

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING

Blindern

0-23/74

TOVERDIG JERNSULFAT SOM FELLINGSMIDDEL  
VED RENSING AV KOMMUNALT AVLØPSVANN

Saksbehandler: Siv.ing. Ole Falk Frederiksen

Medarbeidere : Siv.ing. Petter Henrik Øyen

Tekn.lic. Peter Balmér

Rapporten avsluttet i november 1974

## F O R O R D

NIVA fikk våren 1974 i oppdrag av KRONOS-TITAN, Fredrikstad å undersøke hvor godt toverdige jernsulfat kunne brukes som fellingsmiddel i sekundærfelling ved rensing av kommunalt avløpsvann.

Forsøkene er utført på NIVAs forsøksstasjon på Kjeller. Analyser er utført på laboratoriet i forsøksstasjonen og på NIVAs sentrallaboratorium på Blindern.

Siv.ing. Ole Falk Frederiksen har vært ansvarlig for oppfølging av den daglige drift i fullskalaforsøk samt stått for vurdering og rapportering av resultatene. Siv.ing. Petter Henrik Øyen har utført de innledende forsøk samt vært med på den daglige oppfølging av fullskalaforsøk. Peter Balmér har bistått med råd under planlegging og oppfølging av forsøkene, samt vært med på vurdering av resultatene og utforming av den endelige rapport.

Brekke, november 1974

Ole Falk Frederiksen

INNHALDSFORTEGNELSE

	Side:
FORORD	2
INNHALDSFORTEGNELSE	3
TABELLFORTEGNELSE	4
FIGURFORTEGNELSE	5
1. INNLEDNING	6
2. KJEMISK RENSING AV AVLØPSVANN	7
2.1 De aktuelle kombinasjoner av kjemisk felling	7
2.2 Kjemisk felling - en kort beskrivelse av prosessen	7
2.3 Momenter ved valg av fellingskjemikalie	9
3. ERFARING MED JERN(II)SULFAT SOM FELLINGSMIDDEL	10
3.1 Oksydasjon av toverdige jern	10
3.2 Jern - fosforreaksjoner i avløpsvann	10
3.3 Fosforfjerning ved felling med jern(II)sulfat	11
3.4 Tilsetning av hjelpekoagulant	14
3.5 Restjernmengde i effluenten	15
4. UNDERSØKELSER	16
4.1 Faktorer som må undersøkes ved sekundærfelling med jern(II)sulfat	16
4.2 Forsøksanlegget	16
4.3 Dosering	18
4.4 Råkloakk	18
4.5 Prøvetaking	19
4.6 Analyser	19
4.7 Forsøkets utførelse	19
4.8 Resultater av innledende forsøk i laboratorieskala	19
4.9 Resultater fra forsøk i halvt teknisk målestokk	20
4.10 Diskusjon av resultater	23
4.11 Kostnader	26
5. SAMLET VURDERING	39
LITTERATURLISTE	40
BILAG A OKSYDASJONSFORSØK	43
BILAG B INNLEDENDE FORSØK: NØDVENDIG DOSERINGSMENNGDE, TILSETTINGSPUNKT OG POLYELEKTROLYTTILSATS	47
BILAG C FORTYKKINGSFORSØK	55

TABELLFORTEGNELSE

Tabell nr.		Side:
1	Data over forsøksanlegget	18
2	Dosering av fellingsmiddel og renseresultat for samtlige forsøksdøgn	21
3	Sammenfatning av fellingsforsøk med jern(II)sulfat + kalk på Kjeller (73 og 74) og Hamar (73)	22
4	Pris på fellingsmiddel pr. sept. 1974	26
5	Kostnader for fellingsmidler	26
B1	Konstant jerdosering (27 mg Fe <sup>2+</sup> /l) og varierende pH	50
B2	Konstant pH (9,0) og varierende jerdosering	51
B3	Konstant jerdosering (40,5 mg Fe <sup>2+</sup> /l) og varierende pH	52
B4	Tilsetting av kalk før og etter jerntilsats	53
B5	Polyelektrolytt-tilsats	54
C1	Fortykking av slam fra jern(II)sulfat + kalkfelling	57

FIGURFORTEGNELSE

Fig. nr.		Side:
1	Aktuelle kjemisk fellingstyper	8
2	Felling med jernsulfat uten oksygen tilstede	13
3	Oversikt over kjemisk fellingsanlegg m/forsedimentering	17
4	Total fosfor ~ pH	28
5	Prosentuell fjerning av total fosfor ~ pH	29
6	Kjemisk oksygenforbruk ~ pH	30
7	Prosentuell fjerning av KOF ~ pH	31
8	Suspendert stoff ~ pH	32
9	Ortofosfat (filtrert prøve) ~ pH	33
10	Restjernkonsentrasjon ~ pH	34
11a	Total fosfor ~ suspendert stoff	35
11b	Restjern ~ suspendert stoff	35
12	Kalkforbruk ~ pH	36
13	pH ~ slamproduksjon (kg/d)	37
14	Total fosfor ~ pH for jern(II)sulfatfelling og total fosfor ved aluminiumsulfatfelling	38
A1	Oksydasjon av toverdige jern	45
B1	Nødvendige kalkmengder	49
C1	Initialsynkehastighet ~ % TS	58
C2	Partikkelflux ~ konsentrasjon	59

## 1. INNLEDNING

Vi står i Norge i dag foran en periode med stor innsats på avløpsvannsektoren. For å hindre ytterligere forurensning vil det de fleste steder være behov for å redusere fosfortilførsel til resipientene. Den vanligste metoden for fosforfjerning av kommunalt avløpsvann er ved kjemisk felling.

Ved fremstilling av titandioksyd er ren jernsulfat et biprodukt. Jernsulfat fås i store mengder og er som avfall en potensiell forurensningskilde. Hvis det var mulig å anvende jernsulfat som fellingsmiddel ved kjemisk felling av avløpsvann vil dette være en ressursmessig god løsning.

## 2. KJEMISK RENSING AV AVLØPSVANN

### 2.1 De aktuelle kombinasjoner av kjemisk felling

Kjemisk felling finner man sammen med mekanisk og biologisk rensing i forskjellige kombinasjoner. Se fig. 1.

Primærfelling og sekundærfelling er mekanisk-kjemiske rensemetoder. Ved primærfelling tilsettes fellingskjemikaliet ubehandlet avløpsvann før sedimenteringsenheten, og ved sekundærfelling har vi kjemisk felling etter forsedimentering.

Forfelling, simultanfelling og etterfelling er kjemisk felling tilknyttet biologisk rensing. Tilsettes fellingskjemikaliet før forsedimentering har vi forfelling. En simultan utfelling får man ved at fellingskjemikaliet settes til luftebassenget. Kjemisk felling etter biologisk rensing kalles etterfelling. Ved simultanfelling og etterfelling har en noen steder forsedimentering før det biologiske trinnet som vist i figuren.

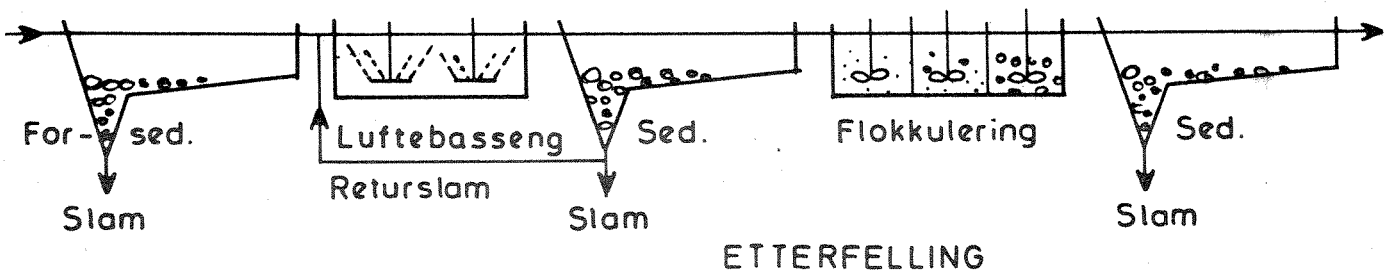
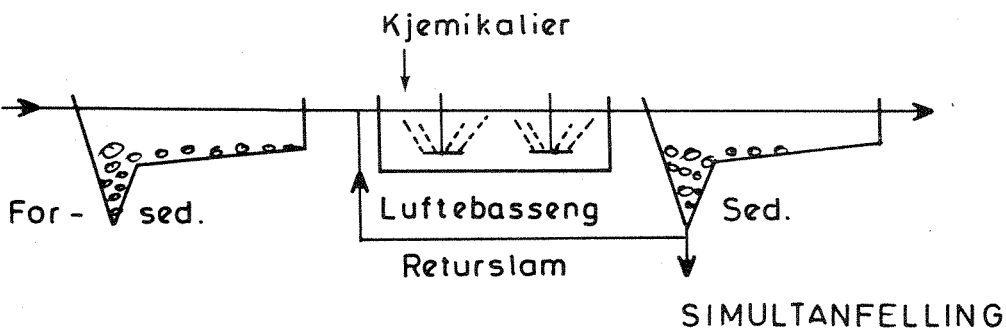
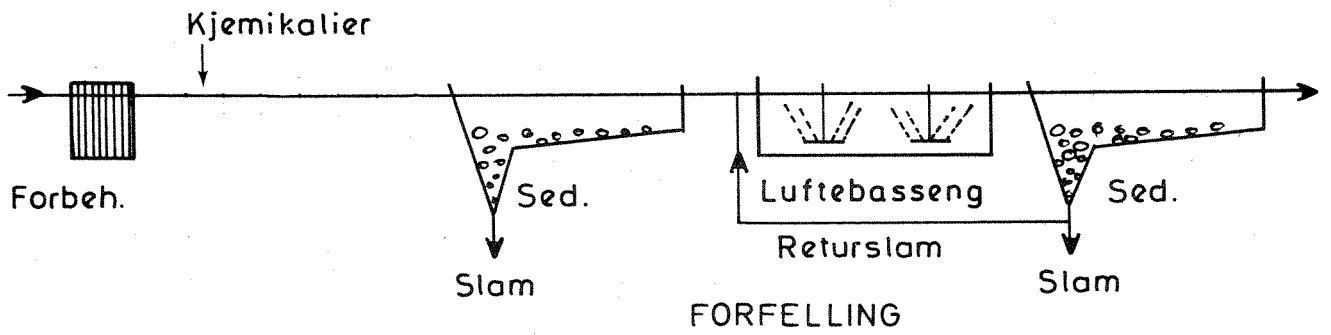
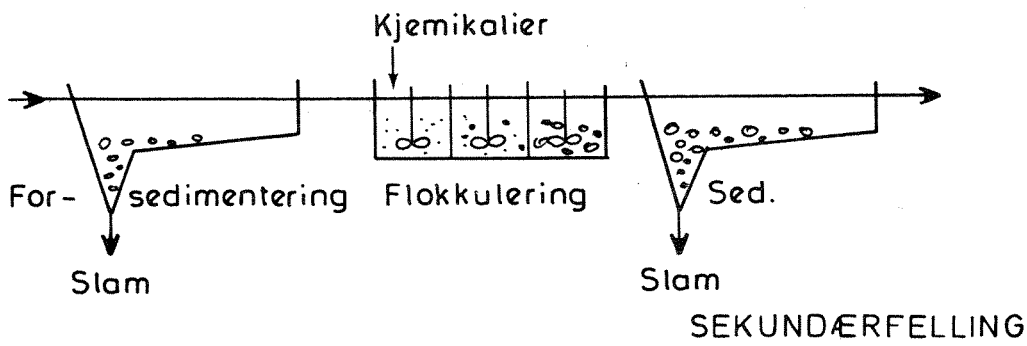
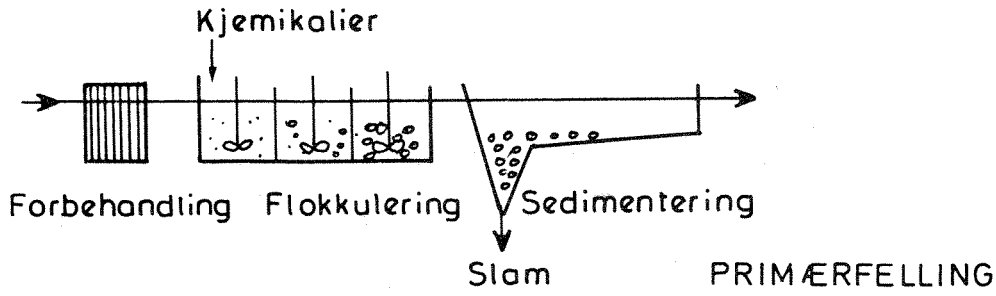
### 2.2 Kjemisk felling - en kort beskrivelse av prosessen

I det kjemiske fellingssteget skjer først en innblanding av fellingskjemikalie under hurtig omrøring. Ved tilsetting er fellingsmidlet løst og vil reagere med løste komponenter i avløpsvannet. Vi får dermed dannet begynnelsen til en fnokk. Den kjemiske fellingen er sterkt pH-avhengig. Den nødvendige fellings-pH kan man få ved tilsetting av fellingsmidlet og om nødvendig en sterk syre eller base.

Ved fortsatt omrøring vil de dannede mikrofnokker stadig kollidere med hverandre. Ved kollisjonen kan man da få dannet større fnokker. Oppbyggingen av fnokker skjer under stadig roligere omrøring så ikke fnokkene skal bli revet i stykker. Vanligvis har man et hurtigomrøringskammer med to-tre følgende flokkuleringskamre. I simultanfellingsprosessen skjer flokkulering ved den turbulens en har i det biologiske luftebassenget.

Etter at fnokkene er bygd opp, må de separeres fra vannet. Dette skjer vanligvis ved gravitasjon i et sedimenteringsbasseng.

FIG.1 AKTUELLE KJEMISKE FELLINGSTYPER





### 2.3 Momenter ved valg av fellingskjemikalie

Ved valg av fellingsmiddel må følgende vurderes:

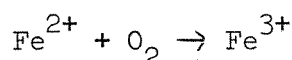
1. Renseeffekt. Man må få den ønskede reduksjon av organisk stoff og fosfor ved den kjemiske fellingen.
2. Doseringsmengde. Nødvendig doseringsmengde bestemmer kjemikaliekostnadene og størrelsen av slamproduksjonen.
3. Slam. Mengde produsert slam ved fellingsprosessen og dets egenskaper har stor betydning for kostnader ved videre behandling og muligheter for endelig disponering.
4. Håndteringsegenskaper. Fellingskjemikaliet skal kunne transporteres og doseres uten vanskeligheter.
5. Påvirkning av resipienten. Avløpsvann med meget høy eller lav pH-verdi kan ha skadelig innvirkning på resipienten. Resipienten kan også bli påvirket i negativ retning hvis store mengder av fellingsmidlet følger med i utløpsvannet.
6. Økonomi. Valg av fellingsmiddel påvirker foruten de direkte kjemikaliekostnadene også kostnadene til slambehandling og intern kjemikaliehåndtering.

De fellingsmidler som i dag kan tenkes brukt ved rensing av kommunalt avløpsvann (den angitte fellings-pH er ved sekundærfelling) er aluminiumsulfat (fellings-pH ca. 6,5), kalk (pH ca. 11,3), jern(III)klorid (pH ca. 5,5) og jern(III)klorid + kalk (pH ca. 8,5), jern(II)sulfat (brukes alene kun ved simultanfelling, pH ca. 7) og jern(II)sulfat + kalk (pH ca 8,5).

### 3. ERFARING MED JERN(II)SULFAT SOM FELLINGSMIDDEL

#### 3.1 Oksydasjon av toverdige jern

Tilsettes jern(II)sulfat i avløpsvann vil man når det fins løst oksygen i avløpsvannet få en oksydasjon av det toverdige jernet til treverdige.



For hvert g  $\text{Fe}^{2+}$  som oksyderes, trengs 0,14 g  $\text{O}_2$ . Hastighetslikningen for reaksjonen i rent vann kan skrives:

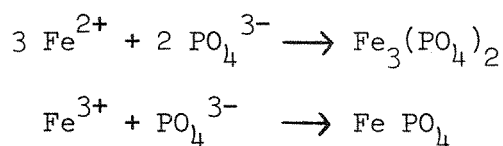
$$\frac{d(\text{Fe}^{2+})}{dt} = k [\text{Fe}^{2+}] \cdot [\text{O}_2] \cdot [\text{OH}^-]^2$$

$k = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ l}^3/\text{mole}/\text{min}^{-1}$  ved 20,5 °C. (Stumm & Lee, 1961.)

Som vi ser er reaksjonen sterkt pH-avhengig. Oksydasjonen tiltar sterkt med stigende pH og skjer nesten umiddelbart ved pH = 8,5.

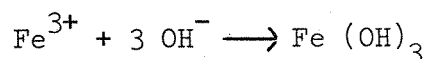
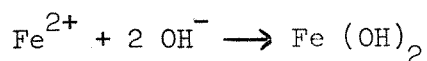
#### 3.2 Jern - fosforreaksjoner i avløpsvann

Fosforinnholdet i kommunalt avløpsvann foreligger hovedsakelig som ortofosfat, pyrofosfat, tripyrofosfat og som organisk bundet fosfor. Løst ortofosfat utgjør ca. 50% og fosfor i sedimenterbar form ca. 15% av den totale mengde. Etter biologisk behandling foreligger praktisk talt all fosfor som ortofosfat. Når jern(II)sulfat tilsettes avløpsvann som inneholder oksygen, må en regne med å ha jern tilstede i både to- og treverdige form. To- og treverdige jern kan danne tungt løselige forbindelser med ortofosfat.



samt forbindelser med komplekse fosfater av varierende løselighet.

Det vil også skje en dannelse av jernhydroksyd:



I komplekse jernhydroksyder kan fosfation være innebygd.

Fellingsreaksjonen kan beskrives med Langmuirs adsorpsjonsisoterm. (Henriksen, 1963.) Ren adsorpsjon av fosfat på jernhydroksyd regnes imidlertid å spille en underordnet rolle.

Langmuirs adsorpsjonsisoterm:  $\frac{C_0 - C}{m} = k C^B$

$C_0$  = totalt innhold løst fosfor inn (mg P/l)

$C$  = totalt innhold løst fosfor etter flokkulering (mg P/l)

$m$  = koagulantdosering (mg Fe/l)

$k$  og  $B$  er konstanter

De kolloidale organiske fosforforbindelsene kan koaguleres effektivt av jernion. Pyro- og tripyrofosfat kan bindes i kompleksform til jernionet eller jernhydroksydet. (Gustafsson & Westberg, 1968.)

Ortofosfat utgjør det meste av den løste fosforen, så utfellingen av ortofosfat vil ha stor betydning for den totale fosforreduksjonen.

### 3.3 Fosforfjerning ved felling med jern(II)sulfat

#### Simultanfelling

Tilsetting av jern(II)sulfat til luftebassenget ved biologisk rensing (simultanfelling), er blitt prøvet en rekke steder. Den beste doseringsmengde og det beste tilsettingssted varierer fra anlegg til anlegg. Ved en tilsats på 15-25 mg  $\text{Fe}^{2+}$ /l har en oppnådd en fjerning av 80-90% totalfosfor. Fosforkonsentrasjonen i effluenten har ligget på 0,3-0,6 mg P/l (Määttä (1971), Leary et al. (1974), Kjeldaas (1972), Haglund och Jacobs (1972), Haglund (1971), Ødegaard (1972), Ødegaard (1973)). Litteraturen viser entydig at jern(II)sulfat er et egnet fellingskjemikalie ved simultanfelling. Simultanfelling vil derfor ikke bli videre diskutert her.

Den fortsatte diskusjon vil basere seg på erfaringer med forfelling, etterfelling og sekundærfelling.

### Forfelling

Dobolyi (1973) har gjort forsøk med tilsetning av jern(II)sulfat i biologisk renseanlegg med forsedimentering. Kjemikaliene ble tilsatt foran forsedimenteringen og prøver ble tatt på ubehandlet avløpsvann og utløpsvann fra biologisk rensing. Forsøkene ble utført ved pH = 8 uten tilsetning av alkalie. Med en initialkonsentrasjon av fosfor på ca. 6 mg P/l, ble det oppnådd 60% reduksjon av total fosfor og 83% av ortofosfat. Om dette virkelig var en forfelling, eller om utfellingen skjedde i det biologiske trinnet er uvisst fordi prøver ikke ble tatt på utløp fra forsedimentering.

Rosendahl (1974) utførte forfellingsforsøk med toverdlig jern på Skarpsno renseanlegg i Oslo. Ved tilsats av kun toverdlig jern skjedde praktisk talt ingen utfelling i forsedimentering, og en hadde i grunnen en simultanfellingsprosess. Ved tilsats av kalk til pH ca. 9,0 ble det oppnådd en fosforfjerning på ca. 50% i forsedimentering. I begge tilfeller ble totalresultat dog forholdsvis godt med total fosforreduksjon på 80-90%.

Liljegren & Haglund (1970) oppgir en total fosforreduksjon på 82% ved forsøk med forfelling. Betingelsene ved forsøket var imidlertid slike at det må betraktes som simultanfelling.

Ved Käppala renseanlegg i Sverige, som er et mekanisk-biologisk-kjemisk anlegg, har en gjort omfattende forsøk med jern(II)sulfatfelling. Jern(II)-sulfat er blitt tilsatt foran forsedimenteringen, men utfellingen oppgis å skje i det biologiske trinnet. Resultatene er like gode som ved etterfelling med aluminiumsulfat (Dahlquist 1974).

I de forfellingsforsøk som er vist til her, har hoveddelen av utfellingen skjedd i det biologiske trinnet, slik at forfellingen egentlig har vært en simultanfelling.

### Etterfelling

Ghassemi & Recht (1971) utførte fellingsforsøk med jern(II)sulfat under oksygenfrie betingelser på fosfatløsninger og biologisk rensset vann. Alt jernet forble derfor i toverdigg form. Ved en jerntilsats i mol-forhold  $Fe/P = 1,0$  ble reduksjonen av ortofosfat og jern som vist i fig. 2.

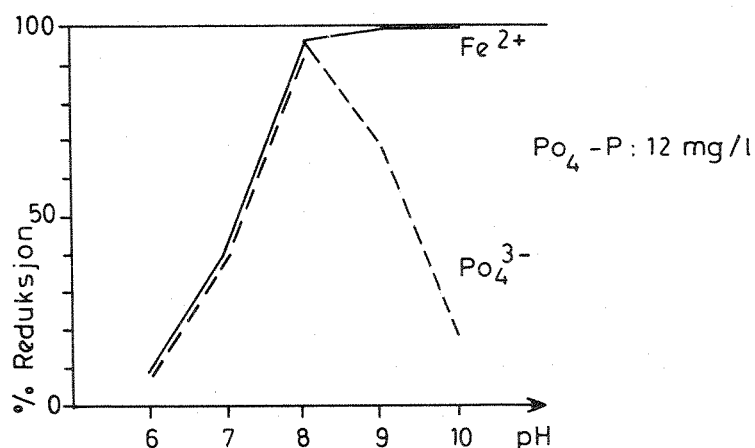


Fig. 2 Felling med jernsulfat uten oksygen tilstede  
Prøvene er tatt etter 5 timers reaksjonstid

Den nødvendige tid for å oppnå maksimal reduksjon var ved pH 8,0 2 timer. Ved pH = 9,0 var den 5 min. Forandring av jerntilsatsen påvirket ikke hastigheten for reaksjonen, men hastigheten ble satt ned hvis ortofosfatinnholdet minket. Ved røntgenkrystallografi av bunnfallet ble det konstatert at dette besto av  $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8 H_2O$ , hvilket viste at det hadde vært en ren kjemisk utfelling.

Forsøkene til Ghassemi og Recht ble utført under ekstreme betingelser, nemlig uten at oksygen fikk være tilstede. Forsøk viser at reaksjonstiden for utfelling av fosfor ved pH = 8,0 gikk drastisk ned når oksygen var tilstede, men den prosentuelle reduksjon ved mol-forholdet 1.0 gikk ned fra 94 til 72%. Ved pH = 7,1 ble jern tilsatt i Fe/P-mol-forholdet 1,5 og man fikk 96% reduksjon av løst ortofosfat etter 15 min. Avskillingen av fnokker var imidlertid selv etter 20 timers sedimentering dårlig.

En liknende effekt rapporteres av Davidson & Ullman (1971) som viser at ved etterfelling reagerer løst ortofosfat raskt i pH-området 7-9.

men for å få sedimenterbare fnokker er en pH-hevning med kalk til minst pH = 8 nødvendig. Med et total fosforinnhold på 6 mg P/l kunne man oppnå 90% reduksjon av tot-P ved pH = 8. Davidson & Ullman viste også at kloroksydert jern(II)sulfat ved pH ca. 7 gir god reduksjon av fosfor. Etter deres mening er foroksydasjon av jern(II)sulfaten med klor et godt alternativ til pH-hevning av avløpsvannet ved kalktilsats. Renseresultatene var i begge tilfeller like gode som ved felling med aluminiumsulfat.

Forsøk med jern(II)sulfat + kalk-tilsats i etterfelling av Balmér og Grini (1974 b) ga meget gode resultater. Totalt fosforinnhold i utløpsvannet var 0,18-0,6 mg P/l og jern(II)sulfat + kalk virket minst like godt som aluminiumsulfat. Jerndoseringen var ca. 35 mg Fe<sup>2+</sup>/l og hydratkalktilsatsen ca. 120 mg/l som ga en fellings-pH på 8,8-9,3.

Liljegren & Haglund (1970) har gjort forsøk med etterfelling med jern(II)sulfat med kalk-tilsats til pH = 9,0. De fikk en total fosforreduksjon på 90%.

### Sekundærfelling

Dobolyi gjorde forsøk i laboratorieskala med varierende jerntilsats. På ubehandlet avløpsvann ble det oppnådd 91% reduksjon av ortofosfat ved tilsetning av 30 mg Fe<sup>2+</sup>/l.

Forsøk med sekundærfelling av jern(II)sulfat utført av Balmér og Grini i Hamar (1974 a) viser at ved en pH-hevning med kalk til pH = 9 fikk man 75-93% reduksjon av total fosfor og en restfosformengde i effluenten på 0,3-1,3 mg P/l. Den tilsatte jernmengde var ca. 45 mg Fe<sup>2+</sup>/l, og kalkmengden var ca. 130 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/l. Det var vanskelig å oppnå stabil drift av jern(II)sulfatfellingen selv ved så høy pH.

### 3.4 Tilsetning av hjelpekoagulant

Rapporterte resultater fra sekundærfelling med jern(II)sulfat og kalk viser at det kan være vanskelig å få en skikkelig flokkulering. For å forbedre flokkuleringen kan man tilsette en polyelektrolytt. Wukasch (1968) rapporterer at ved forfellingforsøk med tilsetning av 15-25 mg Fe<sup>2+</sup>/l, 0,6-1,0 mekv/l alkali og 0,39 mg/l av en anionaktiv polyelektrolytt fikk man en god flokkulering og fjerning av fosfor.

### 3.5. Restjernmengde i effluenten

Det er ønskelig at man ved felling med jern(II)sulfat ikke får for høye konsentrasjoner av jern i effluenten. Hvis man feller ved høy pH og har tilstrekkelig oksygen til stede i vannet, vil toverdig jern oksyderes til treverdig, og vi vil få utfelling av jern(III)hydroksyd. Dobolyi (1973) viste et jerninnhold i effluenten på  $< 0,1$  mg Fe/l etter forfelling + biologisk rensing. Ved sekundærfelling oppnådde Balmér og Grini en gjennomsnitt på 2 mg Fe/l i effluenten, og ved etterfelling 1-2 mg Fe/l. Resultatene viser at restjernmengden vil være lav hvis bare avskillingen av fnokker er god.

#### 4. UNDERSØKELSER

##### 4.1 Faktorer som må undersøkes ved sekundærfelling med jern(II)sulfat

Erfaringer med jern(II)sulfat som fellingsmiddel viser at det egner seg godt ved simultanfelling, og rapporterte resultater viser at det ved etterfelling har virket godt med kalktilsats ved pH = 9.

Mekanisk-kjemisk rensing vil bli benyttet mange steder i Norge i tiden fremover. Tidligere forsøk på Kjeller og i Hamar tyder på at jern(II)sulfat kan egne seg også ved sekundærfelling.

Resultatene fra etterfelling er ikke uten videre overførbare til sekundærfelling da biologisk rensert vann har en annen sammensetning enn forsedimentert vann. Ved den biologiske prosessen vil bl.a. fosforen i stor grad hydrolyseres til ortofosfat og videre vil innholdet av kolloidalt organisk materiale være vesentlig lavere i biologisk rensert vann enn i råkloakk og mekanisk rensert vann.

Ved bruk av jern(II)sulfat i sekundærfelling er det en rekke forhold som må klarlegges:

1. Renseeffekt. Det må undersøkes om felling med jern(II)sulfat kan gi den ønskede reduksjon av fosfor.
2. Doseringsmengde. Den nødvendige tilsats av jern(II)sulfat må bestemmes. Det er også vesentlig å bestemme hvilken pH man må opp i for å få den ønskede rensegrad. En høy fellings-pH betinger en høy kalkdosering. Dette vil være av økonomisk betydning.
3. Hjelpokoagulant. Hvis flokkuleringen må forbedres for å få tilstrekkelig avskilling, kan det være behov for tilsats av polyelektrolytt.
4. Slam. Slamproduksjon og slamegenskaper må undersøkes.

##### 4.2 Forsøksanlegget

Forsøksanlegget besto av en mekanisk forsedimenteringsenhet og tre parallelle kjemiske fellingssteg. Det mekanisk rensede vannet ble tilført de kjemiske stegene i tre like strømmen. De kjemiske stegene besto av



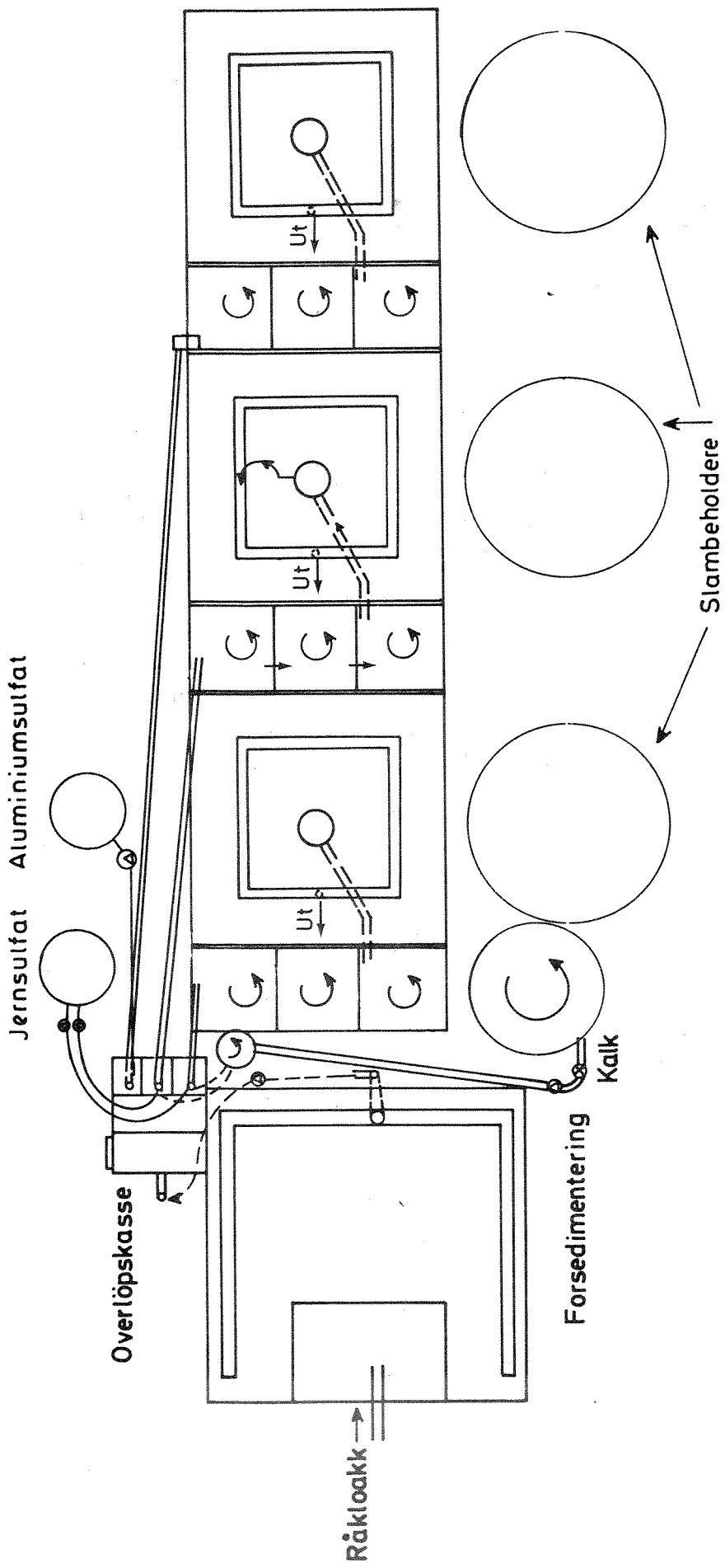


Fig. 3 Oversikt over kjemisk fellingsanlegg m/ forsedimentering

1:50

en tre-kamret flokkuleringstank og et sedimenteringsbasseng. Hvert flokkuleringskammer var utstyrt med en grindomrører med variabel hastighet. Sedimenteringstanken var utformet som en omvendt pyramide med innløp i midten (vertikalstrømmingsbasseng). Se fig. 3.

Tabell 1. Data over forsøksanlegg

		Forsedimentering	Kjemisk flokk.	steg sed.
Effektivt volum	(m <sup>3</sup> )	8,9	1,2	2,0
Overflate	(m <sup>2</sup> )	6,5		3,5
Hydraul. belastning	(m <sup>3</sup> /h)	6,5	1,8	
Oppholdstid	(h)	0,75	0,67	1,1
Overflatebelastning	(m/h)			0,5

#### 4.3 Dosering

Jern(II)sulfat i avrent form (50 kg + 100 l vann) ble løst under omrøring. Jern(II)sulfaten ble dosert i overløpskassen etter forsedimentering med en stempelpumpe.

Hydratkalk i pulverform ble løst (50 kg + 1000 l vann) i en 1500 liters beholder ved omrøring. Forurensninger i form av uløst materiale i kalken forårsaket tilstopping i pumper og ledninger. Flere doseringssystemer ble forsøkt, og det som fungerte best ble benyttet siste del av forsøket. Med en membranpumpe ble kalken da pumpet opp til et kar med hurtigomrøring, hvorfra kalken ble dosert med to membranpumper til overløpskassen på samme sted som jernsulfaten.

#### 4.4 Råkloakk

Råkloakken var en delstrøm av avløpsvann fra Skedsmokorset hvor det bor ca. 4000 mennesker. Det var hovedsakelig husholdningskloakk, men periodevis kunne sigevann fra en søppelfyllplass innvirke på avløpsvannets sammensetning. Dette ga utslag i høyere organisk belastning og alkalitet.

#### 4.5 Prøvetaking

På råvann ble det brukt skjeprøvetaker og på utløpsvannene ble prøvene tatt med peristaltiske pumper. Det ble analysert på døgnprøver. Slam ble tappet daglig. Ved tappingen ble stikkprøver av slammene tatt for hver 50. l og slått sammen til en blandprøve som så ble analysert.

#### 4.6 Analyser

De parametrene som ble analysert i forbindelse med forsøket var alkalitet (Alk), suspendert stoff (SS), kjemisk oksygenforbruk (KOF) på ufiltrert og filtrert prøve, total fosfor (tot-P), ortofosfat ( $PO_4$ -P) på filtrert prøve og jern (Fe) på ufiltrert og filtrert prøve. Enkelte døgn ble analyseprogrammet redusert. Analysene ble utført etter NIVAs analyseforskrifter.

#### 4.7 Forsøkets utførelse

Før forsøk i halvtteknisk målestokk ble det utført forsøk i laboratorieskala. Disse ble utført som konvensjonell jartest (1 min. hurtiginnblanding, 30 min. flokkulering og 10 min. sedimentering). Ved forsøk i halvtteknisk målestokk ble to av de tre parallelle enhetene drevet med jernsulfat + kalk og en med aluminiumsulfat som fellingsmiddel. Enhetene med aluminiumsulfat tjente som referanse for å gi et bilde av hvilke renseresultater som det var mulig å oppnå ved det fellingsmiddel som er det mest vanlige å bruke ved sekundærfelling.

For å finne den beste fellings-pH ble de to jernsulfatenhetene først drevet ved pH 9,0 og pH 7,5 og deretter ved pH 8,0, pH 8,15 og til slutt ved pH 8,0 og 8,6.

Det ble også gjort supplerende forsøk med lav jernsulfatdosering, med polyelektrolytttilsats og med forandring av doseringspunkt.

#### 4.8 Resultater av innledende forsøk i laboratorieskala

De innledende forsøkene er nærmere beskrevet i bilag A og B. Her vil det kun bli gitt en kort omtale av de viktigste resultatene.

### Oksydasjonsforsøk

Oksyderingshastighet for toverdige jern i avløpsvann ble undersøkt ved at jern(II)sulfat og forskjellige mengder kalk ble tilsatt avløpsvannet som var mettet med oksygen. Oksyderingshastigheten ble funnet ved å måle oksygenkonsentrasjonen som funksjon av tid. Resultatene viste at en ved pH 8,5 hadde en langtgående oksydasjon av det toverdige jernet på mindre enn 1 min. Ved pH 7,35 var hastigheten vesentlig lavere; etter 5 min. var kun ca. 75% av tilsatt jern oksydert.

### Nødvendig doseringsmengde, tilsetningspunkt og polyelektrolytttilsats

Den nødvendige jermengden for å få tilstrekkelig ortofosfatutfelling og samtidig god reduksjon av suspendert materiale viste seg ved jartest å være 35-40 mg Fe/l. Ved pH 8,5-9,0 ga jartesten gode resultater for reduksjon av både ortofosfat og suspendert materiale. Ved lavere pH var resultatene dårligere.

Tilsetting av kalk før jern ga bedre resultat enn jern før kalk.

Tre av ni testede polyelektrolytter ga en bedre fnokkoppbygging. Disse var Herco 831. 2A (anionaktiv), Zetag 92 (kationaktiv) og Magna 156 (anionaktiv). Best resultat ble oppnådd med Magna 156. Dosert mengde Magna 156 var 0,1 mg/l.

### 4.9 Resultater fra forsøk i halvteknisk målestokk

Å holde en konstant fellings-pH i forsøksanlegget over flere dager viste seg svært vanskelig. Dette skyldtes både avløpsvannets varierende bufferkapasitet og at kalkdosering var vanskelig å holde konstant. Uløst materiale i kalken forårsaket tilstopping i pumper og ledninger.

Doseringer og resultater fra samtlige forsøksdøgn er vist i tabell 2. Konsentrasjoner i utløpsvann og prosentuell fjerning er angitt for suspendert stoff (SS), kjemisk oksygenforbruk (KOF) på ufiltrert og filtrert prøve, total fosfor (tot-P) og ortofosfat ( $PO_4$ -P) på filtrert prøve. Et sammendrag av forsøksresultatene er stilt sammen med resultater fra tidligere forsøk på Kjeller og resultater fra Balmér og Grinis forsøk i Hamar i tabell 3.



Tabell 3. Sammenfatning av fellingsforsøk med jern(II)sulfat + kalk på Kjeller (73 og 74) og Hamar (73)

Dato	Sted	Alk MEK	Doserings		pH	SS		KOF		Tot-P		PO <sub>4</sub> -P filtret		Merknad om jern(II) + kalkfelling
			Fe <sup>2+</sup> mg/l	Ca(OH) <sub>2</sub> mg/l		mg/l	% fjer- ning	mg/l	% fjer- ning	μg/l	% fjer- ning	μg/l	% fjer- ning	
2803-050473	Kjeller	1,68	31	44	8,21	69	0	69	60	1450	40	173	85	Spesielt dårlige resultater Jevnt godt resultat bedre enn Fe <sup>3+</sup> Spredning i resul- tatene  (Kalk.dos. viser for lavt)
0305-110573	Kjeller	1,96	28	53	8,19	27	71	47	63	550	81	71	95	
1611-231173	Hamar	2,60	43	122	9,2	20	80-90	40-100	60-70	650	85-90	81	99	
2604-020574	Kjeller	4,10	36	43	7,75	119	45	163/67	62/42	3300	47	131	96	
1006-140674	Kjeller	3,10	41	86	8,0	67	65	92/55	64/51	1500	70	61	98	
1305-200574	Kjeller	3,93	36	(66)	8,60	30	77	88/51	62/-	1400	76	110	96	
1106-140674	Kjeller	3,10	42	140	8,60	35	88	83/59	68/48	885	85	135	96	
2604-010574	Kjeller	4,10	41	181	9,05	28	88	85/69	80/41	750	88	200	94	

Noen dager gikk fnokker i overløp på grunn av for stor slamakkumulering i sedimenteringsbassenget. Resultater som antas å være lite representative på grunn av driftsforstyrrelser, og resultater der feil ved analysering er sannsynlig, er angitt i parentes i tabellene.

Utløpskonsentrasjon og prosentuell fjerning av total fosfor er i fig. 4 og 5 plottet mot pH. I fig. 6 og 7 er kjemisk oksygenforbruk og prosentuell fjerning av KOF angitt mot pH. I fig. 8 og 9 er utløpskonsentrasjonen av suspendert stoff og ortofosfat plottet mot pH. Restjernkonsentrasjon mot pH på filtrert og ufiltrert prøve er angitt i fig. 10. Total fosfor og restjernmengde er plottet mot suspendert stoff i fig. 11 a og b. Kalkforbruket mot pH er angitt i fig. 12. I fig. 12 er det kun benyttet resultater fra de fem siste prøvedøgn da kalkdoseringen med sikkerhet gikk jevnt. I fig. 4, 5, 6, 7, 8, 9 og 10 er det også innlagt resultater fra tidligere forsøk på Kjeller og på Hamar. Disse erfaringer er benyttet i diskusjonsavsnittet.

Slamproduksjonen angitt i kg/d er innlagt mot pH i fig. 13. I denne figuren er det også tatt med data fra tidligere forsøk på Kjeller i 1973. Vannføringen ved forsøkene har vært  $43 \text{ m}^3/\text{d}$ .

En sammenlikning av konsentrasjonen av total fosfor i utløpsvannet ved jern(II)sulfat + kalkfelling og aluminiumsulfatfelling er gjort i fig. 14.

Resultatene fra fortykkingsforsøkene er samlet i bilag C.

#### 4.10 Diskusjon av resultater

Fjerning av total fosfor viste stor variasjon, men det var en klar tendens til forbedret fjerning av total fosfor med stigende pH. I pH-området 8,5-9,0 er fosforkonsentrasjonen i utløpsvannet 0,1-1,5 mg P/l. Fra fig. 4 ser vi at fosforkonsentrasjonen i middel er 0,5 mg/l. Ved felling med jern(II)-sulfat var utfellingen av ortofosfat effektiv i hele pH-området 7,5-9,0 med fosfatkonsentrasjoner i utløpsvannet på 50-300  $\mu\text{g P/l}$ . Det er en tendens til noe lavere fosfatfosfor i utløpsvannet i den lavere del av pH-området (fig. 9). De ovennevnte forhold peker tydelig på at fosfor i utløpsvannet

hovedsakelig foreligger i partikulær form og at det derfor er fnokkavskillingen som er begrensende for hvilken rensegrad som kan oppnås. Dette forhold illustreres tydelig i fig. 11 a, der en ser at det er et meget klart samband mellom total fosfor og suspendert stoff i utløpsvannet. Resultatene tyder på at oksydering av toverdige jern til treverdige og etterfølgende utfelling av jern(III)hydroksyd nærmest var kvantitativ ved forsøkene fordi jerninnholdet i filtrert prøve (fig. 10) hele tiden var  $< 0,1 \text{ mg Fe/l}$ .

Avskilling av utfelt jern var imidlertid mindre tilfredsstillende. Det synes (fig. 10) f.eks. som om en må opp i pH-verdier på 9,0 eller over, for med sikkerhet å få jerninnholdet i effluenten under  $5 \text{ mg Fe/l}$ . Fig. 11 b viser at det er en klar relasjon mellom totalt jerninnhold og suspendert stoff i utløpsvannet.

Ved felling med jern(II)sulfat av urensset og mekanisk rensset avløpsvann er avskillingen av suspendert materiale den mest betydningsfulle faktoren. Fjerningen av suspendert materiale viste en klar bedring ved stigende pH. Dette er vist i fig. 8. For å undersøke om avskillingen kunne forbedres, ble det gjort et forsøk med tilsats av polyelektrolytt (Magnafloc 156).

Forsøkene med polyelektrolytt gikk kun i 2 døgn. Konsentrasjonen av suspendert stoff i utløpsvannet ble  $14 \text{ mg/l}$  ved tilsats av polyelektrolytt mot  $33 \text{ mg/l}$  uten tilsats ved pH 9. Visuelt sett ble også resultatet bedre da vannet ble helt klart i motsetning til blakket vann uten polyelektrolytttilsats. Den bedre effekten må også regnes å ha bedre fjerning av total fosfor og jern. Forsøkene ved polyelektrolytttilsats var altfor kortvarige til at en kan dra noen sikre konklusjoner, men det synes som en her kan ha muligheter til å forbedre jern(II)sulfatfellingen.

Fjerningen av organisk materiale målt som KOF var gjennomgående god. Ved  $\text{pH} > 8,5$  ble 50-80% fjernet, og da lå restkonsentrasjonen på 70-90 mg KOF/l.

Den nødvendige doseringsmengden av jern(II)sulfat ble funnet å være  $35-40 \text{ mg Fe}^{2+}/\text{l}$  ved jartest (bilag 2). Forsøk med lavere jern dosering virket dårlig (tabell 1 24-2604). Det samme ble funnet ved forsøkene i Hamar (Balmér og Grini 1974 a). Det er mulig at man kan komme noe ned i doseringsmengde ved primær- og sekundærfelling av avløpsvann.



Kalkforbruket som funksjon av pH ved en jerntilsetning på 35-40 mg  $\text{Fe}^{2+}$ /l og alkalitet på mekanisk vann på 3,10 mekv./l er vist i fig. 12. Liknende resultater ble funnet ved jartest. Kalkforbruket var høyere enn hva man teoretisk kan beregne ut fra jerntilsats og bufferkapasitet. Forsøk for å finne beste tilsetningspunkt for fellingskjemikalie viser at det ikke er gunstigere å tilsette jern før kalk som hevdet av noen forfattere.

Sammenliknes felling med jern(II)sulfat og aluminiumsulfat viser forsøkene på Kjeller at aluminiumsulfat jevnt over hadde bedre effekt. Begge kjemikalie gir en høy fjerning av løst fosfor, men det er tydelig bedre fnokkoppbygging og avskilling med aluminiumsulfat, og dette gir bedre fjerning av fosfor totalt. Dette er vist i fig. 14.

Det er stor spredning i resultatene for fosfor i utløpsvann ved felling med jern(II)sulfat. Det er gjort forsøk å korrelere resultatene mot andre målte parametre enn pH, som f.eks. innhold av fosfor og organisk stoff i innløpsvann. Alkalitet er eneste parameter som vi ved forsøkene har funnet kunne ha noen korrelasjon til restkonsentrasjonen av total fosfor. Resultatene fra tidligere forsøk på Kjeller og i Hamar tyder imidlertid på noen sammenheng mellom alkalitet og restkonsentrasjon av fosfor.

Slamproduksjon ved felling med jern(II)sulfat er avhengig av kalktilsatsen. Da det var vanskelig å holde jevn kalkdosering over en stor del av forsøksperioden, er den daglige slamproduksjon ikke plottet mot mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /l tilsatt, men mot fellings-pH som er gitt av kalktilsatsen. (Se fig. 10.)

Tappet slammengde var stort sett konstant 0,8-1,0  $\text{m}^3$ /d. Til tross for en stor spredning er tendensen til økt slammengde ved stigende pH klar. Ved pH = 8,5 var slamproduksjonen ca. 200 g TS/ $\text{m}^3$  avløpsvann. Ved aluminiumfelling lå midlere slamproduksjon på 115 g TS/ $\text{m}^3$  avløpsvann. Dette er lavere enn hva som er funnet ved tidligere forsøk på Kjeller og på Hamar.

Fortykkings- og filtreringsegenskaper for slam fra felling med jern(II)sulfat + kalk er bedre enn for slam fra felling med aluminiumsulfat. Med en initialkonsentrasjon på 0,1-3,0% TS i jernfellt slam, oppnådde man etter 24 timers fortykning 1,5-4,5% TS som middelkonsentrasjon i slammet.

Filtreringsegenskapene ble undersøkt ved måling av CST/% TS. Data for slam fra felling med jern(II)sulfat + kalk er vist i bilag C. Fortykkings- og filtreringsegenskaper for andre slamtyper ved sekundærfelling er rapportert av Frederiksen (1974).

#### 4.11 Kostnader

For de fellingsmidler som har vært benyttet under forsøkene, ble det innhentet priser pr. sept. 1974. Prisen er beregnet levert fra verk/leverandør og det vil si at transportkostnader kommer i tillegg.

Tabell 4. Pris på fellingsmidler pr. sept. 1974

Fellingsmiddel	Pris
Jern(II)sulfat (monohydrat)	180 kr/tonn
Jern(II)sulfat (avrent vare)	100 kr/tonn
Hydratkalk	220 kr/tonn
Aluminiumsulfat	380 kr/tonn
Polyelektrolytt	25 kr/kg

Med utgangspunkt i de doseringsmengder som er funnet nødvendige ved forsøkene, kan kostnader for felling med jern(II)sulfat + kalk beregnes:

Tabell 5. Kostnader for fellingsmidler

Fellingsmiddel	Dosering g/m <sup>3</sup>	Pris <sup>x</sup> øre/m <sup>3</sup> avløpsvann
Jernsulfat (mono) + kalk (pH 8,5)	120+120	4,80
Jernsulfat (mono) + kalk (pH 9,0)	120+170	5,90
Jernsulfat (mono) + kalk (pH 9,0) + elektrolytt	120+170+0,3	6,65
Aluminiumsulfat	180	6,85

<sup>x</sup> Transportkostnader ikke inkludert.

De jerndoseringer som ble funnet nødvendige å bruke ved forsøkene er høye hvis en ser dem i relasjon til fosforinnholdet.

De nødvendige kalkdoseringene er større enn hva som teoretisk kan beregnes ut fra vannets alkalitet og innhold av andre "alkaliekonsumerende" komponenter. Det kan finnes muligheter til besparelser ved bedre utnyttelse av kjemikalierne, i første rekke kalken. I hvilken utstrekning dette er mulig kan ikke forutsies med den kjennskap vi i dag har til felling med jern(II)sulfat + kalk.

Tilsetning av to kjemikalier som er nødvendig ved jern(II)sulfat + kalkfelling vil medføre noe ekstra kostnader for kjemikaliehåndtering. Vurdert sammen med andre forhold vil dette bety at sekundær- og primærfelling med jern(II)sulfat + kalk i første rekke vil bli aktuelt ved store renseanlegg der en besparelse i kjemikaliekostnader har vesentlig betydning for total-kostnadene.

Kostnadsaspektene for slamsiden er kompliserte. Ved jern(II)sulfat + kalkfelling får en større slammengde målt som tørrstoff, men på den andre siden har slammet fra felling med jern(II)sulfat bedre fortykkings- og avvanningsegenskaper enn slam fra felling med aluminiumsulfat.

mgP/l

Fig.4 Totalfosfor  $\nu$  pH

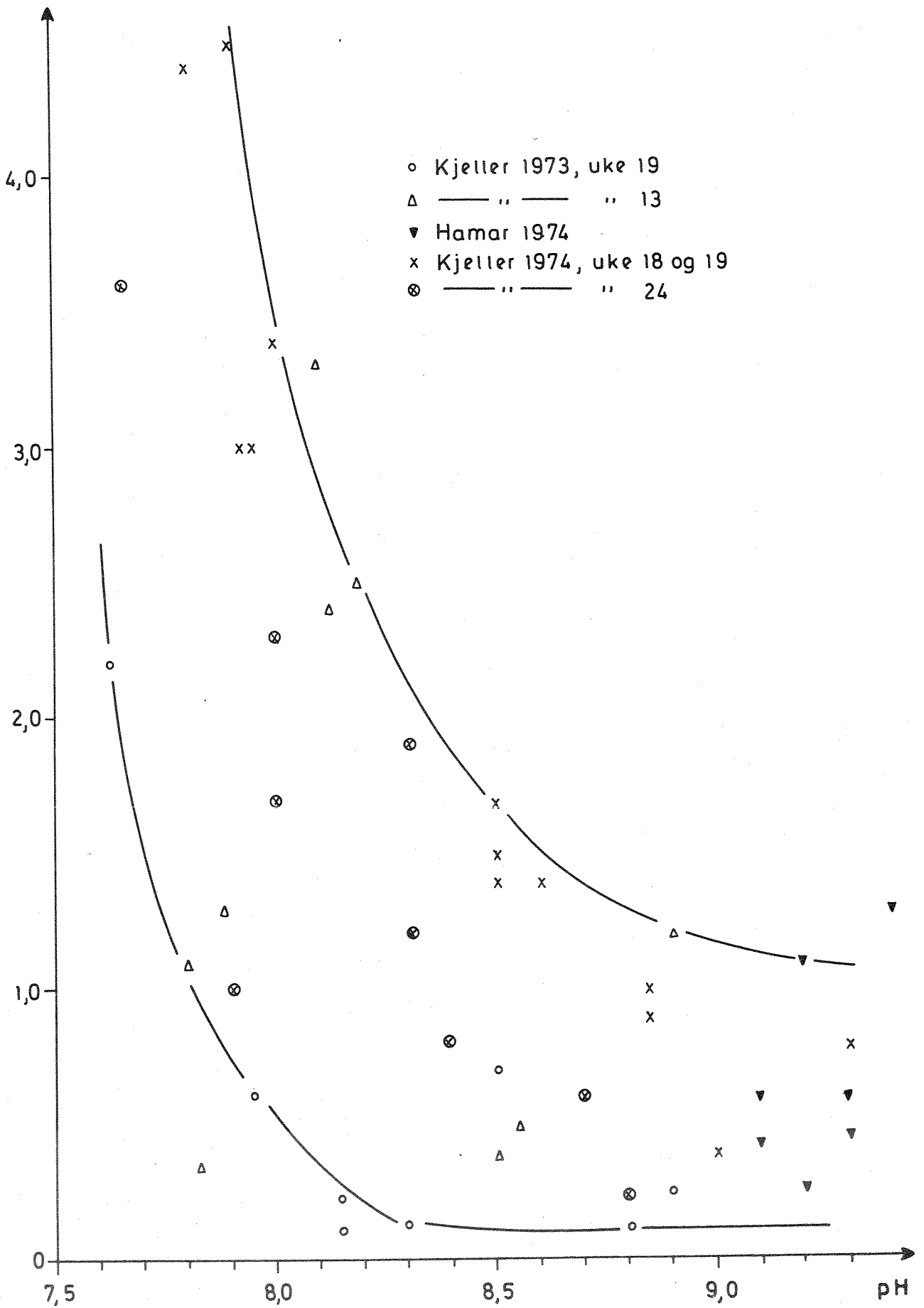




Fig. 6 Kjemisk oksygenforbruk  $\approx$  pH

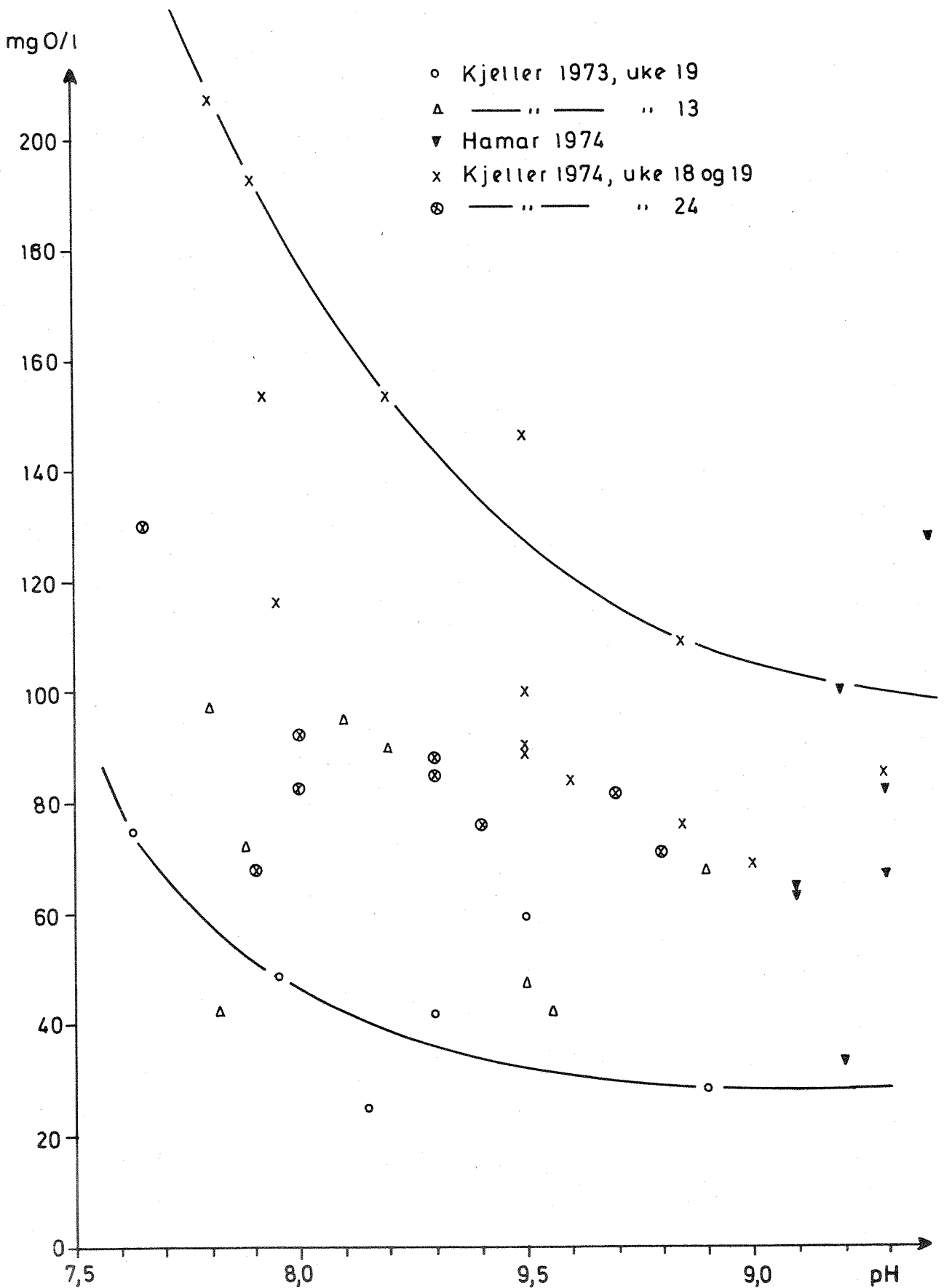


Fig. 7 Prosentuell fjerning av KOF  $\approx$  pH

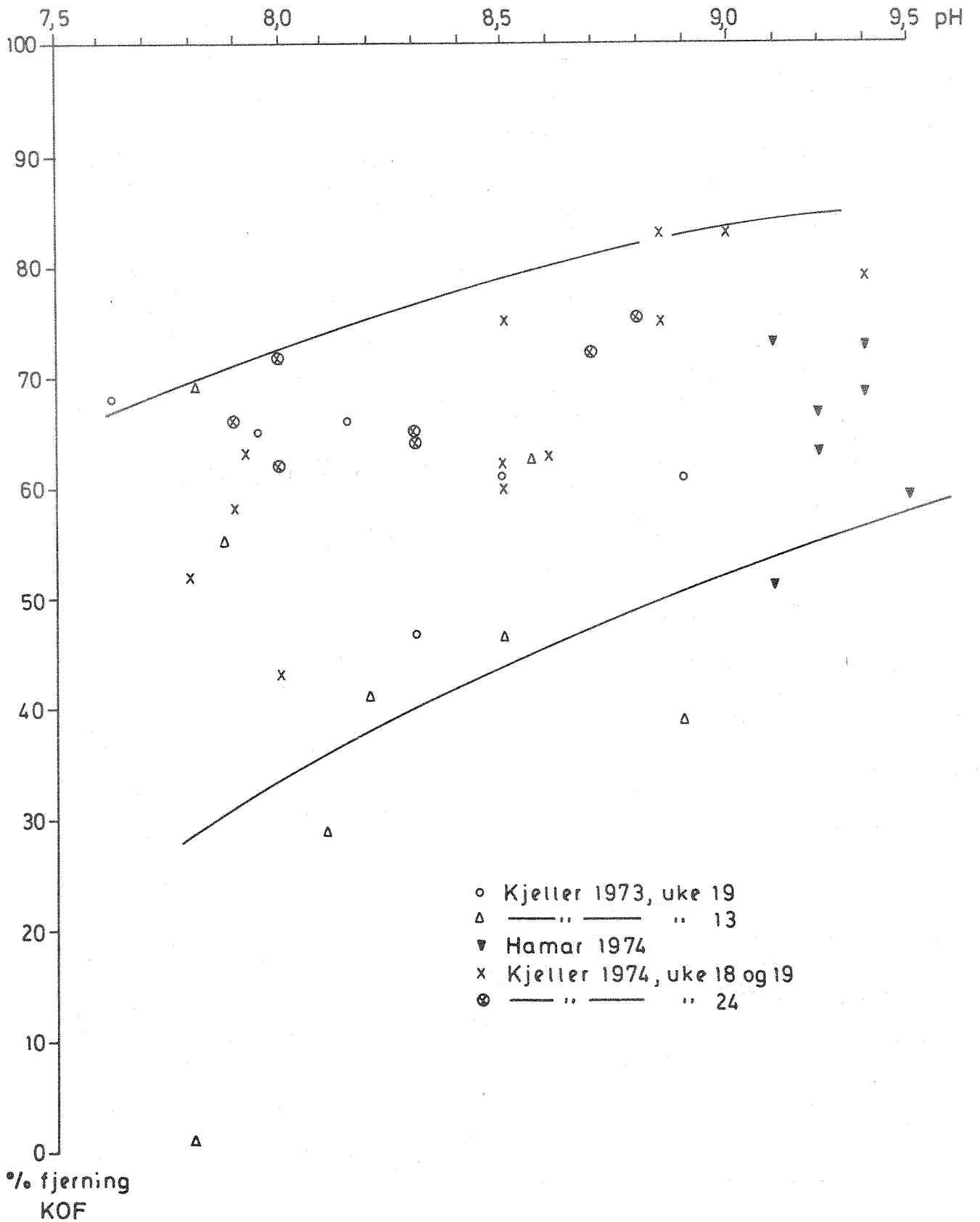


Fig. 8 Suspended matter vs pH

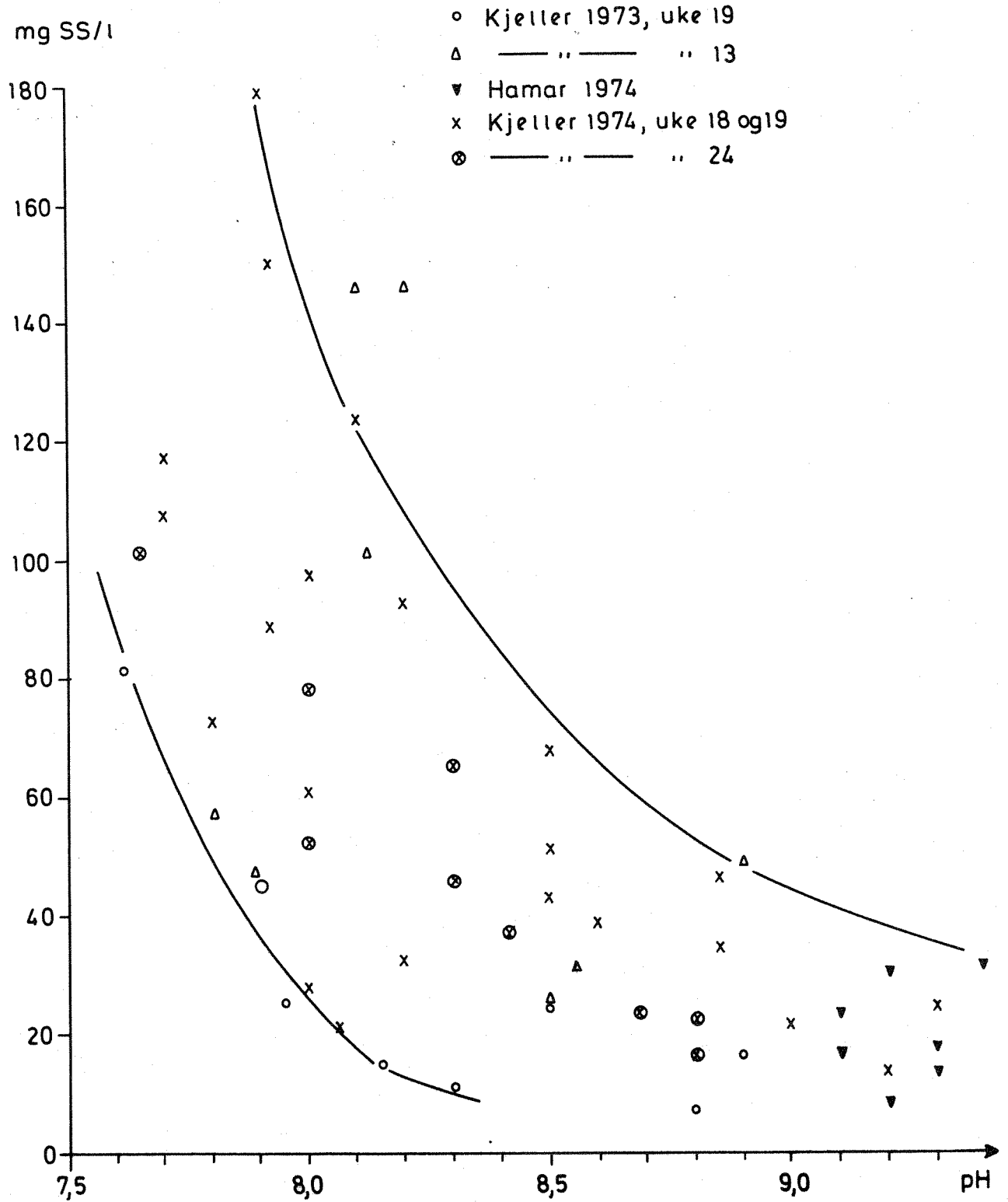




Fig. 9 Ortofosfat (filtrert prøve) og pH

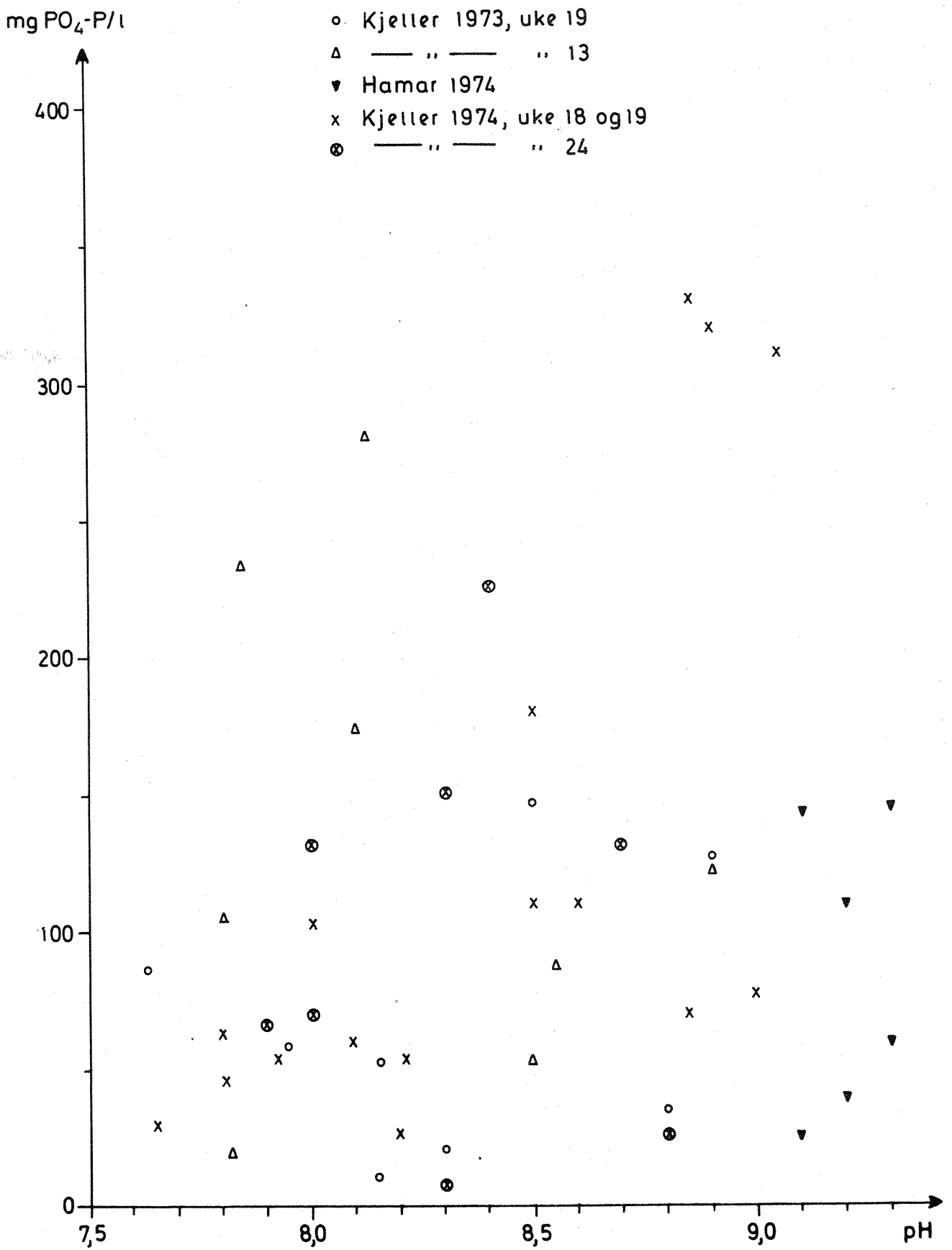


Fig.10 Restjernkonsentrasjon  $\approx$  pH

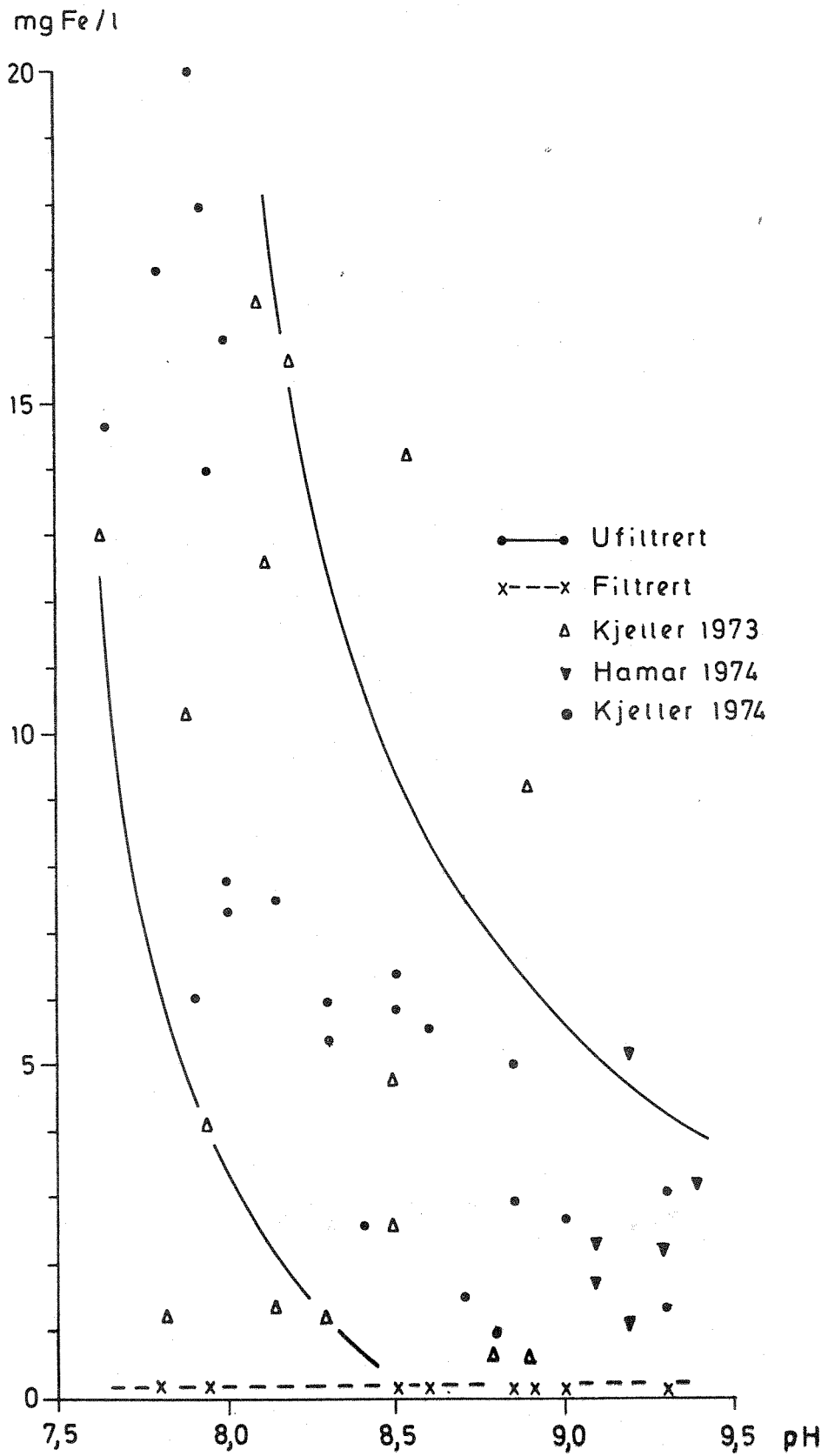
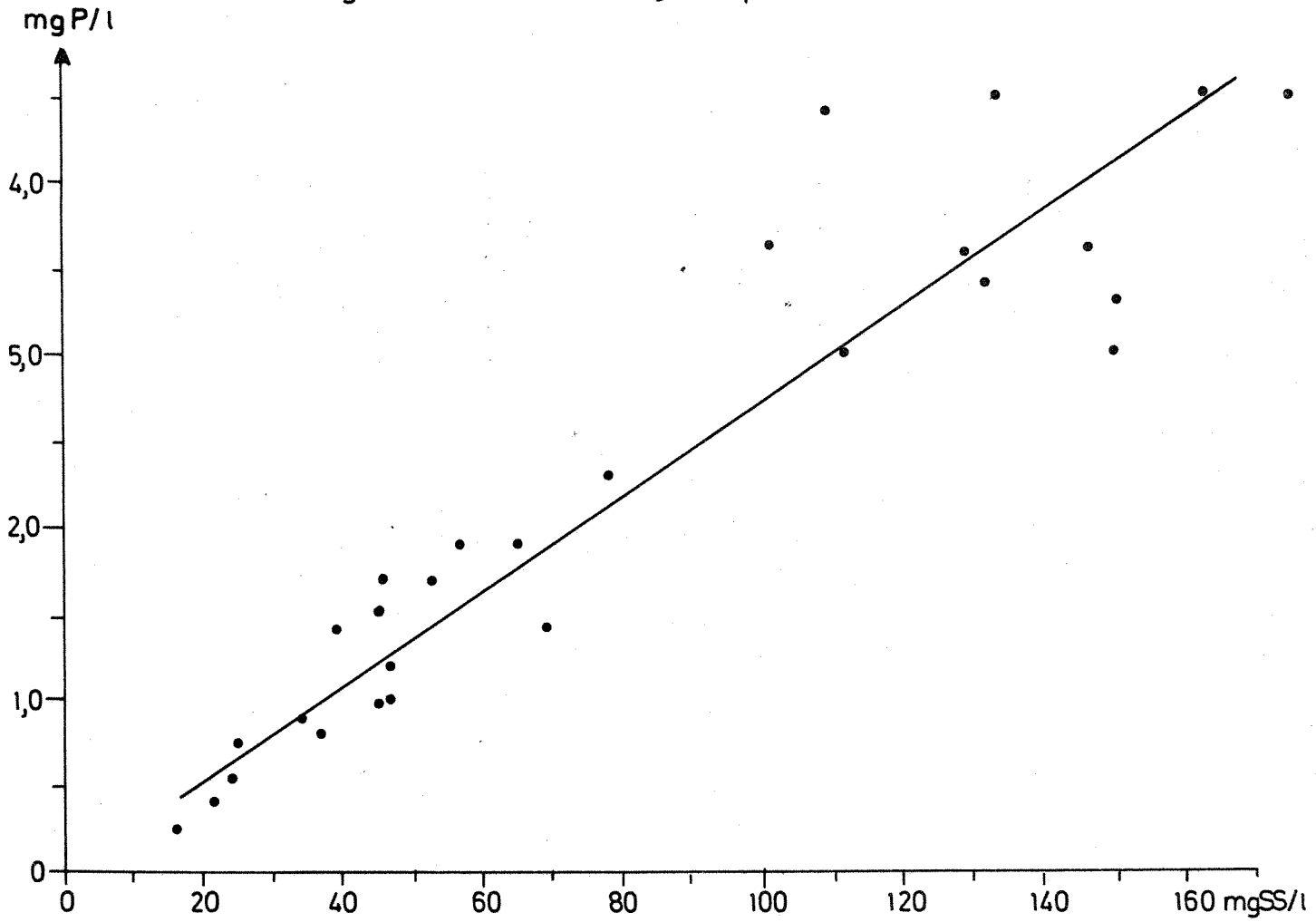


Fig.II a Total fosfor  $\varnothing$  suspendert stoff



mg Fe/l

Fig.II b Restjern  $\varnothing$  suspendert stoff

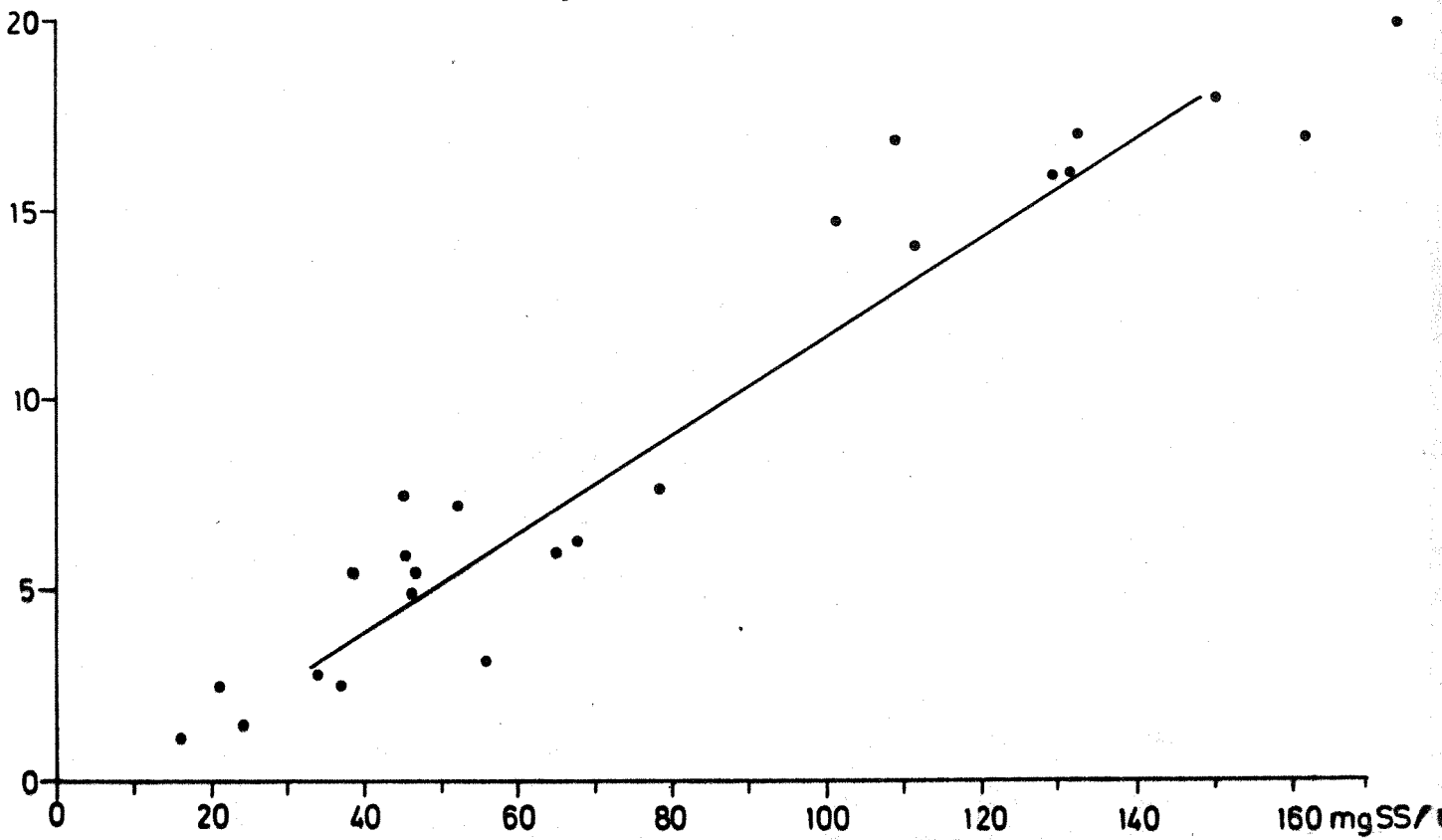


Fig. 12 Kalkforbruk og pH

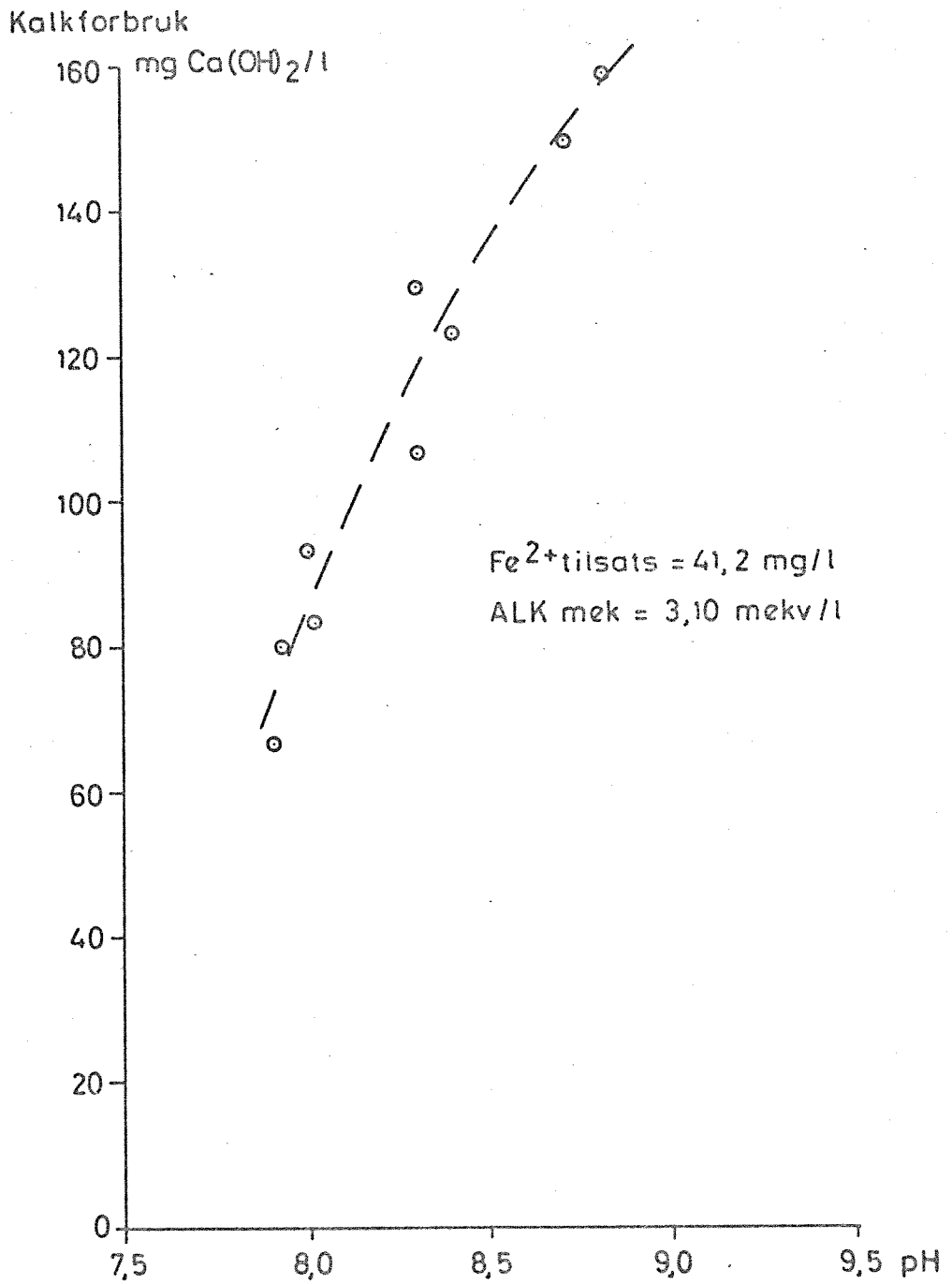


Fig. 13 pH z slamproduksjon (kg/d)

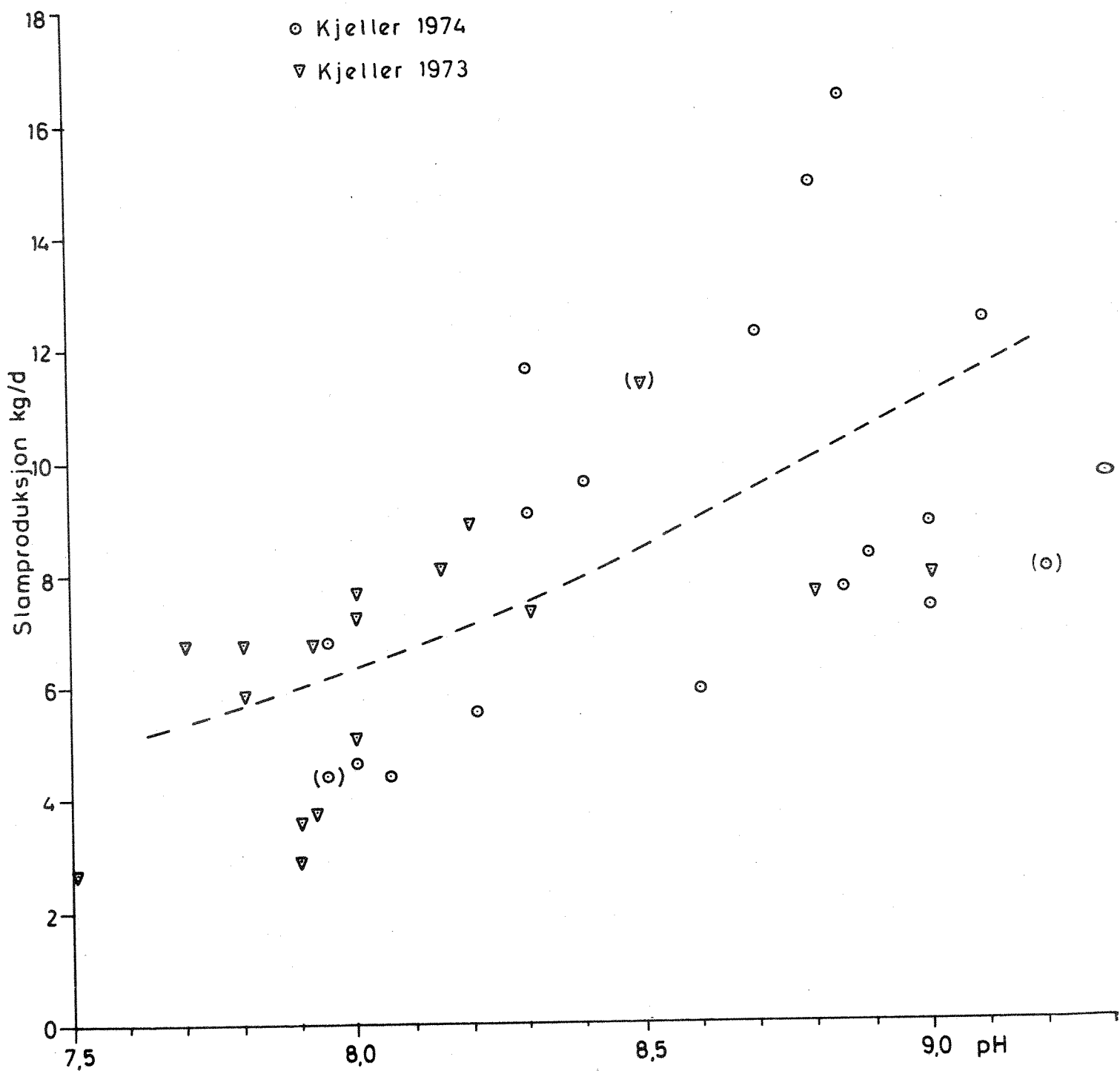
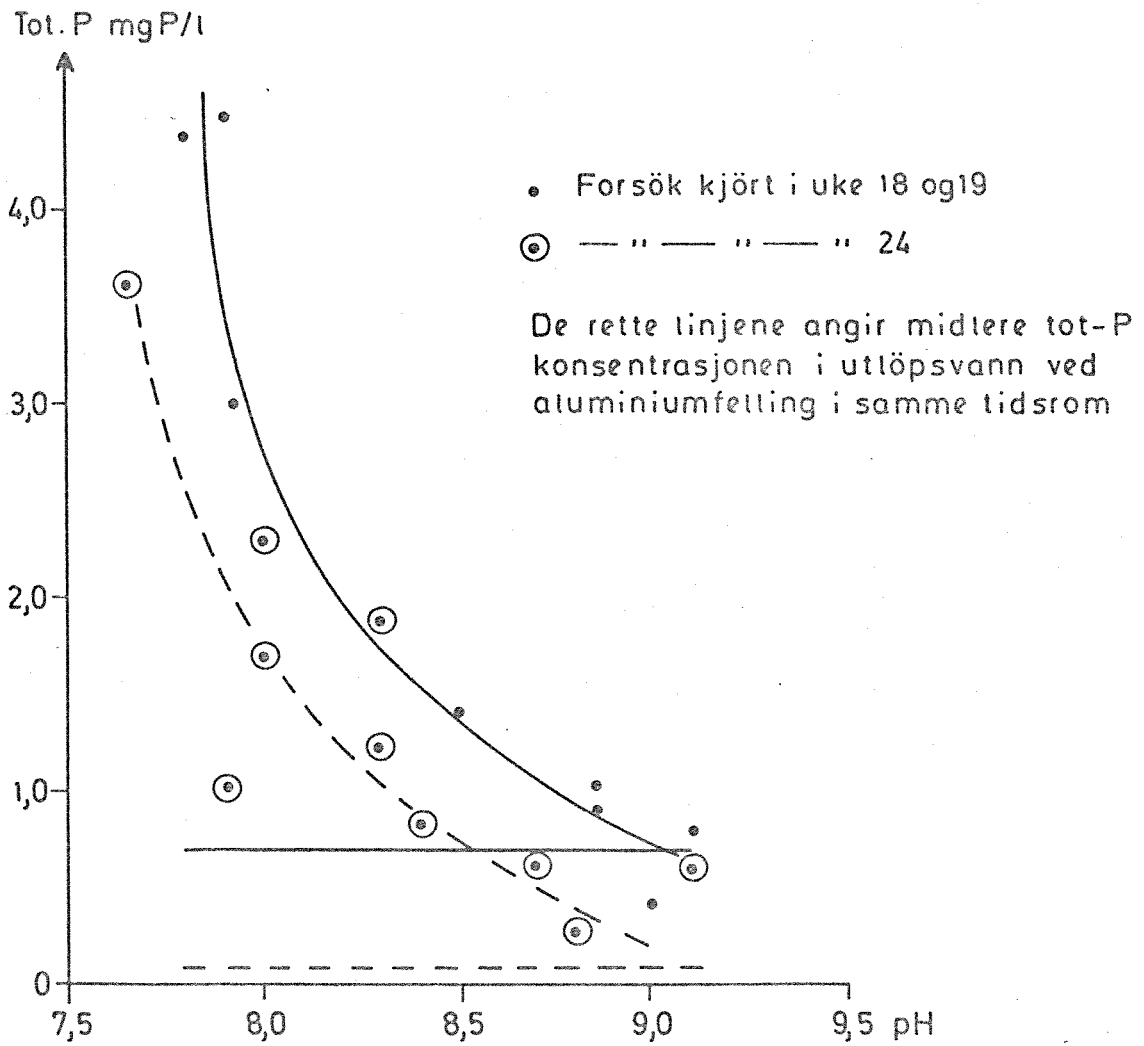


Fig.14 Totalfosfor  $\nu$  pH for jern(II)sulfatfelling



## 5. SAMLET VURDERING

Jern(II)sulfat er et egnet fellingsmiddel ved simultanfelling. Forfelling med jern(II)sulfat er vist å virke tilfredsstillende både uten og med kalktilsats. Litteraturdata peker på at en egentlig har simultanfelling når jern(II)sulfat brukes som fellingsmiddel ved forfelling. Etterfelling med jern(II)sulfat er lite studert, men publisert materiale tyder på at man ved pH-justering med kalk til pH 8,5-9,0 kan oppnå tilfredsstillende resultater.

Ved sekundærfelling som er undersøkt her, viser det seg at man kan oppnå gode resultater med jern(II)sulfat + kalk ved pH 8,5-9,0. Det er vist klart at rensegraden øker med økende fellings-pH. Det er stor spredning i renseresultat ved samme pH. Denne spredningen kan ikke tilfredsstillende forklares, og dette indikerer at det er faktorer som innvirker på fellingen som vi i dag ikke kjenner til.

Parallellkjøring viste at felling med jern(II)sulfat + kalk ga mere ujevne og i gjennomsnitt noe dårligere resultater enn felling med aluminiumsulfat, også om en av og til kunne få like gode resultater som ved felling med aluminiumsulfat. De samlede erfaringer med jern(II)sulfat + kalk som fellingsmiddel ved sekundærfelling er fortsatt få, og det fins muligheter til å få jevnere og bedre resultater; ved f.eks. bruk av polyelektrolytt for å bedre avskillingen av fnokker.

Ved større primær- og sekundærfellingsanlegg der kjemikaliekostnadene har stor betydning, har jern(II)sulfat + kalk et potensial som fellingsmiddel.

OFF/UHI

4.11.1974

LITTERATURLISTE

- Askim, T. og Holmefjord E. (1973): "En teoretisk og eksperimentell undersøkelse av biosorpsjonsprosessen med og uten kjemisk felling". Hovedoppgave i vannforsyning og avløp, NTH.
- Balmér P. og Grini O.M. (1974 a): "Interkommunalt renseanlegg i Hamar. Forsøk i halvteknisk målestokk - Delrapport nr. 1. Forsøk med mekanisk-kjemisk rensing." NIVA-rapport O-203/72.
- Balmér P. og Grini O.M. (1974 b): "Interkommunalt renseanlegg i Hamar. Forsøk i halvteknisk målestokk - Delrapport nr. 2. Forsøk med biologisk-kjemisk rensing." NIVA-rapport O-203/72.
- Dahlquist K.I. (1974): Foredrag VAV-dagen 5. nov.
- Davidsson G. och Ullman P. (1971): "Förbrukade betsyror som fällningsmedel vid kommunal avloppsrening". Vatten 1, 95-106.
- Dobolyi E. (1973): "Efficient biological waste-water purification is a precondition for chemical phosphate removal". Water Research 7, 329-342.
- Dobolyi E. (1973): "Plant-scale phosphate removal experiments at the Balatonfüred sewage treatment plant". Water Research 7, 1767-1780.
- Frederiksen O.F. (1974): "Fortykking av kjemisk feltt slam". Prosjekt for rensing av avløpsvann 2.1.R. NIVA-rapport O-40/71-R.
- Gustafsson B. och Westberg N. (1968): "Reduktion av växtnäringsämnen i kommunalt avloppsvatten" SNV, rapport V3.
- Haglund P. och Liljegren R. (1970): "Kjemisk fällning av kommunalt avloppsvatten med ferrosulfat och kalk. Fullskalaforsøk vid Orsa avloppsreningsverk". Stensil 29. juni.
- Hedberg T. och Hansus J. (1971): "Efterfällning av avloppsvatten i pilotplant anleggning. En jämförelse av några olika fällingskemikalier". Publikasjonsserie C:3. Chalmers Teknische Högskole.



- Henriksen A. (1962): "Laboratory studies on the removal of phosphates from sewage by the coagulation process" (part 1). Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie 24, 253-271.
- Henriksen A. (1963): "Laboratory studies on the removal of phosphates from sewage by the coagulation process (part 2). Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie 25, 379-396.
- Kristiansen H. (1974): "Toverdig jern for rensing av kommunalt avløpsvann". NIVA-rapport 0-114/73.
- Leary R.D. et al. (1974): "Phosphorous removal using waste pickle liquor". Journal Water Pollution Control Federation, 46, 284-300.
- Norsk Kalkforening (1973): "Kalk til miljøforberedende formål, Behandling av Drikkevann, Avløpsvann, Industriell prosessoppløsninger og pH-regulering av fiskevann"
- Oinonen S. (1971): "Fosforreduktion vid kemisk rening". Sjätte nordiska symposiet om vattenforskning. NORDFORSK Publikation 5, 79-90.
- O'Melia C.R. (1969): "A Review of the coagulation process". Public Works, May, 87-98.
- Rosendahl A. (1974): "PRA 2.2 - Kjemisk felling i eksisterende kloakkrenseanlegg - Skarpsno". NIVA-rapport 0-36/71 (under arbeid).
- Singer P.C. and Stumm W. (1969): "Oxygenation of Ferrous Iron". Water Pollution Control Research Series DAST - 28. U.S. Dept. of the Interior, Federal Water Quality Administration.
- Stumm W. & Lee G.F. (1961): "Oxygenation of Ferrous Iron". Industrial and Engineering Chemistry, 53, 143-146.
- Stumm, W. & O'Melia C.R. (1968): "Stoichiometry of Coagulation" Journal American Water Works Association, May, 514-539.

Wukasch R.F. (1968): "The DOW process for phosphorous removal". Federal Water Pollution Control Administration (EPA). Phosphorous Removal Symposium, Chicago, June.

ooo O ooo

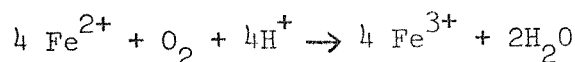
BILAG A

OKSYDASJONSFORSØK

## OKSYDASJONSFORSØK

### Teori

Toverdig jern oksyderes til treverdig ved forbruk av oksygen etter følgende likning:



Hastighetslikningen for reaksjonen er:

$$-\frac{d \text{Fe}^{2+}}{dt} = k [\text{Fe}^{2+}] \cdot [\text{O}_2] \cdot [\text{OH}^-]^2$$

$k = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ l}^3/\text{mole}^{-3}/\text{min}^{-1}$  ved  $20,5^\circ \text{C}$  i vann. Halveringstiden for reaksjonen er 1,9 minutter ved  $\text{pH} = 7,5$  og et oksygeninnhold = 2,0 mg O/l.

### Utførelse

En flaske ble helt fylt med avløpsvann mettet med oksygen. Oksygeninnholdet og pH ble målt. Jernløsningen og slurry ble raskt tilsatt. Flasken ble lukket med en gummipropp. I gummiproppen var en oksygenelektrode innsatt. Elektroden var forsynt med omrører-anordning. Oksygeninnholdet ble målt som funksjon av tid. Temperatur ble holdt konstant under reaksjonen ved hjelp av vannbad.

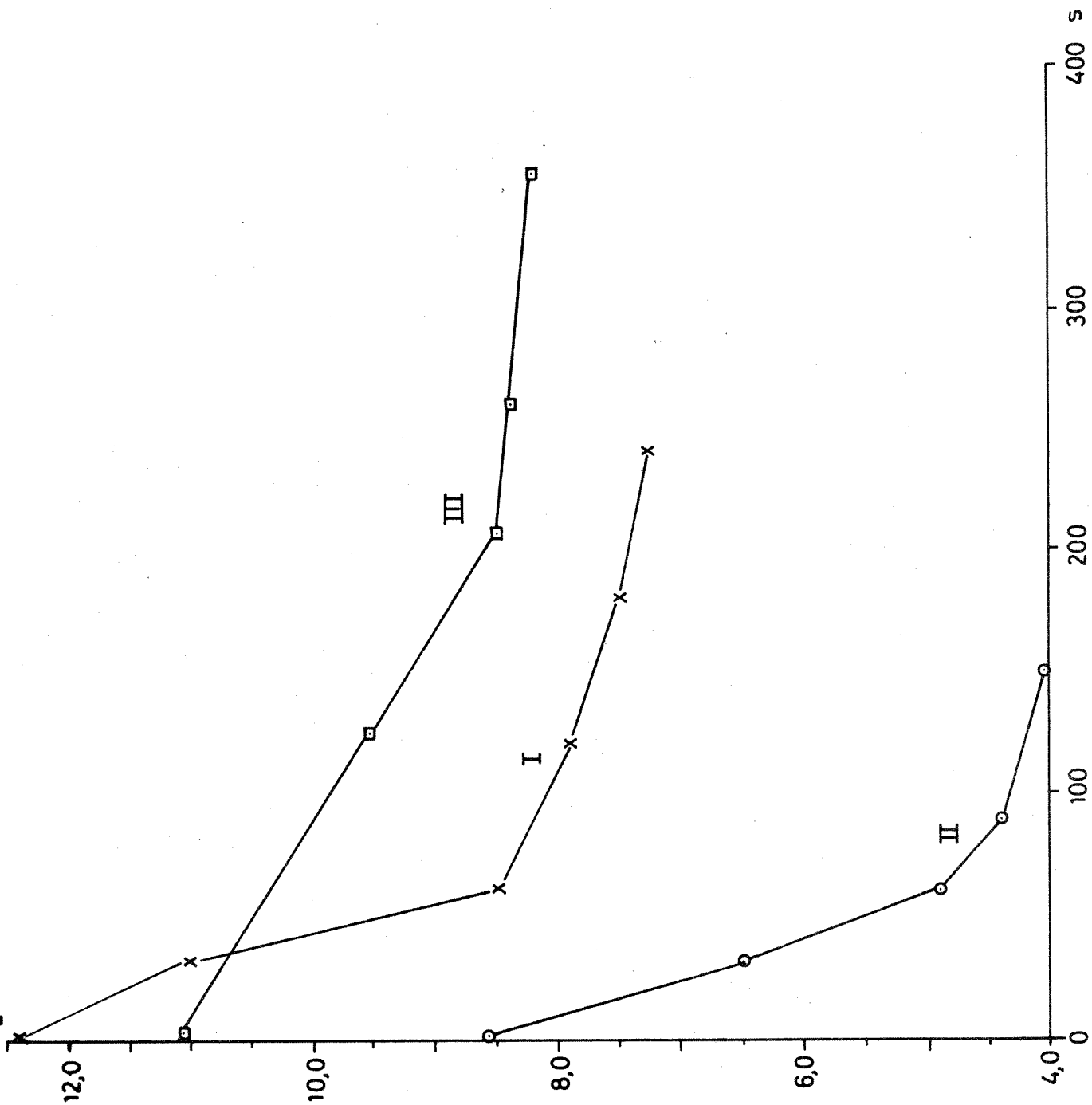
### Resultater

Det mekanisk rensede avløpsvannet i pilotanlegget på Kjeller var som ventet gjennomgående mettet med oksygen. Dette skyldes lufting i råkloakkmagasinet.

Temperaturen i forsøksperioden lå på  $6-8^\circ \text{C}$ .

Forsøk I Utført 220474 på mekanisk rensed avløpsvann. pH på mekanisk rensed vann var 7,90. Etter tilsats av 27 mg  $\text{Fe}^{2+}$ /l og 350 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /l ble  $\text{pH} = 9,0$ . Slutt-pH etter fullstendig oksydering var 8,70. Oksydasjonsforløpet er vist i fig. A1.

Fig. A1 Oksydasjon av toverdug jern Oksygeninnholdet er angitt mot tid



Forsøk II Utført 220474 på rent vann mettet med CaCO. Start-pH var 27 mg Fe<sup>2+</sup>/l og 350 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/l ble tilsatt. Slutt-pH = 9,1 etter fullstendig oksydering. Oksydasjonsforløpet er vist i fig. A1.

Forsøk III Utført 190474 på mekanisk rensset avløpsvann. pH<sub>mek</sub> = 7,78. Ved tilsats av 27 mg Fe<sup>2+</sup>/l og 30 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/l er pH = 7,35. Slutt-pH = 7,55 etter avbrutt forsøk. Oksydasjonsforløpet er vist i fig. A1.

BILAG B

INNLEDENDE FORSØK: NØDVENDIG DOSERINGSMENGDE,  
TILSETTINGSPUNKT, POLYELEKTROLYTTILSATS





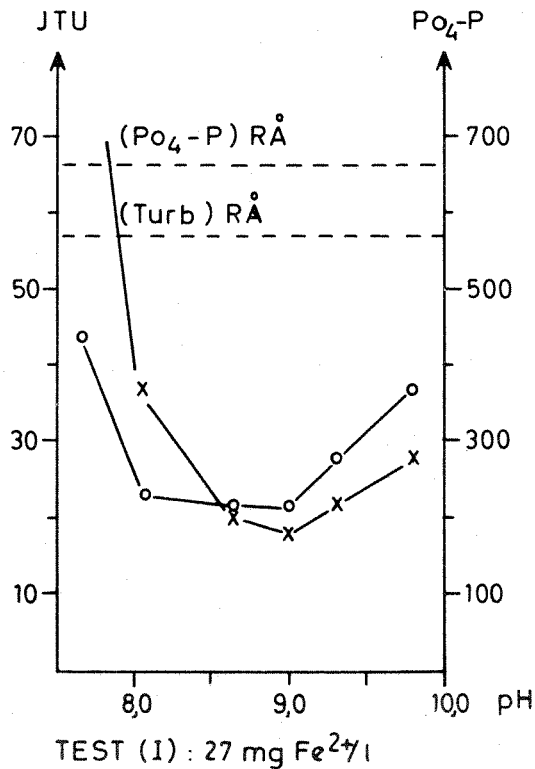
Forsøk I. Jartest med konstant jern dosering og variabel pH.

Utført 220474 på mekanisk rensert vann med pH = 7,92, alkalitet = 4,64 mekv/l og SS = 143 mg/l.

Tabell B1 Konstant jern dosering (27 mg Fe<sup>2+</sup>/l) og varierende pH

Tilsatt jernsulfat i mg Fe <sup>2+</sup> /l	-	27	27	27	27	27	27
Tilsatt hydrat kalk i mg Ca(OH) <sub>2</sub>	-	10	80	120	167	300	460
Slutt-pH		7,30	8,10	8,65	9,00	9,30	9,80
PO <sub>4</sub> -P filtrert µg/l	667	437	230	207	207	276	368
Turbiditet i JTU	57	98	37	20	18	22	28

God fnokkoppbygging innen 5 min. Klar tendens til utfelling ved 15 rpm ved pH = 9,3 og 9,8. Ved pH = 7,3 ingen skikkelig utfelling.



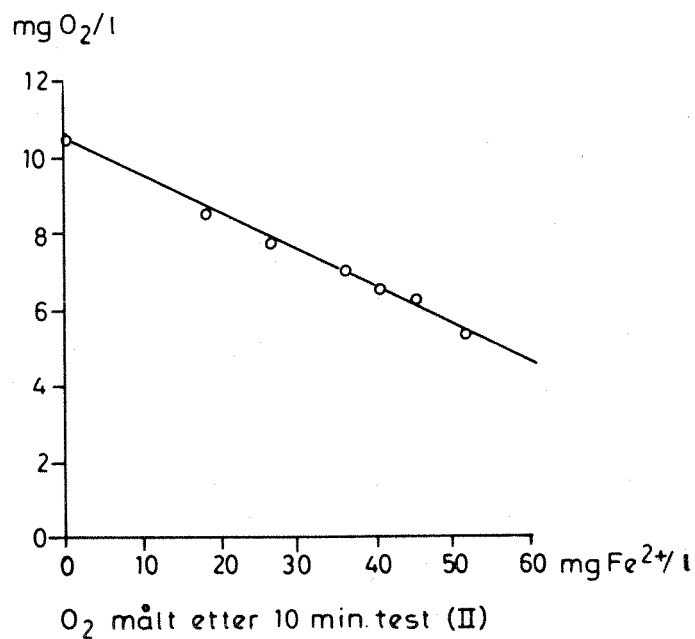
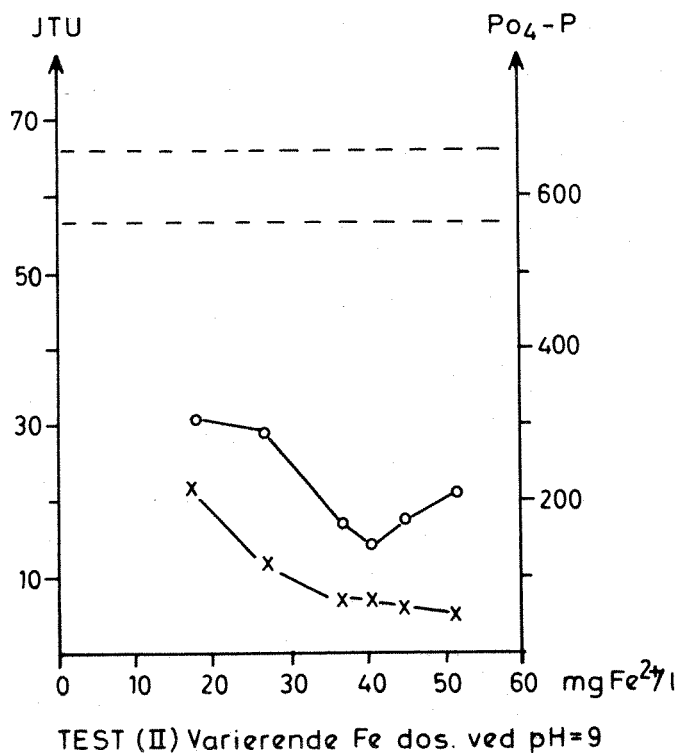
Forsøk II. Konstant pH og variabel jern dosering.

Utført 220474 på mekanisk rensset vann med pH = 7,92, alkalitet = 4,64 mekv/l og SS = 143 mg/l.

Tabell B2. Konstant pH (9,0) og varierende jern dosering

Tilsatt jernsulfat i mg $Fe^{2+}$ /l	-	18	27	36	40,5	45	52
Tilsatt hydratkalk i mg $Ca(OH)_2$ /l	-	150	163	213	230	245	278
Slutt-pH		9,00	8,94	8,90	8,88	8,80	8,70
$PO_4$ -P filtrert $\mu g/l$	667	253	244	179	147	175	207
Turbiditet i JTU	57	22	12	7,5	7,5	6,7	5,4
$O_2$ etter 10 min.	10,4	8,5	7,8	7,0	6,5	6,2	5,2

Etter 1 min. var det fnokkdannelse i alle. Høyest jern tilsats ga i lengre tid enn de andre en grønn farge, noe som kommer av senere oksydering.



Forsøk III. Konstant jerdosering og variabel pH.

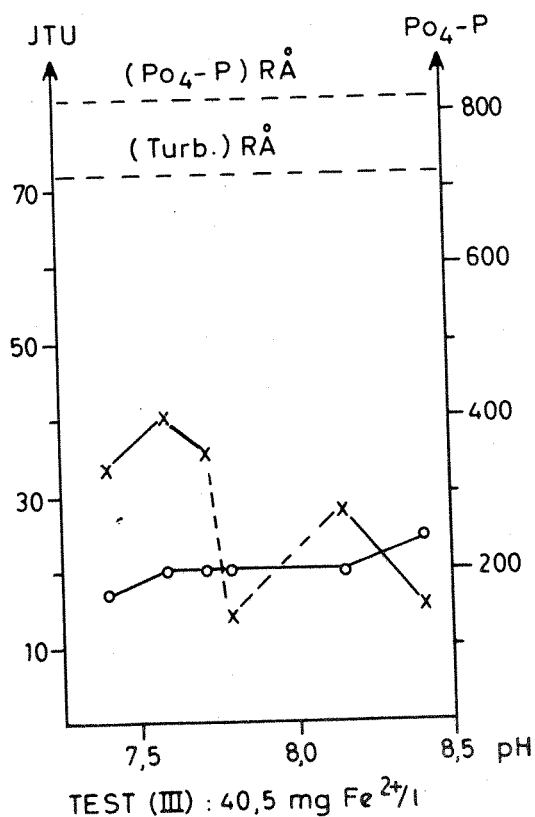
Utført 250474 på mekanisk rensert vann med pH = 7,75, alkalitet = 4,79 mekv/l og SS = 172 mg/l.

Tabell B3. Konstant jerdosering (40,5 mg Fe<sup>2+</sup>/l) og varierende pH

Tilsatt jernsulfat i mg Fe <sup>2+</sup> /l	-	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5
Tilsatt hydratkalk i mg Ca(OH) <sub>2</sub> /l	-	120	135	150	170	190	210
Slutt-pH		7,40	7,60	7,70	7,80	8,22	8,40
PO <sub>4</sub> -P filtrert i µg/l	828	170	198	202	202	198	230
Turbiditet i JTU	72	34	40	35	14	28	15

Jernet innblandet etter kalken.

God fnokkoppbygging innen 2-3 min., men fargen i begerglassene var da fortsatt grønnlig.



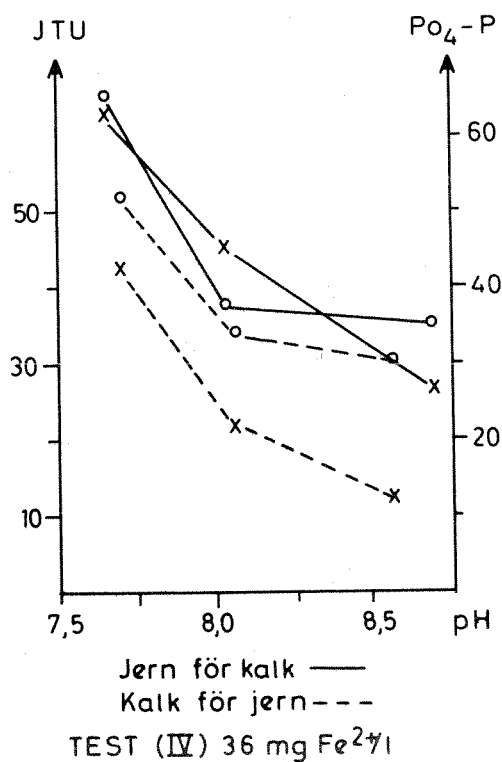
Forsøk IV. Undersøkelse av tilsats av kalk før og etter jerntilsats.

Utført 290474 på mekanisk rensert vann med pH = 7,70, alkalitet = 4,82 mekv/l og SS = 138 mg/l.

Tabell B4. Tilsetting av kalk før og etter jerntilsats

Tilsatt jernsulfat i mg Fe <sup>2+</sup> /l	-	36	36	36	36	36	36
Tilsatt hydratkalk i mg Ca(OH) <sub>2</sub> /l	-	65	85	110	65	85	110
Slutt-pH		7,65	8,03	8,70	7,70	8,04	8,60
PO <sub>4</sub> -P filtrert i µg/l	1400	65	38	35	52	34	30
Turbiditet i JTU	54	64	45	27	43	22	12

Kjemikaliene ble tilsatt med i min. mellomrom under full omrøring. Etter 1 min. med begge kjemikalier var det god fnokkoppbygging i alle begerglass.



Forsøk V. Undersøkelse av polyelektrolytttilsats.

Utført 290474 på mekanisk rensed vann. pH = 8,90 og alkalitet = 5,12 mekv/l.  
Jernsulfattilsetning 35 mg Fe<sup>2+</sup>/l. Polyelektrolytttilsats 0,1 mg/l.

Tabell B5. Polyelektrolytttilsats

	Uten	Herco 859.C	Herco 810.3C	Herco 831.2A	Zetag 92	Magna 156
PO <sub>4</sub> -P filtrert i µg/l	69	56	39	51	45	55
Turbiditet i JTU	49	37	38	26	27	22
Visuell bedømmelse av utfellingen	dårlig	middels	middels	god	god	god
Størrelse på fnokk	middels	middels	stor	liten	stor	ganske stor

Ytterligere fire polyelektrolytter ble forsøkt; Herco 816.2A, Herco 829.3C, Magna 155, Herco 824.3. Noen analyser ble ikke utført fordi en klart kunne se at disse virket dårlig.

BILAG C

FORTYKKINGSFORSØK

## Fortykkingsforsøk

### Forsøkets utførelse

Det ble gjort 4 forsøk med fortykning i sylindrene. Hver sylinder hadde en diameter på 30 cm og høyde på 220 cm. I hvert forsøk ble det kjørt med forskjellig initiankonsentrasjon ( $C_0$ ) i hver av sylindrene. Forsøkene varte i 24 timer med avlesning hver  $\frac{1}{2}$  time de første 8 timer. Etter 24 timer ble det avskilte vannet dekantert og middlere tørrstoffkonsentrasjon i slamfasen ble målt. Som et mål på slammets filtreringsegenskaper ble "Capillary Suction Time" (CST) målt før og etter fortykning.

### Resultater

For hvert forsøk ble det plottet synkekurver og på den måten ble initialsynkehastigheten ( $v$ ) bestemt. En plott av  $v$  mot  $C_0$  viser en relativt stor spredning. Dette skyldes i stor grad vekslende kalkinnhold i slammet ved de forskjellige forsøkene.

Fra  $v/C_0$ -kurven kan partikkelflux-konsentrasjonskurven tegnes. Ved å dra tangenter til denne kurven (fig. C2) kan en av skjæringspunktene med ordinaten og abscissen finne sammenhørende verdier for flux og konsentrasjon i en kontinuerlig fortykker.

Tabell C1. Fortykking av slam fra jern(II)sulfat + kalkfelling

Dato	Co g/l	v cm/hr	c x v kg/m <sup>2</sup> hr	C slutt g/l	CST/%SS	
					beg.	slutt
020574 1	29,69	14,00	0,416	44,78	105,4	86,8
2	14,91	15,00	0,224	30,24	104,9	60,2
3	7,07	25,0	0,177	24,58	143,2	61,2
4	7,83	28,5	0,223	24,55	104,2	67,9
060574 1	14,60	0,8	0,117	34,83	139,0	(55,6)
2	6,95	15,5	0,108	15,66	133,9	126,1
3	4,95	22,3	0,110	12,89	140,6	111,7
4	4,78	23,3	0,111	12,79	122,7	114,6
1005 (Fe)1	22,10	2,0	0,044	26,80	71,0	69,6
(Fe)2	2,35	43,3	0,102	17,08	(171,7)	67,6
(Ca)1	19,80	1,5	0,030	23,64	109,0	109,3
(Ca)2	8,15	16,0	0,130	19,55	115,0	108,8
1205 (Fe)1	27,14	8,8	0,239	37,87	77,2	102,9
(Fe)2	26,77	6,7	0,179	32,51	99,7	94,1
(Ca)1	19,74	3,3	0,065	24,75	102,5	91,5
(Ca)2	9,98	14,5	0,145	20,71	114,2	38,8



Fig.C1 Initialsynkehastighet / % TS

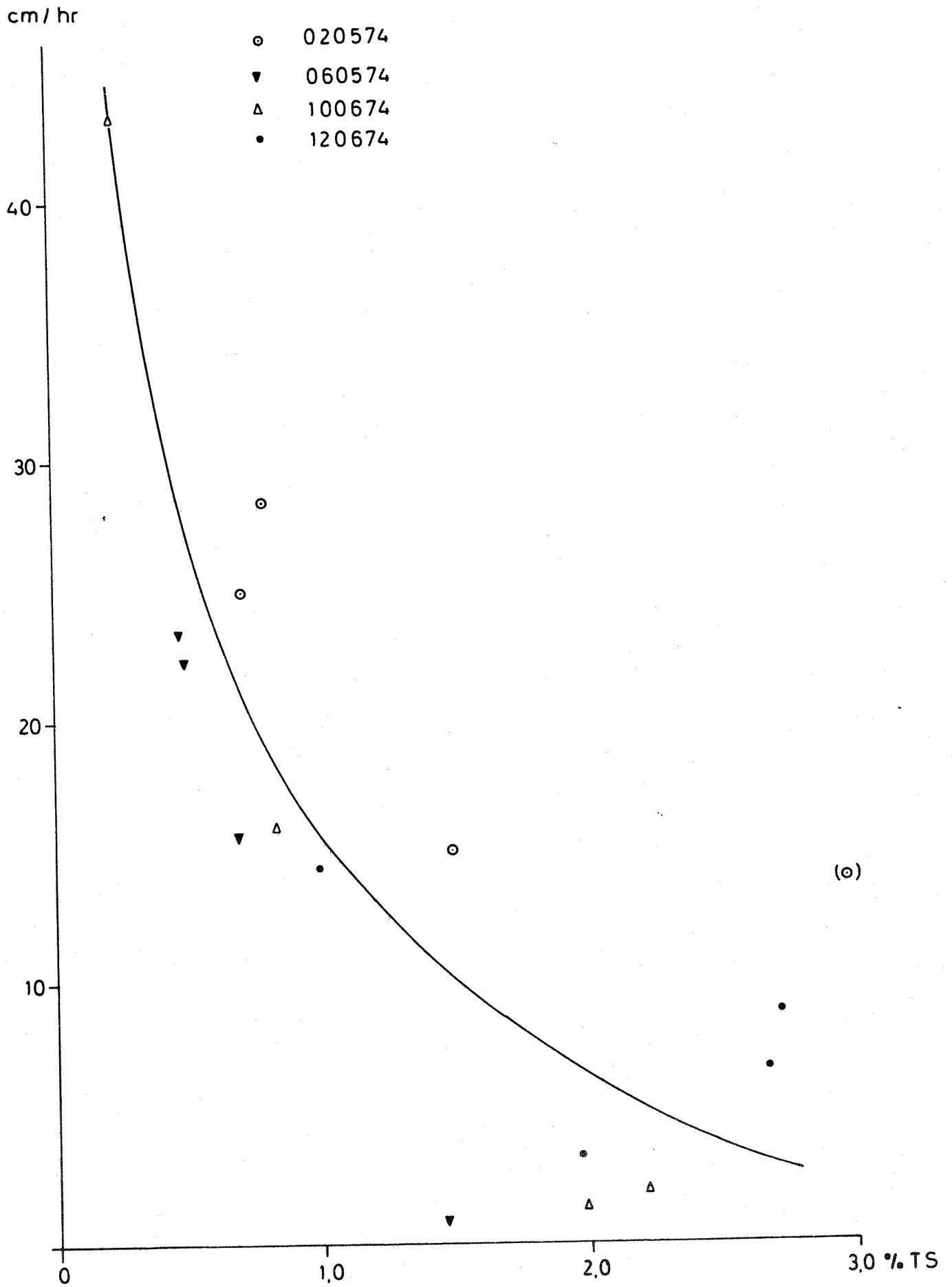


Fig. C2 Partikkelflux  $\varnothing$  konsentrasjon

