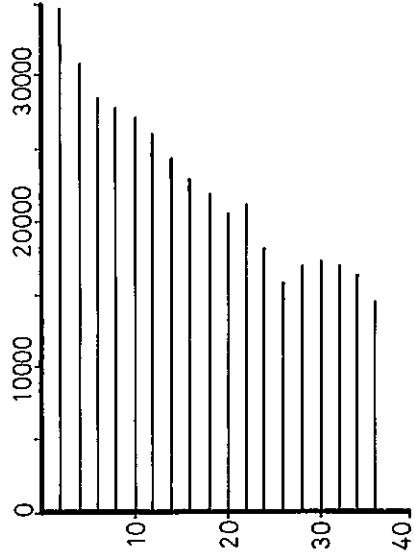
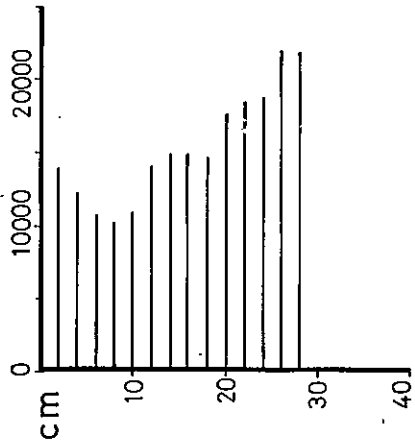
Figur 6

KAL

SLA 420

TUR

SUR 422



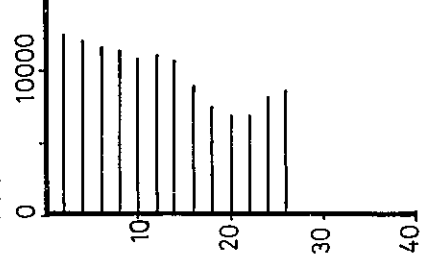
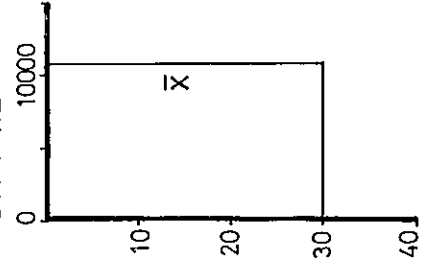
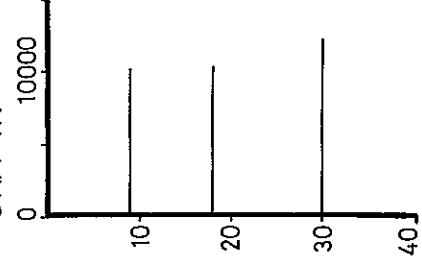
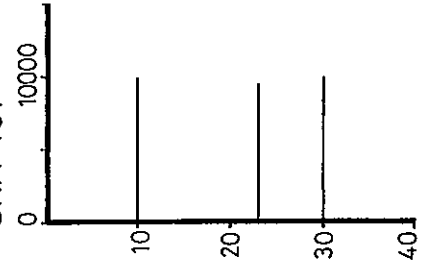
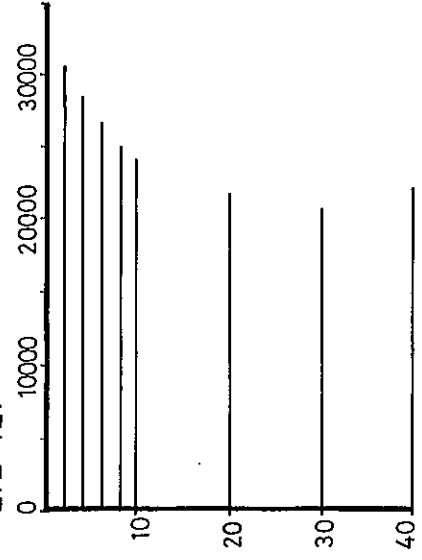
LIL 421

SKA 407

SKA 411

SKA 412

MOS 424



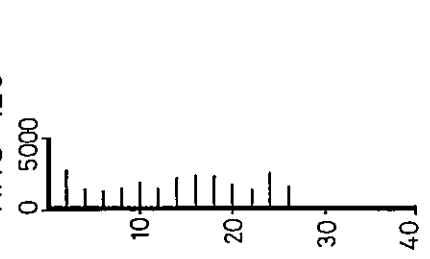
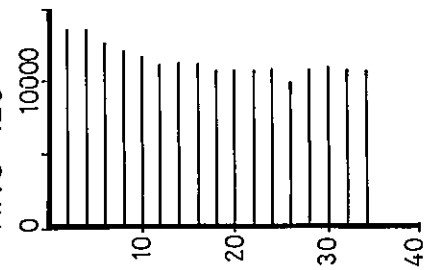
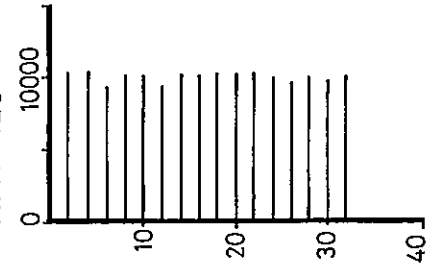
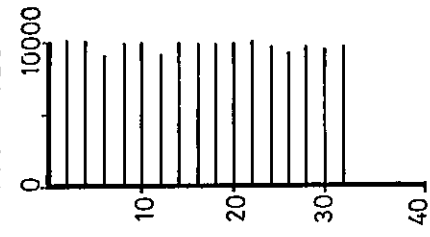
MOS 425

RAV 420

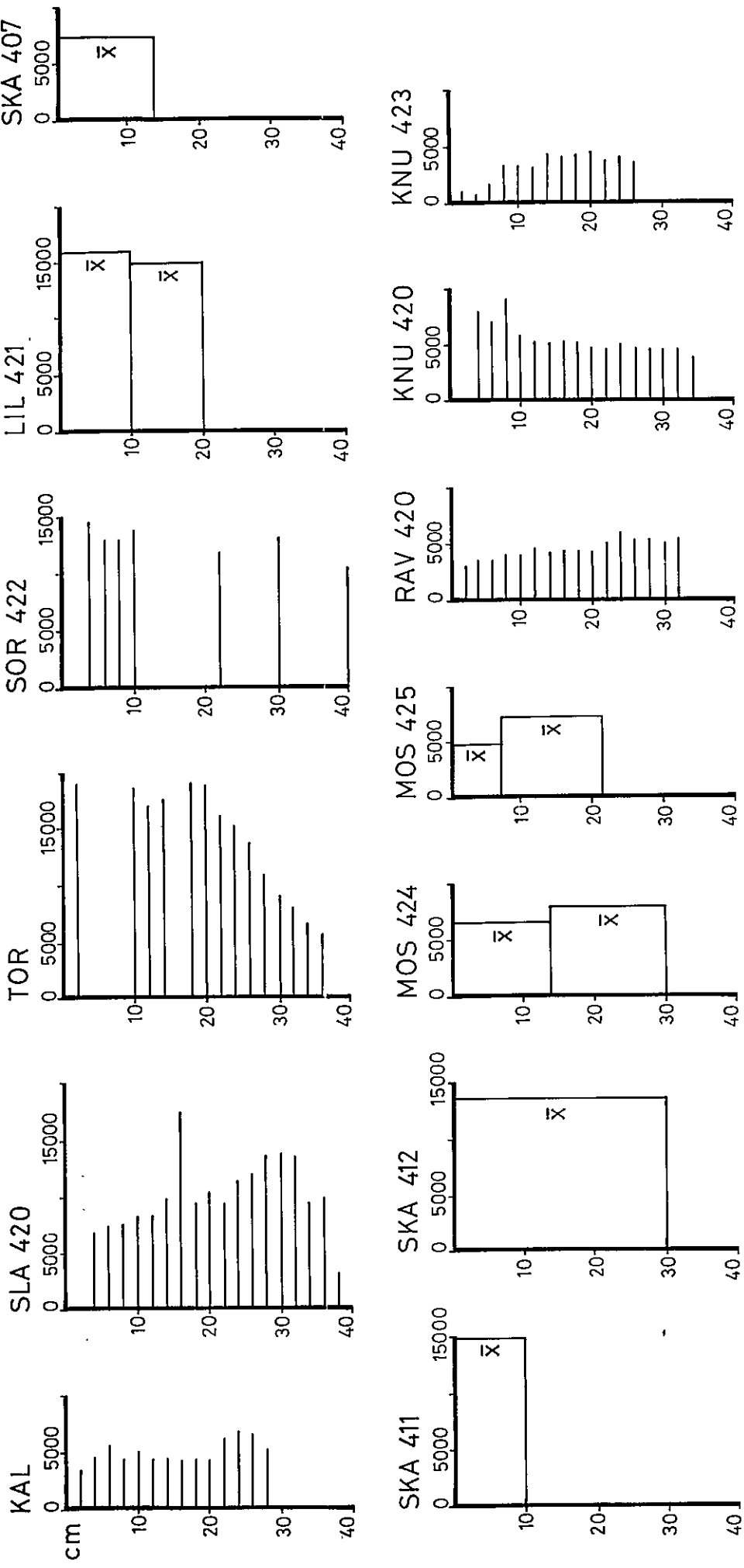
KNU 420

KNU 423

Kjeldahl N: mg/kg

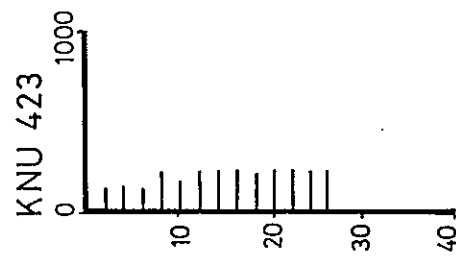
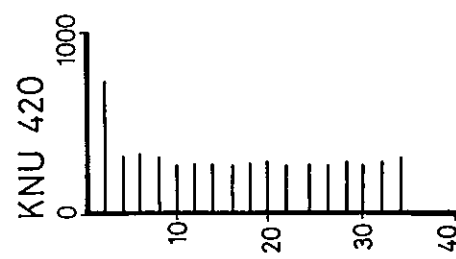
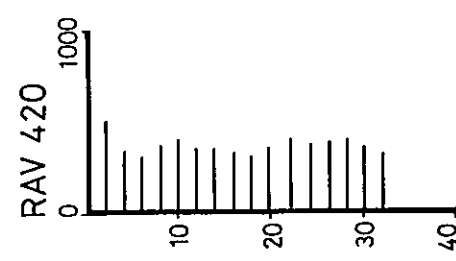
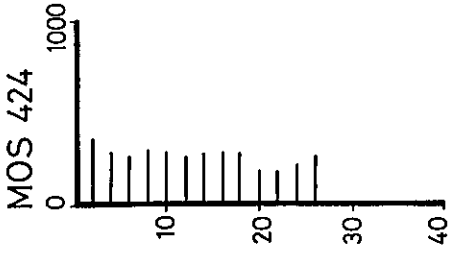
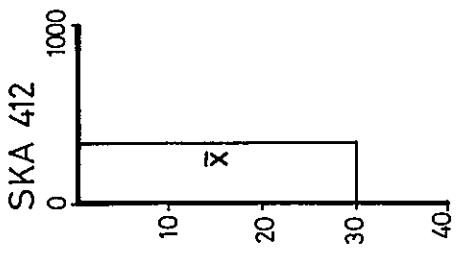
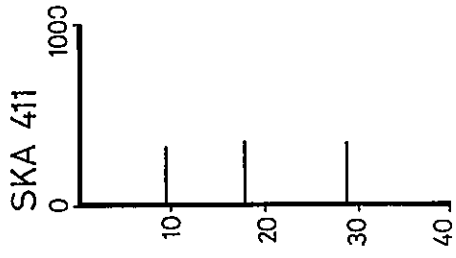
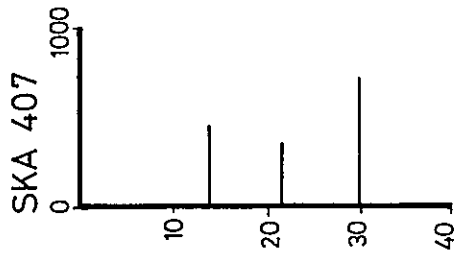
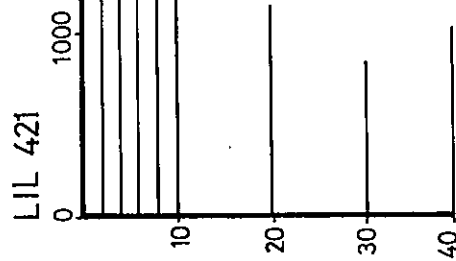
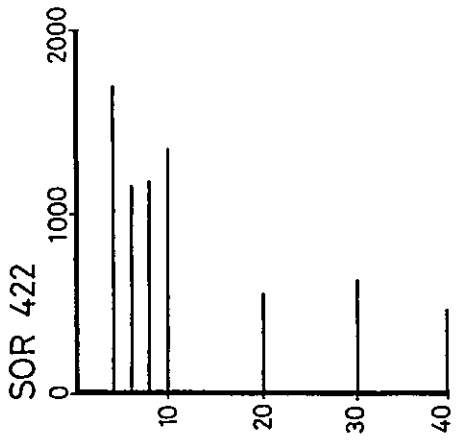
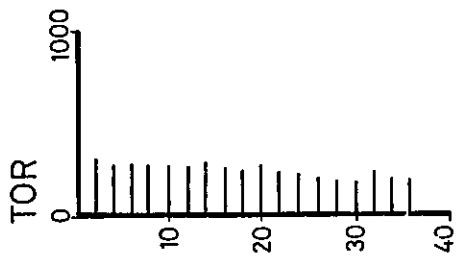
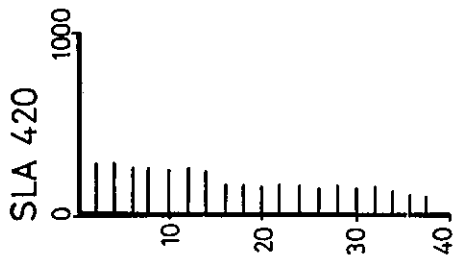
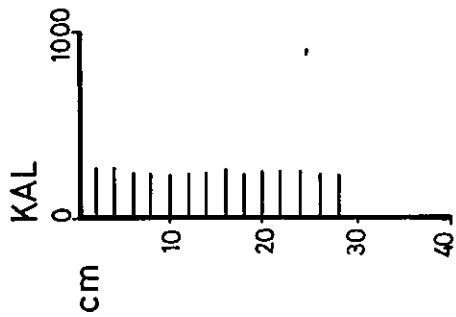


Figur 7



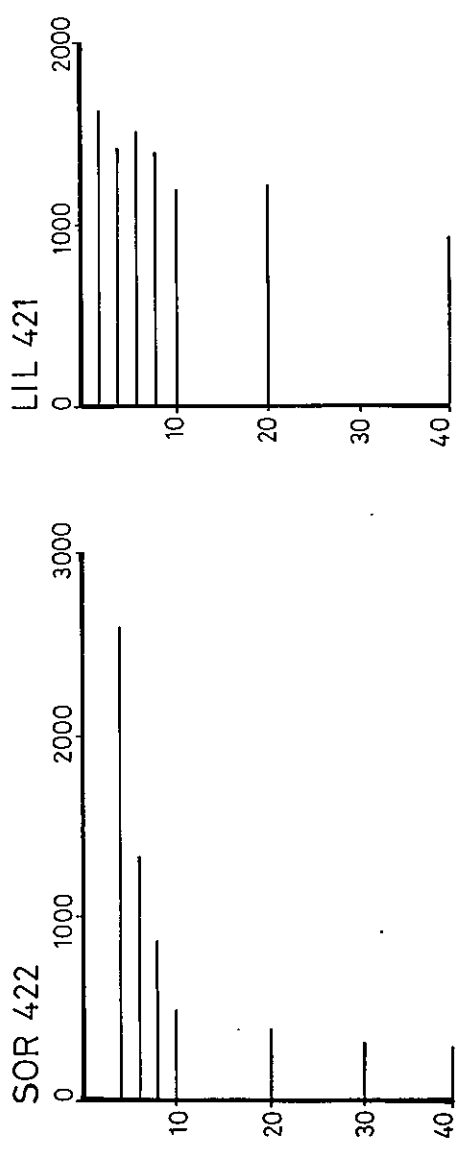
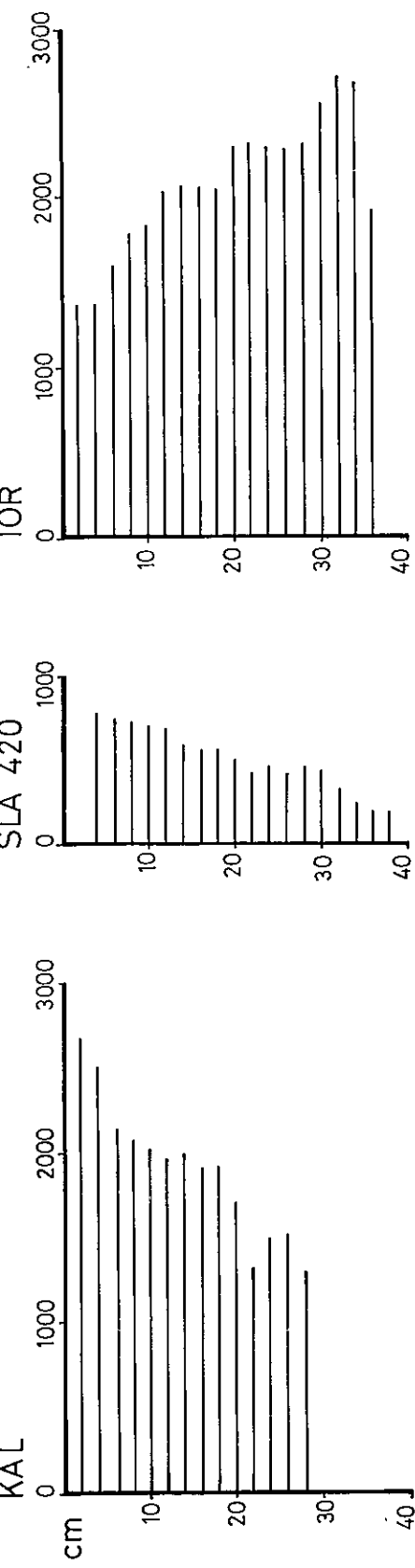
Total S: mg/kg

Figur 8

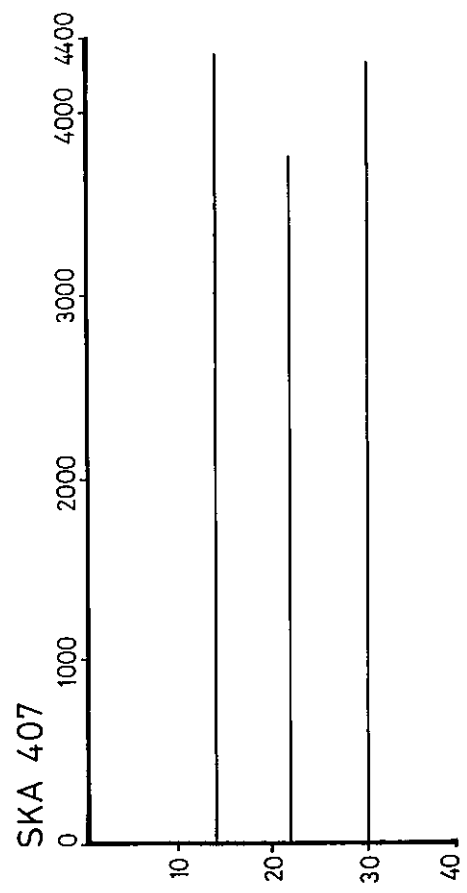


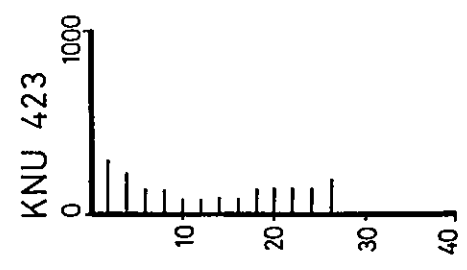
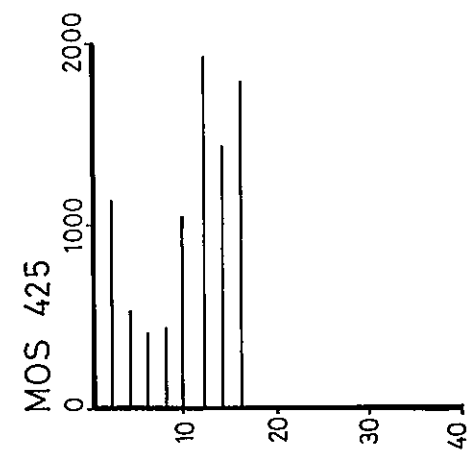
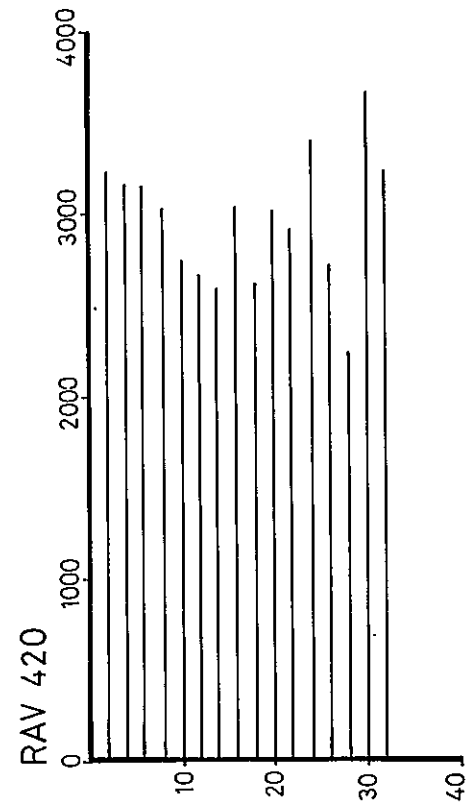
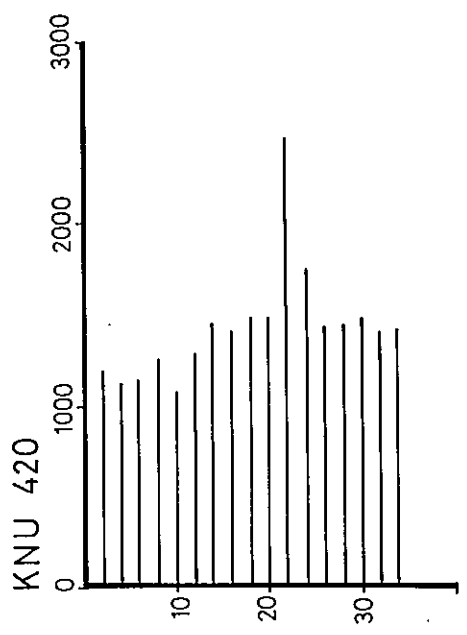
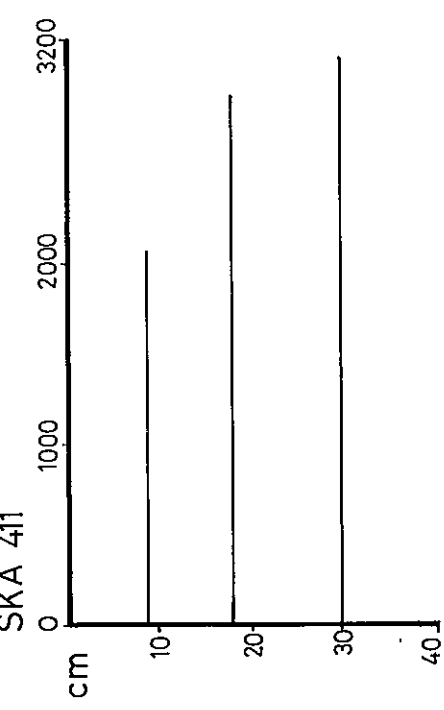
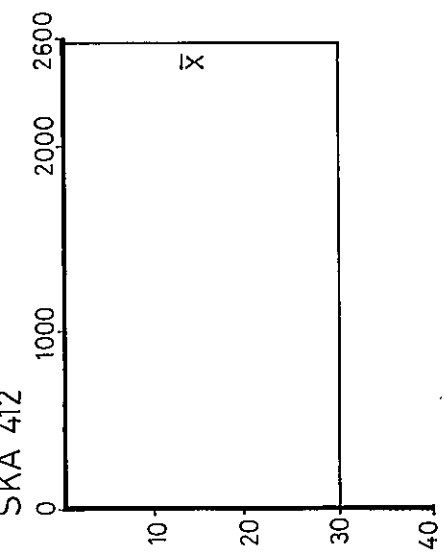
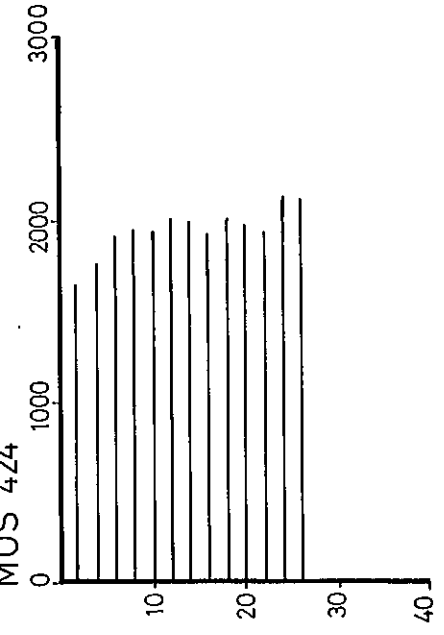
Na: mg/kg

Figur 9

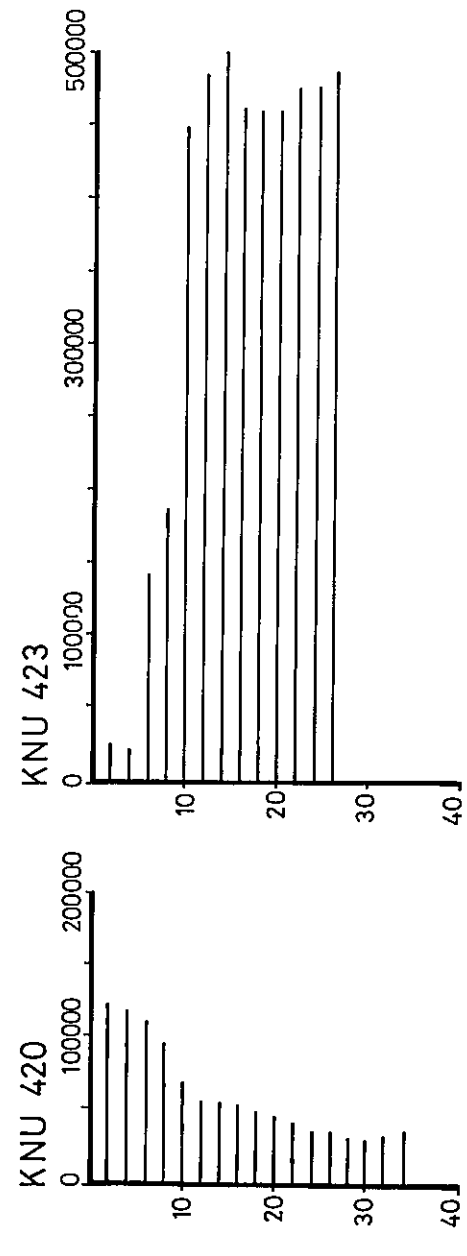
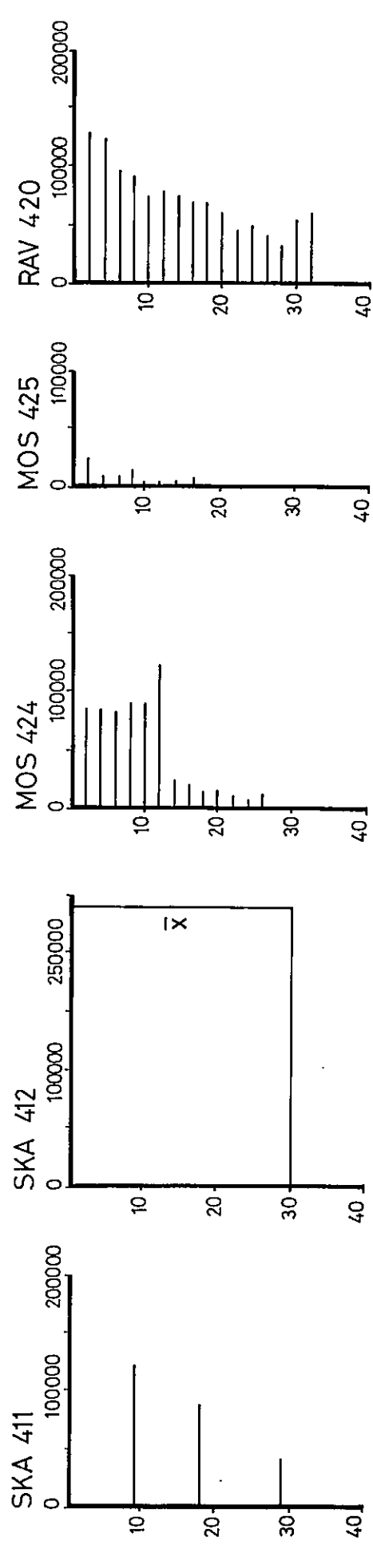
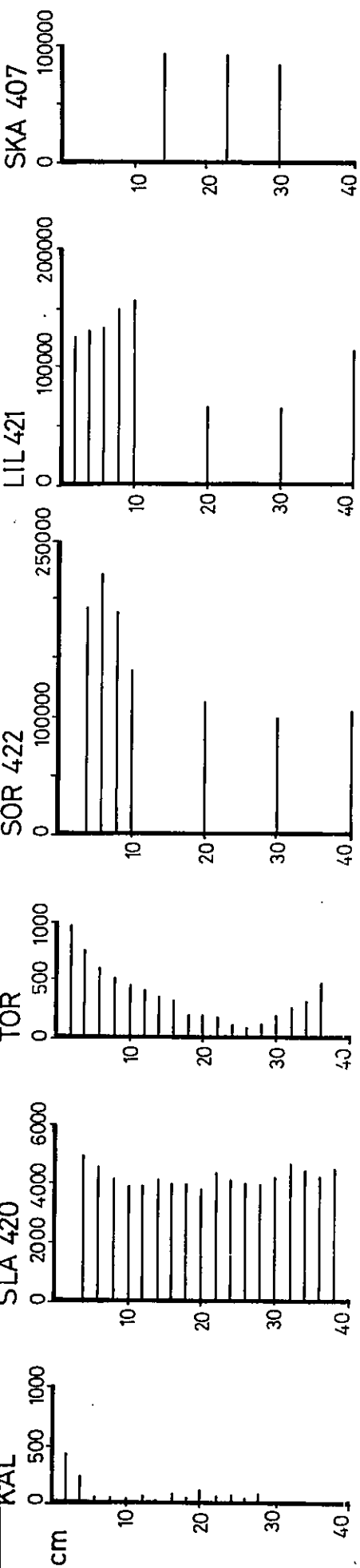


K: mg/kg
Figur 10

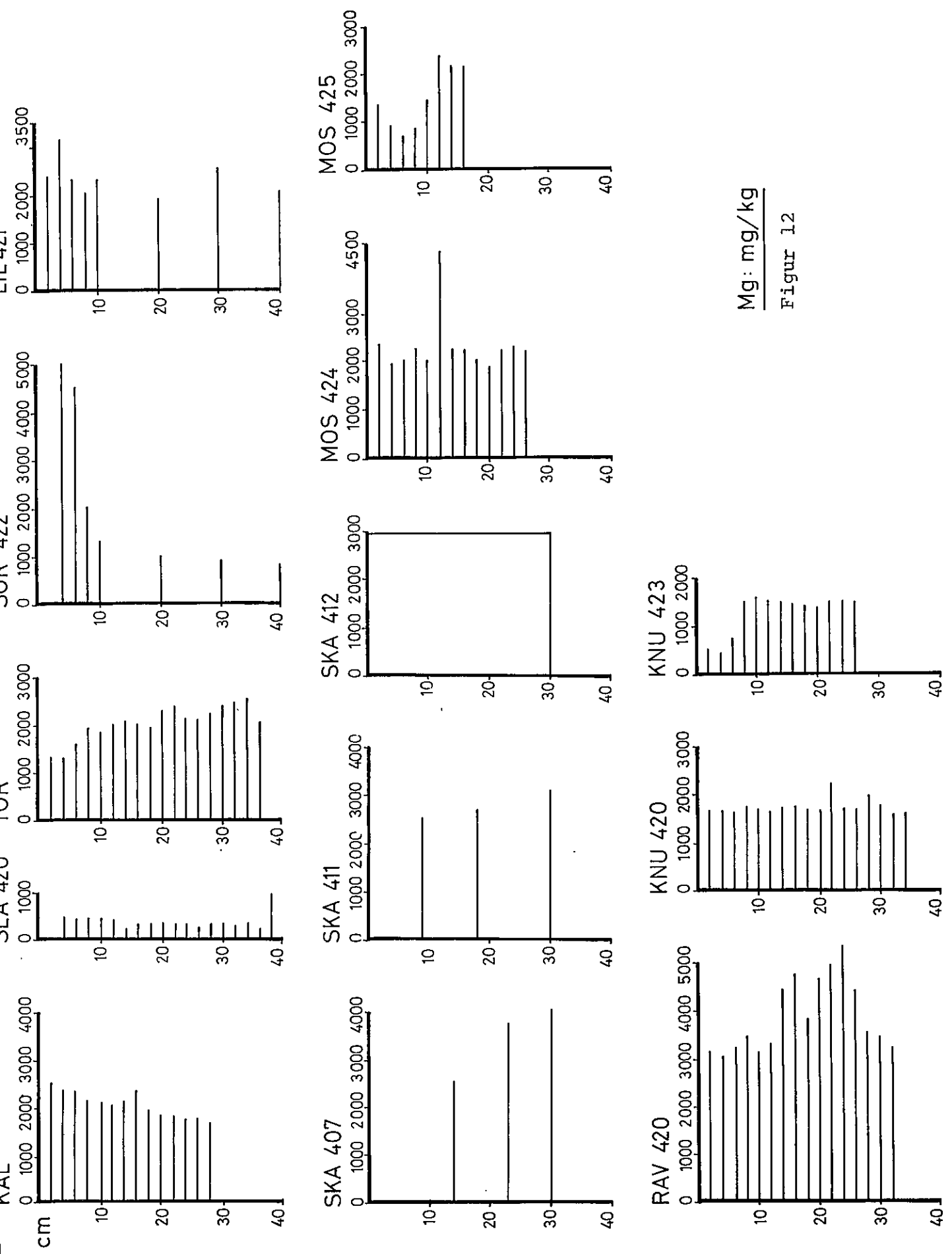




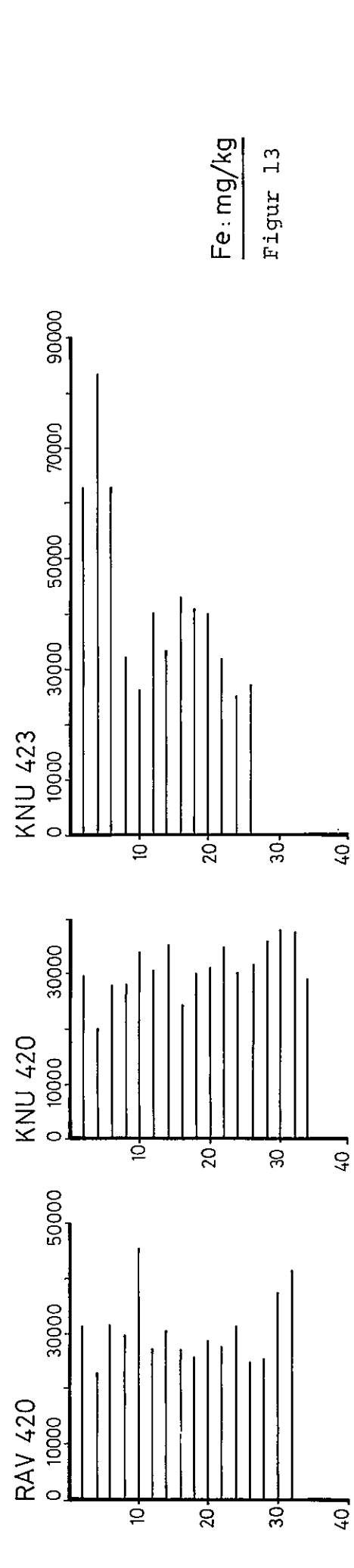
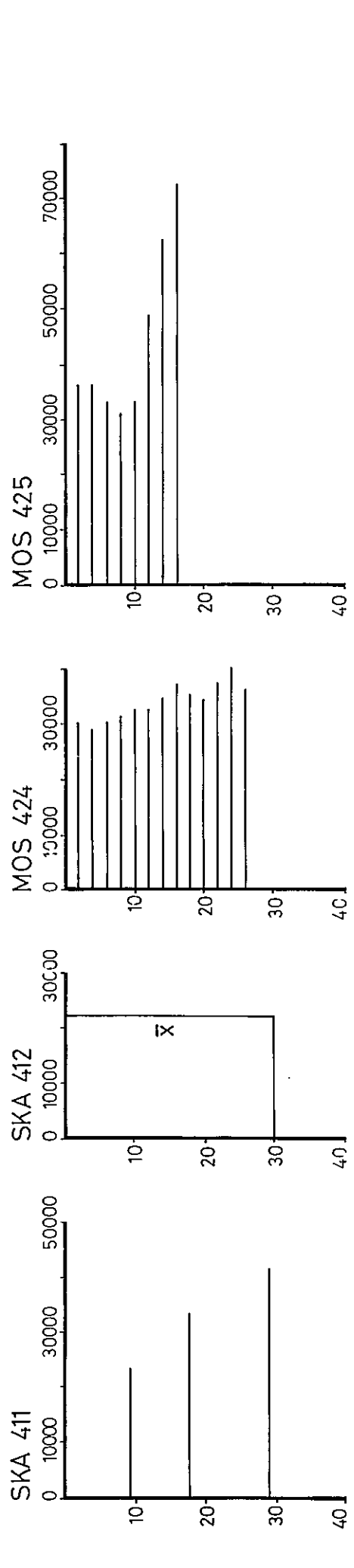
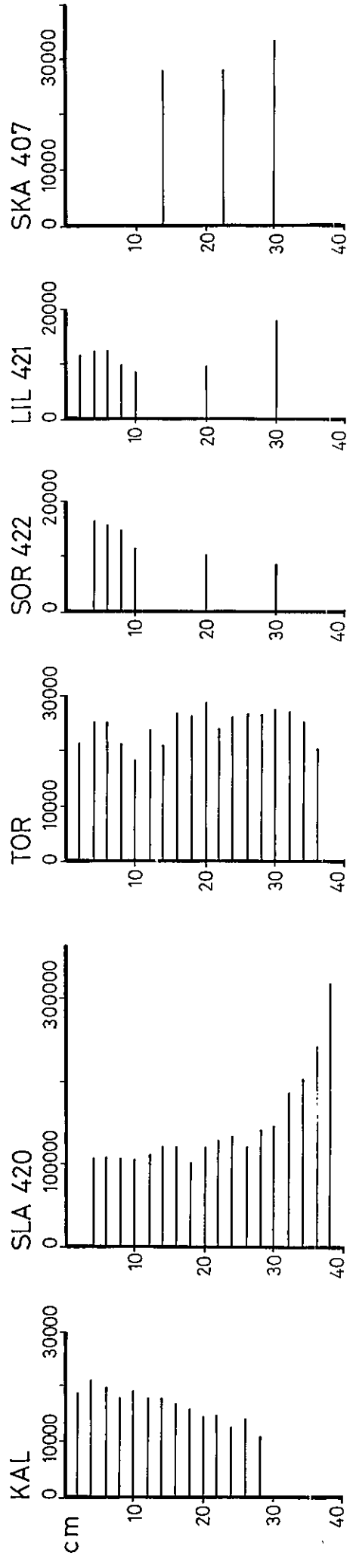
K : mg/kg
Figur 10



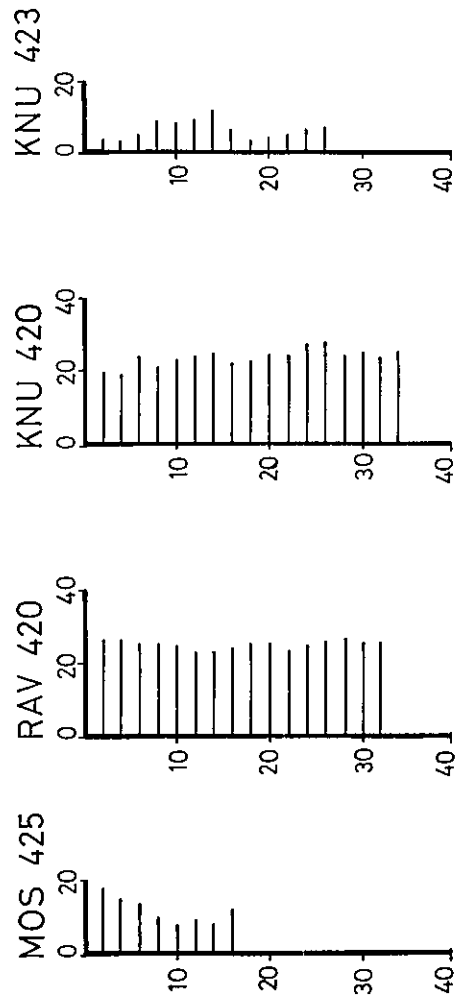
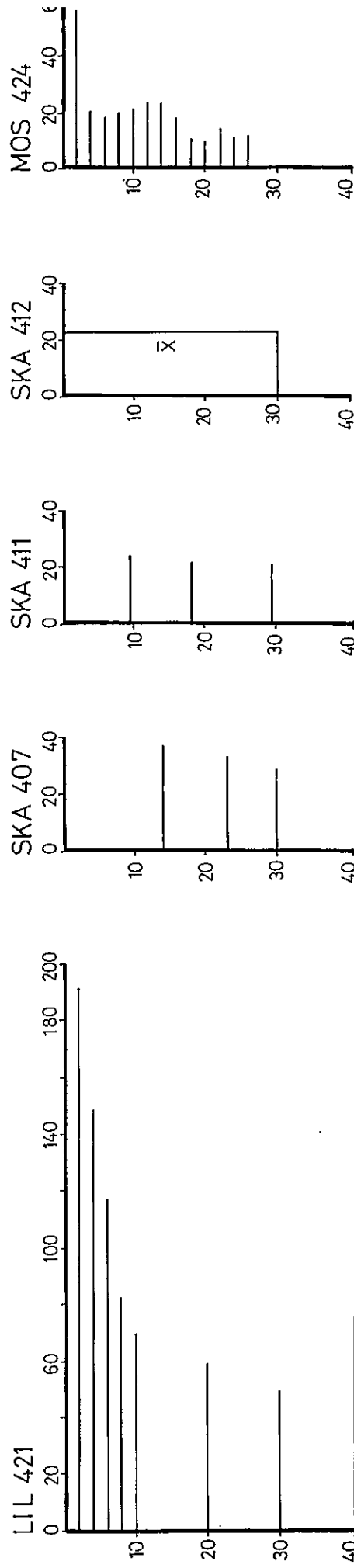
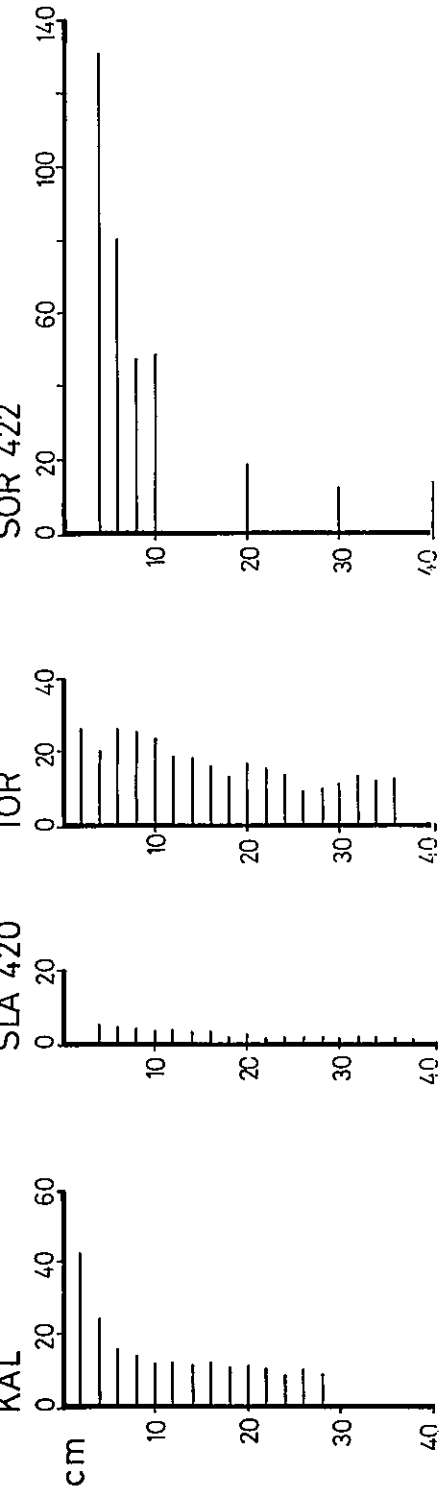
Ca : mg/kg
Figur 11



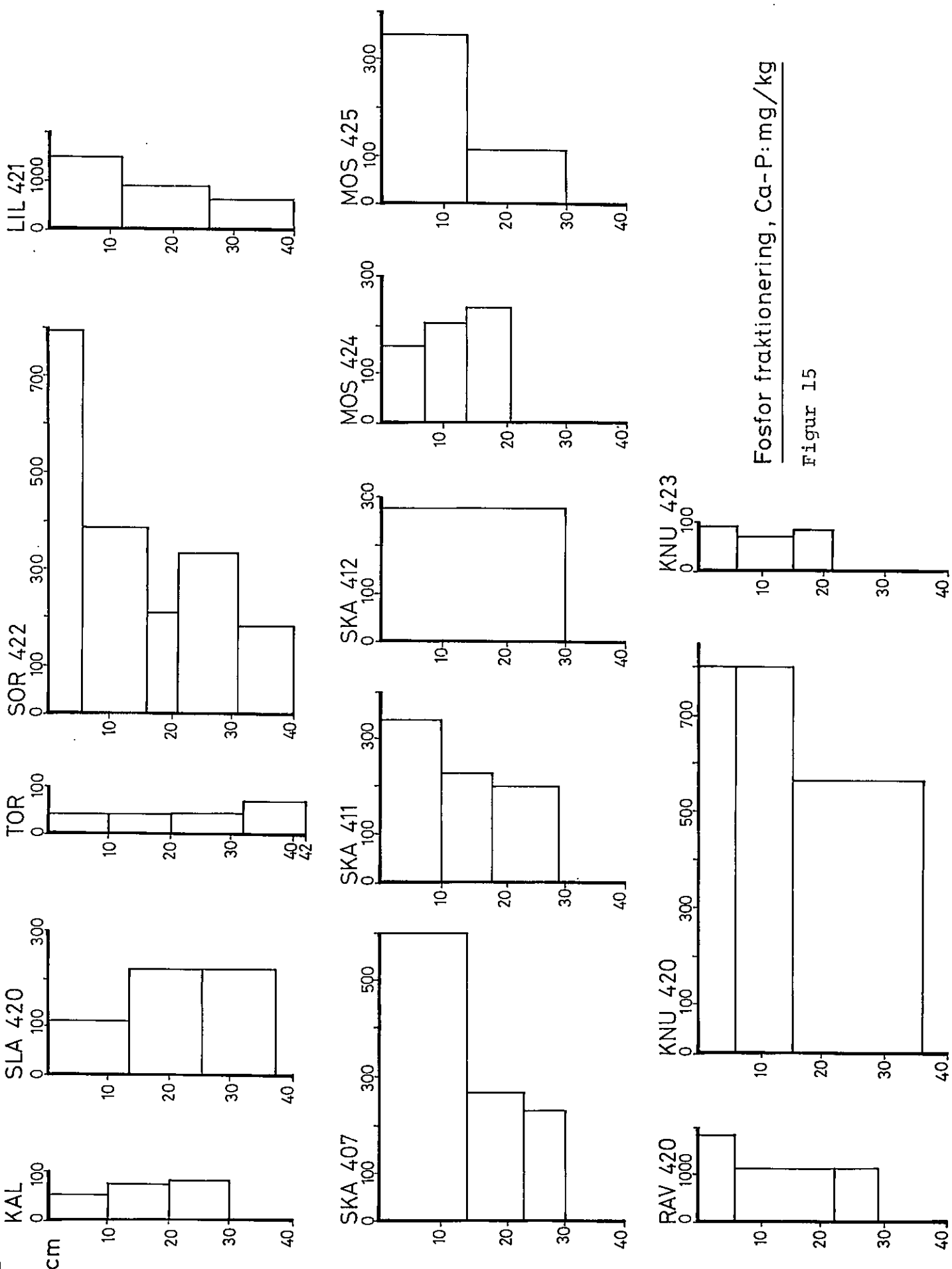
Mg: mg/kg
 Figur 12



Fe: mg/kg
Figur 13

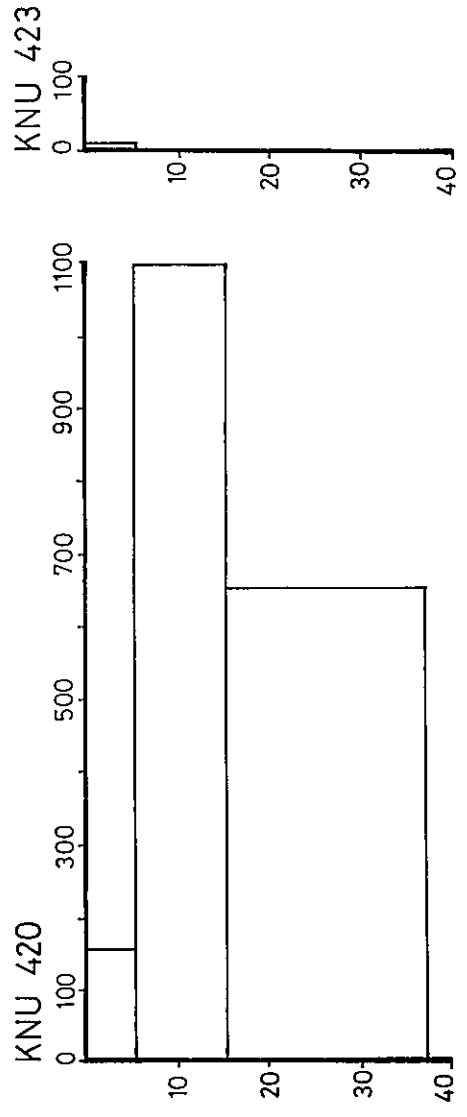
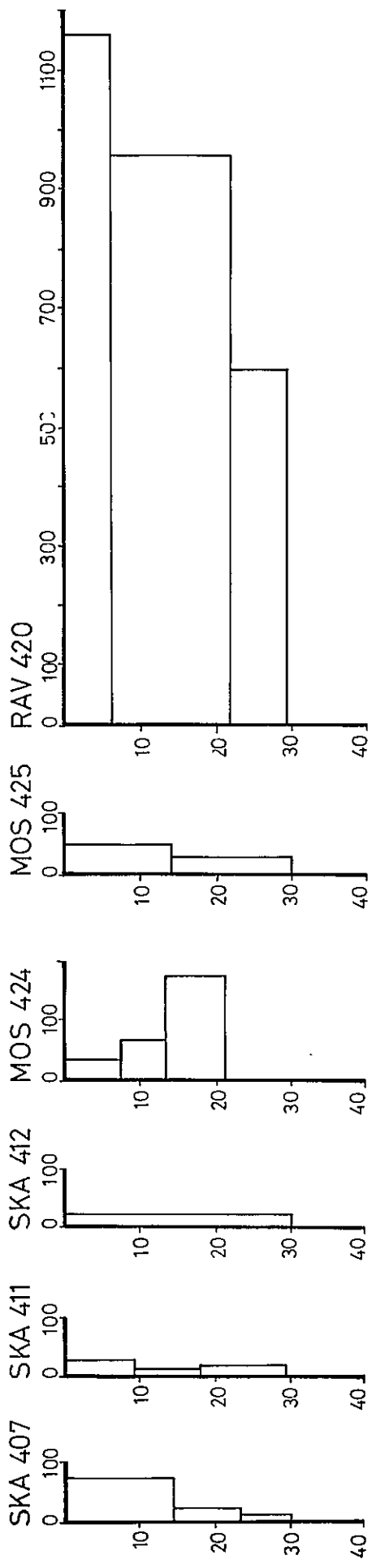
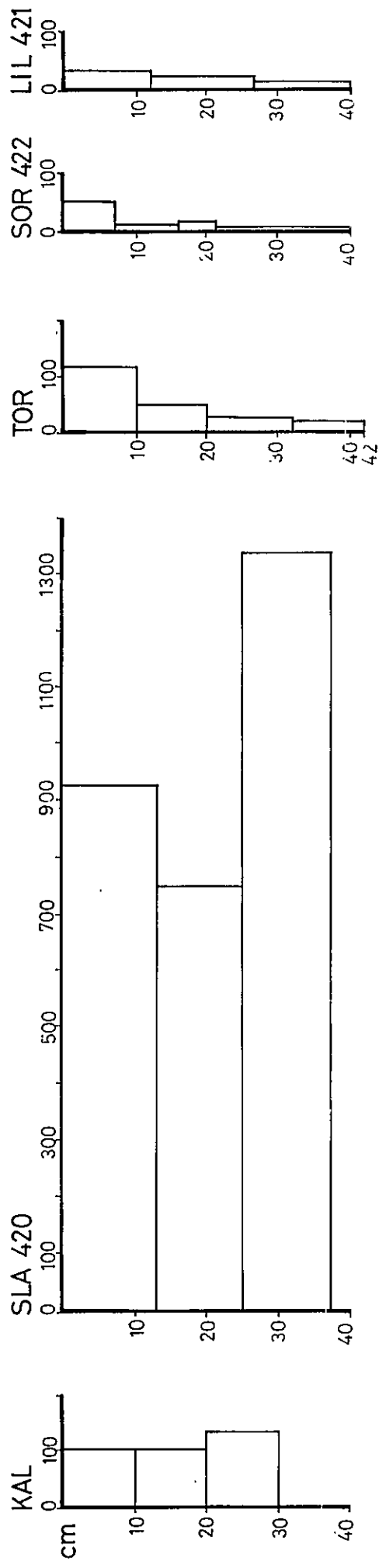


Cu: mg/kg
Figur 14

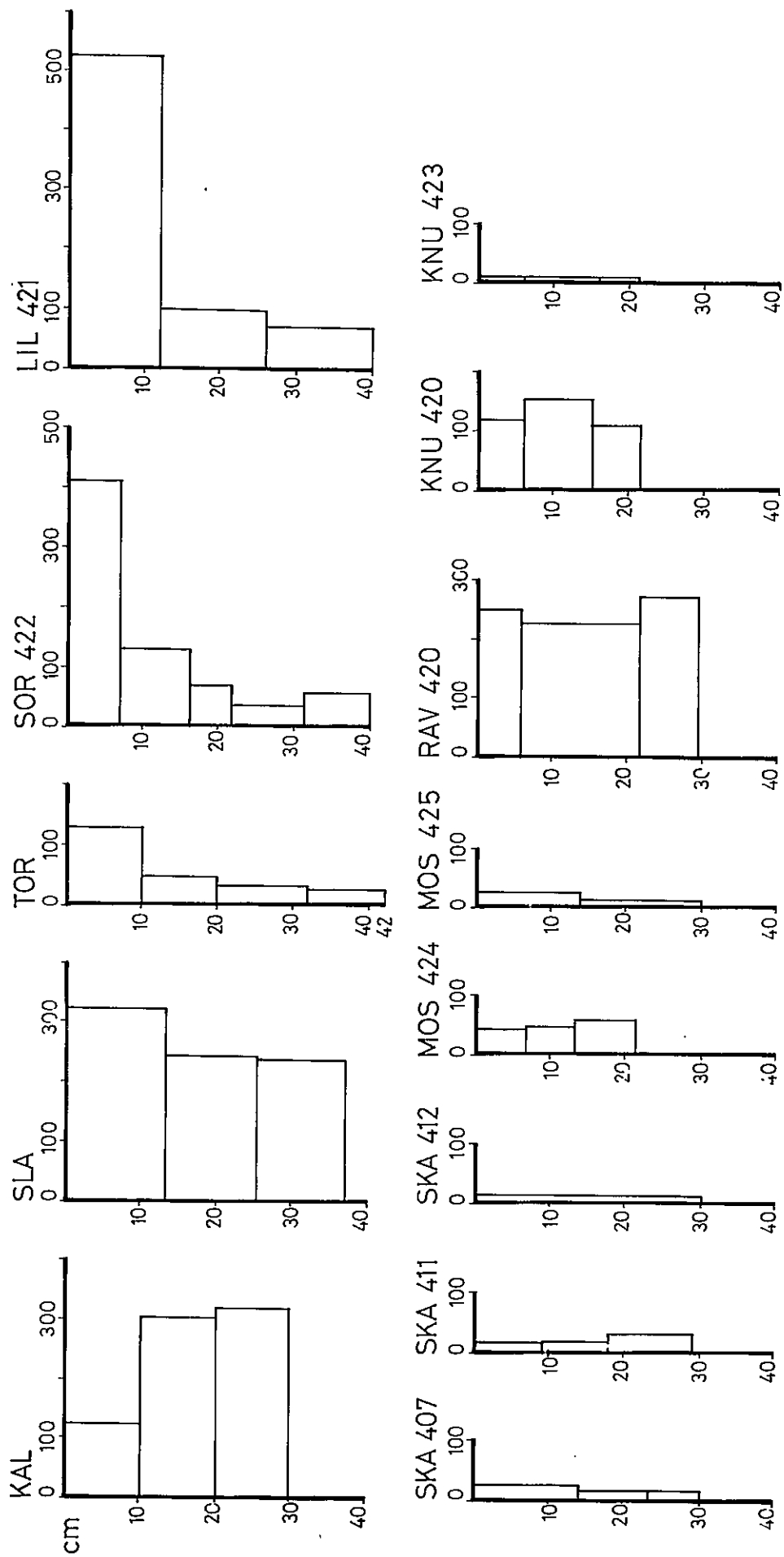


Fosfor fraktionering, Ca-P: mg/kg

Figur 15



Fosfor fraktionering, Fe-P:mg/kg
Figur 16



Fosfor fraktionering, AL-P: mg kg

Figur 17