



STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Undersökning av egenskaper vid deponering av restprodukter från PFBC-anläggningen vid Öresundsverket

Christer Nilsson

Thomas Gustafsson

Undersökning av egenklagor -
vid deponering av restprodukter -
från PFBC-anläggningen vid
Öresunds verk

Christer Nilsson	^{kraft} Sydkraft
Thomas Gustafsson	Sydkraft

(150) EX

VÄRMIEFÖRSK

ST

Undersökning av egenskaper
vid depnering av rest produkt
från PFBC-anläggningen vid
Öresundsverket

18/
24

Christer Nilsson ~~Stolt~~

Thomas Gustafsson ~~Stolt~~

UNDERSÖKNING AV EGENSKAPER VID DEPONERING AV
RESTPRODUKTER FRÅN PFBC-ANLÄGGNINGEN VID
ÖRESUNDSVERKET

Characteristics of by-products from the PFBC at
Öresund heating and power station with respect
to disposability

Christer Nilsson
Thomas Gustafsson

Juli 1984

Avd för Energiteknisk utveckling, Sydkraft

SAMMANFATTNING

Mot bakgrund av en förväntad ökning av kolanvändning för energiproduktion har världen över intresset för miljöbelastningen uppmärksamrats, liksom restprodukternas deponering eller återanvändning. Denna undersökning behandlar avfall från en trycksatt fluidiserande bädd och syftar främst till att bedöma den potentiella risken för tungmetalltransport från en askdeponi till recipienten liksom undersökning av materialets geotekniska egenskaper. Dessutom har metallernas transport och balans i processen kartlagts.

Lakningsstudien har genomförts medelst skak- och kolonnförsök, där sura lakvätskor använts. Metallhaltsbestämningen genomfördes med atomabsorptions-spektrofotometri.

Av resultaten framgår att processen sannolikt avger flyktiga tungmetaller, främst kvicksilver, med rökgaserna. Restprodukterna uppvisar likheter med avsvavlingsavfall, främst genom den höga alkaliniteten, varför en deponi kan förväntas verka neutraliserande under mycket lång tid. Inget i undersökningen pekar på onormala förhållanden och läckaget av tungmetaller kan förväntas vara lågt. Ur geoteknisk synpunkt anses restprodukterna ha goda byggnadstekniska egenskaper, medan förutsättningen för inblandning i cement tycks vara något begränsad.

Characteristics of by-products from the PFBC at
Öresund heating and power station with respect to
disposability

ABSTRACT

Worldwide, much effort is spent on reducing the environmental impacts of large scale coal combustion. This also includes the investigation of various by-products emerging from different types of combustion technologies, in order to facilitate the disposal of the by-products in an environmentally acceptable manner.

The present investigation aims to investigate the by-products from the PFBC at Öresund heating and power station with respect to:

- o the potential for trace element leaching from a disposal site
- o physical properties of significant construction materials and fillers
- o capture of trace elements during combustion, ie. material balances.

Experiments were performed by leaching the byproducts with acidic water. Two different types of tests were made, ie. shaking batches in flasks (EPA method), and eluting fixed bed columns packed with by-products. The extracted trace elements were analyzed by atomic absorption spectrophotometry.

The by-products show properties similar to those of eg. by-products from flue gas desulfurization, especially with respect to the high content of alkali. Disposal sites are expected to retain most of

the trace element content over an extended period of time. This is due to the large excess of alkali which increases the pH value of any water penetrating the disposal site, which in turn prevents the trace elements from being extracted from the material.

The physical properties have revealed the by-products to be useful as construction materials for building and road construction. However, the use as cement filler appears to be somewhat limited.

The combustion tests showed that the by-products capture extensive amounts of trace elements. However, a significant part of the "volatile" trace elements are emitted by the flue gases. This is especially true for mercury.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	SID
INLEDNING	1
A PROJEKTBEKRIVNING	2
B TEKNISK BESKRIVNING AV PROCESSEN	3
C TUNGMETALLER I INGÅENDE OCH UTGÅENDE MATERIAL	4
Provbehandling och analysmetoder	4
- Provupplösning	4
- Metallanalyser	5
- Kvicksilveranalys av kol	6
Testerna - beskrivning och resultat	6
- Statistisk behandling	7
- Uppgifter om testerna	7
Resultat och kommentarer	8
D LAKFÖRSÖK ENLIGT EPA-METODEN	11
Utförande	11
- Provberedning	11
- pH-justering och skakning	11
- Filtrering och analys	12
Resultat och kommentarer	12
E LAKNING I KOLONN	15
Utförande	15
Testerna - beskrivning	15

	Resultat och kommentarer	16
F	RESULTAT - SYNPUNKTER OCH JÄMFÖRELSE	18
	Flyktiga tungmetaller	18
	Tillgänglig utlakbar metall	18
	Jämförelse mellan skak- och kolonnförsök	19
	Neutralisering av deponi med regnvatten	20
G	RESTPRODUKTERNAS GEOTEKNISKA EGENSKAPER OCH ÅTERANVÄNDNING	21
H	DISKUSSION	22
J	REFERENSFÖRTECKNING	23
	BILAGOR	
	1 LTH: Geotekniska egenskaper	
	2 Cementa: Användning i cement	
	3 Statistisk behandling av mätdata	

INLEDNING

Under de senaste åren har villkoren för produktion av kraft och värme med fossila bränslen förändrats, främst genom kraftigt ökade produktionskostnader och skärpta miljökrav. Mot denna bakgrund har, bl a i Sverige, pågått utveckling av en ny kraftverksprincip, som grundar sig på kolförbränning under tryck i en fluidiserande bädd. Genom sin utformning utgör processen ett ur miljösynpunkt attraktivt alternativ till dagens konventionella teknik, främst genom förmågan att effektivt binda svavel direkt vid förbränningen och jämförelsevis låga utsläpp av kväveoxider.

Tekniken, som kallas Pressurized Fluidized Bed Combustion, PFBC, har utvecklats av ASEA-STAL och ASEA-ATOM. Projektet är numera i ett skede då fullskaliga komponenter testas i en försöksanläggning, som uppförts på Öresundsverket i Malmö. I samband med dessa tester utvärderas och optimeras processen också ur kemisk och förbränningsteknisk synpunkt.

Vid förbränningen uppkommer biprodukter i form av askor och bäddmaterial, som på ett eller annat sätt måste tas omhand via deponering eller återanvändning. Val av omhändertagande kommer att vara starkt beroende av materialets egenskaper, i deponi eller vid inblandning i andra material.

A PROJEKTBESEKRVNING

Projektets främsta mål är att undersöka restprodukternas egenskaper med tonvikt på deponering. Härvid studeras materialens miljöpåverkan genom att i laboratorieskala kartlägga utlakningen av tungmetaller från deponi till receipient. Därvid har också metallernas transport i förbränningsprocessen kartlagts.

Projektet omfattar också studier av materialens geotekniska egenskaper, som t ex dränerande förmåga och hållfasthet vid markplanering, samt, som komplement till detta, en mindre undersökning av möjligheten till återanvändning genom inblandning i cement.

Undersökningen begränsas till material, som uppkommer under stationära förhållanden vid förbränning av ett högsavvligt amerikanskt kol. Provtagning, lakningsstudier och tungmetallbestämningar har utförts på Karlshamnsverkets laboratorium, den geotekniska undersökningen av Lunds Universitet och cementförsöken av Cementa.

B TEKNISK BESKRIVNING AV PROCESSEN

Den trycksatta bädden kan kopplas till kraftgenereringsenheter på olika sätt (1). Ett exempel framgår av figur B1, där bädden driver två delprocesser, en gasturbin- och en ångturbincykel.

Huvudkomponenten, bädden, är inbyggd i ett tryckkärl och kan sägas utgöra brännkammare till en gasturbin. Turbinens kompressor förser tryckkärlet med tryckluft, som bringas att passera bädden och därmed framkalla fluidiseringen samtidigt som kolet förbränns. Rökgasen passerar ett antal cykloner för rening från partiklar och expanderar slutligen i gasturbinen.

Största delen av den frigjorda värmeenergin överförs till vatten/ångslingorna i bädden varpå den genererade ångan driver en konventionell ångturbin. Bäddmaterialet, som utgörs av ett lämpligt svavelabsorberande material, t ex dolomit eller kalk, blåses in till bädden tillsammans med bränslet. Till processen hör system för in- och utmatning av bäddmaterial och uttransport av aska från cyklonerna.

Försöksanläggningen i Malmö utgörs endast av själva bädden med tryckkärl. Processen förses med tryckluft från en eldriven kompressor och ångan kyls bort varför ång- respektive gasturbinen ej finns med, förutom en liten medlöpande gasturbinattrapp för erosionsprover. Ett starkt förenklat processschema med huvuddata återfinns i figur B2 respektive tabell B1. Provtagningspunkterna har markerats i figuren. För de ingående materialen kol och dolomit uttogs proven från bandvåg före mixning. Bäddmaterial och cyklonaska togs ut före uttransport till asksilon. Observera att endast en utmatningslinje för cyklonaskorna har markerats i figuren. Prov på stoftresten efter cyklonerna togs ut före turbinen. Kol och dolomit levererades vid två tillfällen. Analyser återfinns i tabell B2.

C TUNGMETALLER I INGÅENDE OCH UTGÅENDE MATERIAL

I de fem testomgångar som behandlas i detta arbete har prov på de båda ingående materialen kol och dolomit analyserats liksom de utgående materialen bäddmassa, cyklon-1-, -2- och -3-aska samt "exhaust", som representerar det stoft som lämnar cyklonerna.

Under körningarna togs prov på dessa material ut under försökens gång. För att öka analyssäkerhet och möjliggöra en bedömning av variationer i tiden uttogs och analyserades i vissa fall ett flertal prov av materialen. Antalet prover från de olika testerna beskrivs nedan.

Provbehandling och analysmetoder

Proven torkades vid 105°C i två timmar och förvarades därefter i täta glasburkar. De har analyserats enligt nedanstående schema (figur C1).

Från varje kolprov inaskades två delprov vid 450°C under 12-15 h eller tills endast kolaska återstod (2). Glödförlusten och askhalten bestämdes.

Av kolaskan har analysprov framtagits på samma sätt som för övriga material. Kvicksilveranalys på kolet beskrivs separat.

Provupplösning

De vid 105°C torkade proven upplöstes enligt följande metod, som i huvudsak ansluter sig till ASTM D 3683-78 (ref 3):

Ca 0.2 g prov invägdes i en 125 ml polypropylenflaska med skruvlock. 3 ml kungsvatten ($3/5 \text{ HCl}$, $1/5 \text{ HNO}_3$ och $1/5 \text{ H}_2\text{O}$) och 5 ml HF tillfördes, varefter provet och syrablandningen kokades (95°C) i 2 h. 50 ml mättad borsyralösning tillfördes efter avsvälning, varpå provet kokades ytterligare 1 h. När provet antagit rumstemperatur filtrerades det genom filter nr OOH, varefter volymen justerades till 100 ml med dejonat.

Detta prov, här kallat analysprov, användes till samtliga metallanalyser utom kvicksilver i kol.

Vid provupplösningen användes syror av Suprapur kvalitet och dejonat för spädning. All materiel har varit syradiskad i utspädd salpetersyra.

Metallanalyser

Samtliga metallanalyser har utförts med atomabsorptionsspektrofotometer, Varian AA6. Både flam- och flamlös (grafitugn) teknik har använts samt en tredje teknik, Cold Vapor, för kvicksilveranalyserna.

Atomabsorptionsspektrofotometern är utrustad med en automatisk provväxlare (ASD-56) för grafitugnsanalyserna. Till Cold Vapor-analyserna har en Varian Vapor Generation Accessory, Model 65, använts. För utvärdering av grafitugns- och flamanalyserna har en mikrodator utnyttjats, där resultatet direkt beräknades utgående från de invägda provmängderna. Exempel på en sådan utskrift finns i figur C2. Vid samtliga analyser utom kvicksilver användes additionsmetoden, dvs en känd metallmängd tillfördes en liten del av provet som därefter analyserades.

Kvicksilveranalys av kol

Provberedningen av kolprovet för kvicksilveranalys har följt anvisningarna i ASTM D 3684-78 (ref 4). Ca 1.5 g kol invägdes i degel avsedd för värmeverdesbestämning och förbrändes i 30 atö syrgas varvid kvicksilvret absorberades i 10 ml utspädd salpetersyra (1+9) placerat i bombens botten. Lösningen med sköljvatten filtrerades genom filter OOH och volymen justerades till 100 ml. Ca 0.2 ml 5 %-ig KMnO_4 -lösning tillsattes för att hålla provet oxiderat.

Analyserna utfördes enligt Cold Vapor-metoden. 5 ml hydroxylaminvätekloridlösning (1.5 %) tillfördes provet för att avlägsna KMnO_4 -överskottet. 30 sek efter att färgen försvunnit överfördes 20 ml provlösning till reaktionskärlet, som tillslöt, varefter 1.5 ml tennkloridlösning tillsattes. Efter 90 sek anslöts inertgasen och kvicksilverångorna överfördes till mätkyvetten.

Halten kvicksilver i provet bestämdes utifrån upprättad standardkurva.

Testerna - beskrivning och resultat

Testomgångarna med de viktigaste driftparametrarna beskrivs i tabell C1 och i texten nedan. Resultaten av mätningarna, dvs metallhalter och de därur beräknade massbalanserna återfinns i tabell C2-C6 samt i tabell C7-C11. De angivna medelvärdena har använts för massbalansberäkningen, där cyklonaskorna redovisas tillsammans på grund av lågt bidrag från cyklon 2 och 3.

Statistisk behandling

Som tidigare omnämnts har prov i regel tagits ut vid flera tillfällen under respektive test, från vilka ett antal analysprover framställts med syfte att öka analysnoggrannheten (5). I metallbestämningen finns då två felkällor, en tidsberoende och en analysbunden, vilka båda statistiskt återges i en gemensam standardavvikelse, representerad av mätvärdenas intervall i tabell C2-C6. Beräkningsgången återfinns i bilaga 3.

Eftersom varje metall bestämts tre gånger i varje analysprov betyder detta sex bestämningar i varje kolprov och tre bestämningar i de övriga materialen, se figur C1. Observera att kvicksilver i kol utgör ett undantag med tre bestämningar.

Speciellt i test III behandlas halternas variation i tiden, se tabell C14 och C15. Här uppdelas standardavvikelsen i de två komponenterna enligt ovan.

Om den tidsberoende komponenten varit stor markeras detta med en asterisk i tabellerna.

Uppgifter om testerna

Se också tabell C1. Material har tagits ut från den del av körningen, som anses vara i jämvikt.

Test II. Analysvärdena grundar sig på fem kolprov och för övriga material ett prov.

Test III. Ingångsmaterialens variation i tiden studerades speciellt under denna test. Fem prov på kol respektive dolomit togs ut med 5 timmars mellanrum. Av övriga material uttogs två prover utom för exhaust, där ett prov kunde erhållas. Kolet analyserades här

dubbelt, dvs fyra analysprov framställdes från varje prov.

Resultatet av ingångsmaterialens variation i tiden framgår av tabellerna C14 och C15.

Test IV. Material togs ut under hela körperioden. Eftersom denna var lång, ca 100 h, och jämvikt endast rådde under en del av denna tid, grundar sig metallhalter och massbalans på material från jämviktsperioden. Kolvärdena härstammar från tre prover och övriga material från ett prov.

Laktesterna, som redovisas under avsnitt D, grundar sig dock på hela det uttagna materialet.

Test V:A. Från denna test togs ett större antal prover ut från en tidsperiod av ca 20 h. Proverna slogs samman till ett mindre antal prover, för kol fyra st, bäddmassa och cyklon 1 två st samt för de övriga materialen ett st.

Test V:B. Denna test kördes i direkt anslutning till test V:A. Precis som ovan har ett större antal prover från hela körningen slagits samman så att kol, dolomit, cyklon 2 och 3 analyserats på tre prover, bäddmassa och cyklon 1 på två prover och exhaust på ett. Precis som i test III har kolet analyserats dubbelt.

Resultat och kommentarer

Två kol- och dolomitleveranser har använts under testen, se tabell B2 och C1. Kvalitetsmässigt sett är leveranserna lika men trots detta varierade tungmetallinnehållet. De två första testen kan därför gemensamt jämföras med de tre sista.

Utan att närmare gå in på detaljer kan konstateras att bidraget från kol och dolomit till massbalansen generellt sett är av samma storleksordning. Påfallande är dock dolomitens höga halt av kvicksilver, kadmium, vanadin och zink under test II och III, dvs bränsleblandning A, och selenets sjunkande halt i båda bränslena. Vidare gäller nästan utan undantag att metallhalten i materialen ökar "längre fram" i processen, dvs med allt finare material.

Speciellt misstänks att kol och dolomit förorenats av kobolt under provbehandlingen av test II, se tabell C7, möjligen från malningen. Övriga prover kom därför i stället att krossas i mortel.

Massbalanserna, uttryckta som flöden av respektive metall per tillförd energienhet, framgår av tabellerna C7-C11. Cyklonaskornas bidrag domineras helt av den första cyklonen varför alla tre redovisas tillsammans. Utfallen presenteras också gemensamt i tabell C12. Massbalansen är behäftad med olika felkällor, fel i provtagning och analys har diskuterats tidigare. Till en viss del kan fel också tillskrivas svårigheter att få korrekta värden på de ingående materialflödena.

Det är av sammanställningen i tabell C12 uppenbart att utfallet av vissa metaller såsom arsenik, selen och koppar påverkas av bränsleblandningen. Skillnaden för vanadin är också stor men kan ha annan förklaring. Det har ovan antagits att inverkan av bäddhöjd inte påverkar utfallet. Eftersom bäddtemperaturen har varit konstant 850° under försöken kan detta vara rimligt i ett längre perspektiv. Det anses sannolikt att vanadin deponeras på väggar och andra ytor i bäddkärlets freeboard, vilket leder till ett lågt utfall såsom i test II och III. Speciellt i test V:A och V:B ökades bäddhöjden relativt kort före provtag-

ningen, varför den därvid ökande freeboardtemperaturren och eventuella erosionsfenomen kan ha återfört deponerad vanadin till materialströmmen. Möjligen gäller samma förhållande för mangan i test IV, där utfallet för totala körperioden ligger vid 90%.

En viktig slutsats av detta är att tungmetallerna nödvändigtvis inte är i jämvikt för att materialens huvudkomponenter är det.

Kvicksilver, med utfall runt 30 %, är helt säkert flyktigt, troligen också arsenik. Av utfallen i övrigt framgår inte klart förhållandet för övriga metaller.

Testanläggningen är inte utrustad med stoftrening, varför uppmätning av en kommersiell anläggnings förväntade utsläpp av stoftbunden tungmetall inte låter sig göras. I tabell C13 har dock en uppskattning av detta redovisats för det fall att stoftutsläppet är 20 mg/MJ, dvs det maximalt tillåtna.

D LAKFÖRSÖK ENLIGT EPA-METODEN

Metallernas benägenhet att lakas ut ur avfallsmaterialen har undersökts med två helt olika metoder, kolonnmetoden, som beskrivs i avsnitt E och EPA:s extraktionsmetod, som beskrivs nedan. För att göra bilden fullständig och skaffa en uppfattning om förhållandet i kol- och dolomitupplaget har också dessa material tagits med.

Metoden, som snarast beskriver en förväntad storleksordning av totala metallutsläppet, finns beskriven i Federal Register, vol 43 (6).

Utförande

I förfarandet nedan har vissa ändringar varit nödvändiga gentemot EPA:s beskrivning p g a avsaknad av viss utrustning.

Provberedning

Från ett prov, så homogent som möjligt, överfördes material till en syradiskad bägare (400 ml) och totalavsaltat vatten tillfördes. Normalt har 20 gram prov och 320 ml totalavsaltat vatten använts, men i de fall endast små mängder prov varit tillgängliga, har mindre mängder material med totalavsaltat vatten i proportion därtill använts.

pH-justering_och_skakning

pH uppmättes i material/vattenblandningen under omröring med magnetomrörare och justerades med 0.5-N ättiksyra. Maximalt tillsattes dock 4 ml/gram material. I de fall ursprungs-pH varit < 5 har ingen syra tillsatts.

Efter pH-justeringen överfördes blandningen till en syradiskad plastflaska (500 ml), som därefter agiterades i en skakapparat (Griffin Flask Shaker) under 24 h. Skakhastigheten anpassades så att provet hade regelbunden kontakt med lakvätskan.

Filtrering och analys

Efter skakningen filtrerades provet genom två filter, nr 204 och 00H. Efter filtreringen var lakvätskan klar, dock med något undantag, som redovisas nedan. Vätskan surgjordes med 1 ml koncentrerad HNO_3 /50 ml vätska, vilket ger pH = 1-2. Metallanalysen genomfördes enligt tidigare beskrivningar.

Resultat och kommentarer

Materialen är i regel desamma eller uttagna under samma test, som redovisats i avsnitt C. Resultaten framgår av tabell D1-D5, som också beskriver utlakad metall i % av utgångsmaterialet.

Lakningarna har, med något undantag, utförts på material, uttaget vid flera tillfällen under testen, men sammanslaget till ett prov. Bedömning av reproducerbarheten har därför inte utförts i denna undersökning. Test V:A och B har slagits ihop till ett gemensamt laktest, test V.

Kommentarer

Lakmetoden är sådan att pH-värdet justeras endast före agiteringen, vilken kan leda till en successiv förändring under den totala laktiden, speciellt om basiska material lakas. Allmänt gäller att, med få undantag, den utlakade metallen minskar med ökande pH-värde.

Vid lakningen av kol behövde ingen syra tillsättas då lakvätskan utan syratillsats höll sig vid $\text{pH} \approx 3$ i samtliga test. Sannolikt påverkas utlakningen av detta låga pH. Av tabellerna framgår att metallerna i kol har störst benägenhet att frigöras. Det har tidigare påpekats att kolet levererats vid två tillfällen, se avsnitt B och C. Detta framgår också av tabell D5, som jämför å ena sidan test II och III och å andra sidan test IV och V, som inbördes uppvisar likheter men jämfört med varandra skiljer sig både i reella tal och procentuellt utlakbart. Vid bedömningen av detta bör observeras att förhållandet på kolgården kan ha påverkat resultatet. Den första kolleveransen kan, genom att den lagrats längre tid på kolgården, ha utlakats med regn- och smältvatten i högre utsträckning än den andra leveransen.

Förhållandet för dolomit påminner om det för kol. Också här har första dolomitleveransen lakats under längre tid. Dock föreligger en viktig skillnad, dolomit är basiskt, varför metallerna är hårdare bundna.

Processens utgående material, bäddmassa och cyklonaskor, påminner om varandra i lakningshänseende. Också dessa uppvisar tydliga skillnader i tabell D5, vilket givetvis bör ha påverkats av utgångsmaterialets metallinnehåll och -former.

Exhaust har undersökts vid ett tillfälle, test III. Genom svårigheter att filtrera materialet gick fina partiklar igenom och förorenade lakvätskan, varför de redovisade halterna delvis torde härröra från dessa partiklar.

Som syns i tabell D1-D4 är den utlakade mängden metall oftast mycket låg. Endast i enstaka fall och då huvudsakligen för kol överstiger den en procent. I tabell D6 redovisas några normvärden som jämförelse,

där svenska och utländska normer upptas (11). EPA:s maxvärden för halten av extraherbar metall uppges vara tio gånger den acceptabla halten i dricksvatten.

E LAKNING I KOLONN

Ett av leden i undersökningen av lakegenskaperna hos de i PFBC-processen ingående materialen är kolonnlakning. Denna typ av lakning är tänkt att ge en bild av en "naturlig" utlakning genom sur nederbörd. Emellertid är tidsförloppet starkt förkortat genom högre lakhastighet och högre syrahalt än i normalt regnvatten.

Utförande

Lakningen har utförts i en plastcylinder av PVC ($\emptyset$ 110 mm), se figur E1. Ca 25 mm ovanför botten fanns en silplatta med ca 25 hål ($\emptyset$ 2 mm) på vilken placerats två filterpapper nr 3 för att förhindra partiklar att följa med lakvätskan.

I samtliga lakningar användes 1.0 kg prov. Lakvätska tillfördes kontinuerligt ovanifrån under hela lakningen, så att materialet hela tiden hölls väl fuktat med lakvätska. Vid starten tillsattes en större volym vätska, varefter den påfylldes med en slangpump (Masterflex), styrd av ett tidur, så att lakvätska tillfördes när nivån i kolonnen sjunkit till strax ovan provmaterialets översta nivå. Vid provtillfällena togs 200 ml prov ut fördelat på två syradiskade plastflaskor, den ena för pH- och konduktivitetsmätning och den andra för metallanalys. Den senare surgjordes och analyserades enligt tidigare beskrivning.

Testerna - beskrivning

Sammanlagt sex lakningar utfördes, vilka sammanfattas i tabell E1. Som synes har tre material använts, vardera i kombination med två olika lakvätskor. De två första försöken omfattar bäddmassa och cyklon-1-aska

i lika proportioner, vilket här antas vara förhållandet i en deponi. De två andra materialen är kol och dolomit, som tagits med som jämförelse. Samtliga material togs ut under test IV.

I (7) uppges att sulfat- och nitrathalten under åren 1975-79 i medeltal har varit 85 respektive 40 mikroekvivalenter/liter i nederbörden i södra Skandinavien. Omräknat till syra motsvarar detta totalt $0.125 \text{ mM H}^+/\text{l}$.

Som uppges i tabell E1 har två lakvätskor använts, dels 3 mM HNO_3 och dels $0.8 \text{ mM H}_2\text{SO}_4 + 0.8 \text{ mM HNO}_3$, motsvarande en syrakoncentration 25 respektive 20 gånger högre än i nederbörden. Den högre syrahalten används i syfte att förkorta laktiden.

Resultat och kommentarer

Resultaten presenteras i tabell E2-E7 och i diagram E1-E14. Endast ett fåtal metaller, huvudsakligen de där större förändringar skett, har tagits med i diagrammen.

Bädd- + cyklonaska: Lakförloppet uppvisar ingen större skillnad för de båda lakvätskorna. Genombrott av syra tycks ske efter ca 25 respektive 15 bäddvolymer vätska, vilket räknat på tillsatt syramängd motsvarar ett basöverskott av 3.2 respektive 1.7 g NaOH per kilo material. Beträffande metallhalterna uppvisar dessa i några fall förhöjda initialhalter, som snabbt sjunker till en konstant nivå. I samband med genombrottet sker en höjning av mangan- och zinkhalterna medan halten vanadin i stället sjunker. Övriga metaller påverkas obetydligt.

Lakningarna tog vardera ca en vecka att genomföra, vilket bestämdes av vätskans genomträngningshastig-

het, vilket i sin tur troligen påverkades av att materialet härdade till en hård klump. Stråkbildning i kolonnen kunde inte konstateras.

Dolomit: Någon större förändring av pH eller metallhalter kunde inte uppmätas under försöken, vilket beror på materialets stora buffertförmåga. Lakningarna genomfördes på två dygn, varefter en enkel inspektion av materialet visade att ingen stråkbildning förekommit.

Kol: pH låg under hela lakningen konstant på ett lågt värde, ca 2.5, medan konduktiviteten och metallhalterna snabbt sjönk från ett högt initialvärde till en konstant nivå. Lakförloppet gick snabbt, på ca en dag, vilket berodde på den varierande materialstorleken (<1-40 mm). Sannolikt har stråkbildning förekommit.

Dolomit och kol uttogs från kolgården under kraftigt regn, varför dessa prover torkades ca 24 h vid 105⁰C innan lakningen påbörjades. Eftersom materialen legat öppet har regnvatten sannolikt på förhand startat viss lakning av speciellt kol. Se avsnitt C och F.

F RESULTAT - SYNPUNKTER OCH JÄMFÖRELSE

Ett flertal utlakningsstudier av material från kolförbränning och rökgasrening har publicerats. Synpunkter och jämförelser har huvudsakligen hämtats från en holländsk (8) och två svenska (9), (10) rapporter.

Flyktiga tungmetaller

Under avsnitt C har med utgångspunkt i massbalanser konstaterats att kvicksilver och troligen arsenik är flyktiga. Enligt uppgift i litteraturen gällande pulverförbränning (8), (9) anses selen vara flyktigt, vilket enligt tabell C12 också tycks gälla för bränsle B.

Vissa metaller, däribland arsenik, uppges förflyktigas under förbränningen men sedan åter kondensera på finare askpartiklar.

Tillgänglig utlakbar metall

Begreppet maximalt utlakbart (eng availability) användes för att beskriva metallernas tillgänglighet för lakning (8), (9). Detta hänger i viss mån samman med deras fördelning i matrisen. Ämnen som koncentreras till ytan av materialet är mest tillgängliga, vilket också bestämmer lakhastigheten, speciellt i allra första skedet. Dock kompliceras bilden av faktorer som löslighet, komplexbildning etc. I tabell F1, hämtad ur (9), listas några metallers ytkoncentration på flygaska. Dessutom påpekas (8) att metallernas diffusion genom materialmatrisen är en viktig hastighetsbestämmande parameter. Så är t ex metaller, innehållna i förglasad matris från pulverförbränning, dåligt tillgängliga. Fluid-bed-material är oftast inte sintrat men uppkommer normalt

tillsammans med absorbenter med hög alkalinitet, varför lakbilden kompliceras. Försöksresultaten ovan tyder på relativt normala lakförlopp.

Jämförelse mellan skak- och kolonnförsök

Försök till jämförelse mellan lakmetoderna har gjorts, varvid konstaterades att kolonnlakning kan ge problem som kanalbildning, segregering och randeffekter, vilket försvårar utvärderingen. Enligt (8) kommer ett skakförsök med två delar destillerat vatten och en del material att ge metallhalter jämförbara med det första eluatet ur en kolonn.

Kolonnlakningarna under avsnitt E genomfördes på förhållandevis kort tid, vilket i kombination med relativt stora partiklar och härdningsfenomen kan ge ett diffusionsstyrt förlopp efter det att de ytliga, lättillgängliga ämnena försvunnit. Eftersom askan och dolomiten dessutom innehåller karbonater kan inte uteslutas att syran i lakvätskan frigjort koldioxid, som försvårat kontakten mellan lakvätska och material. Jämförelser mellan skak- och kolonnlakningar är därför vanskliga. Om den totala utlakade mängden tungmetall beräknas (se tabell F2), finner man att skakförsöken, speciellt för de metaller, som tycks lakas främst i det sura området (ex Zn, Mn), ger en låg utlakad mängd. Uppenbarligen spelar skakförsökens slut-pH^{*} en avgörande roll för resultatet, då metaller, som först lakas ut vid låga pH, senare kan maskeras genom t ex utfällning om pH höjs under lakningen.

* Uppmättes inte under skakförsöken. Materialets buffrande förmåga är dock hög jämfört med tillsatt syramängd, varför pH kan förväntas ha stigit.

Neutralisering av deponi med regnvatten

Lakning A och B uppvisar en påfallande skillnad i tillgänglig alkalinitet (3.2 respektive 1.7 g NaOH/kg) trots att samma material använts. Möjligen beror detta på att utlakningen hämmas i fall B. Bildande av kalciumsulfat, som blockerar diffusionsprocesserna?

Med ledning av dessa uppgifter, nederbördens sammansättning och övriga uppgifter från (10) kan en deponis tid för neutralisering beräknas enligt

$$T = \frac{h \cdot E_a \cdot \rho}{E_r \cdot Q} \quad \text{år}$$

där h = höjd (m)
 E_a = askans alkalinitet (mol OH^- /kg aska)
 E_r = syra i regnvattnet (mol H^+ /m³ regn)
 Q = regnmängd (m/år)
 ρ = askdeponins densitet (kg/m³)

För $h = 15 \text{ m}$, $\rho = 2\,000 \text{ kg/m}^3$, $E_r = 0.21 \text{ mol H}^+/\text{m}^3$,
 $Q = 0.535 \text{ m/år}$ och $E_a = 0.08 \text{ mol OH}^-/\text{kg}$ blir

$$T \approx 21\,000 \text{ år}$$

Denna tid är kort jämfört med uppgifter i (10), som uppger ca 100 000 - 1 000 000 år för liknande deponier. Dessa siffror grundar sig dock på betydligt högre alkalinitetsvärden, bestämda genom titrering. (9) uppger 6 000-8 000 år för en 5 m djup deponi av flygaska.

Värdet av beräkningar som ovan är dock tveksamt (8). Tidsperspektivet är mycket långt och många fenomen kan därmed inte simuleras i enkla försök.

G RESTPRODUKTERNAS GEOTEKNISKA EGENSKAPER OCH ÅTERANVÄNDNING

Eftersom mängden avfall från ifrågavarande anläggningstyp är avsevärd, ca 150-200 tusen ton per år vid 800 MW tillförd energi, föreligger ett stort intresse för återanvändning av materialet. De geotekniska egenskaperna i samband med landutfyllnad eller vid grundläggningsarbeten har undersökts av LTH:s avdelning för geoteknik. Rapporten i sin helhet med slutsatser och kommentarer återfinns i bilaga 1. Likaledes har en kortfattad bedömning av förutsättningar för inblandning i cement utförts av Cementa (bilaga 2), som bl a konstaterar att den höga sulfathalten, speciellt i bäddmaterialet utgör en begränsning av inblandningsmängden. I en undersökning av Risø, Danmark (12), där material från testanläggningen ingår, påpekas dessutom att puzzolaniteten, dvs förmågan att bilda bl a kalciumsilikat, sannolikt avviker från normal flygaska genom att förbrännings-temperaturen är väsentligt lägre.

H DISKUSSION

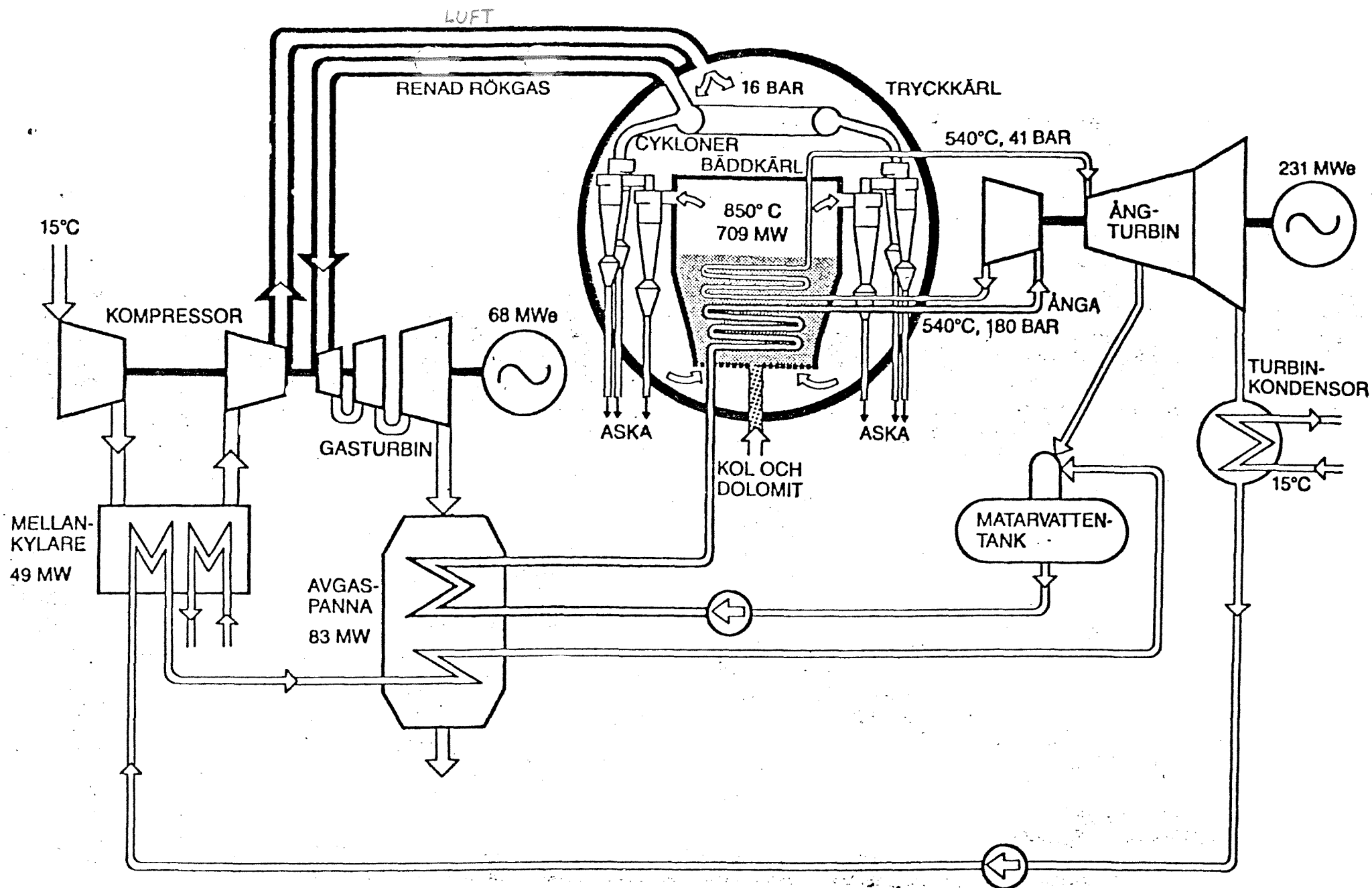
I spåren av det stegrade intresset för kolförbränning som en framtida energikälla har ett flertal miljöanknutna undersökningar genomförts. Av denna rapport framgår att restprodukterna från en PFBC knappast kommer att skilja sig avsevärt från andra processers restprodukter i en deponi vad avser lakning. Förutsättningar att hitta avnämare för återanvändning finns dessutom.

Det måste här dock starkt betonas att undersökningen med sin relativt begränsade målsättning endast berört en kombination av kol och dolomit. Mot bakgrund av PFBC-processens flexibilitet på kol- och absorbent-sidan bör en uppföljande komplettering och jämförelse med andra bränslen vara motiverad.

Av resultat och slutsatser ovan framgår också att processens luftburna bidrag till recipienten av stoftbunden såväl som gasformig metall är ofullständigt känt, liksom inverkan av stoftrening. Det är därför logiskt att inkludera detta i eventuella fortsatta utredningar.

J REFERENSFÖRTECKNING

- 1 ASEA PFBC. Broschymateriel om PFBC
- 2 Coal and Petroleum Analysis by AAS. Varian Techtron Ltd
- 3 ASTM D 3683-78. Trace elements in coal and coke ash by atomic absorption
- 4 ASTM D 3684-78. Total mercury in coal by the oxygen bomb combustion/atomic absorption method
- 5 Gunnar Blom. Matematisk statistik. LTH 1965
- 6 Federal Register, vol 43, no 234. Hazardous waste. Proposed guidelines and regulation and proposal on identification and listing, EPA dec 18 1978
- 7 Jordbruksdepartementet, Kommittén Miljö -82. Försurning i dag och i morgon
- 8 Netherlands Energy Research Foundation ECN-120. Leaching of trace elements from coal solid waste. 1982
- 9 KHM TR84. Litteraturstudie avseende lakning av restprodukter från koleldning
- 10 KHM TR105. Studier av utlaknings- och vittringsprocesser av kolaskor
- 11 KHM Slutrapport, Kap 24, 1983
- 12 Vagn Voldbro. Tryksat fluid-bed forbraending af kul i kraftvaerksanlaeg, deponering og anvendelse af flyveaske. Risø 1983



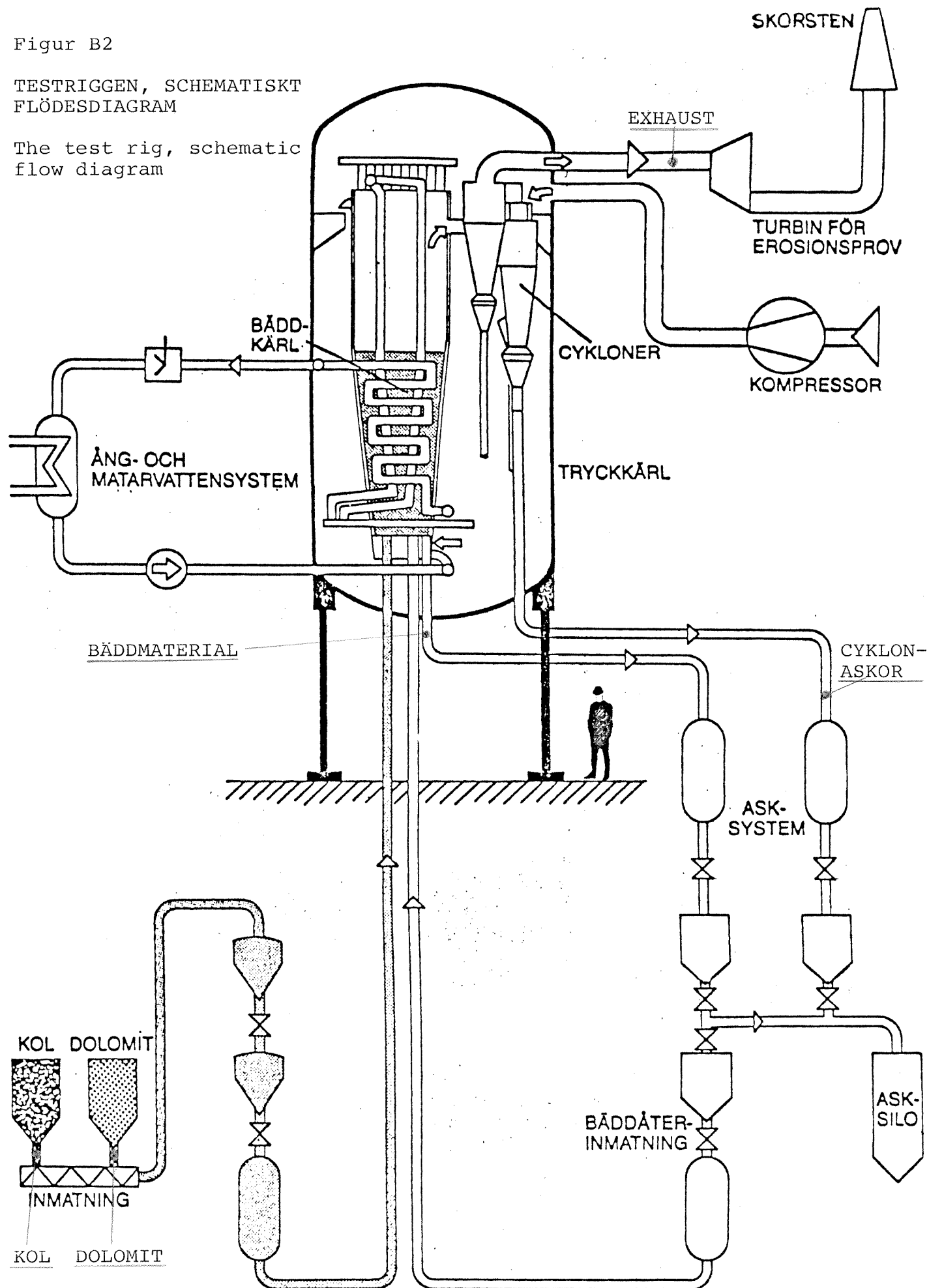
Figur B1 KOMMERSIELLT PFBC-KRAFTVERK

Commercial PFBC power station

Figur B2

TESTRIGGEN, SCHEMATISKT
FLÖDESDIAGRAM

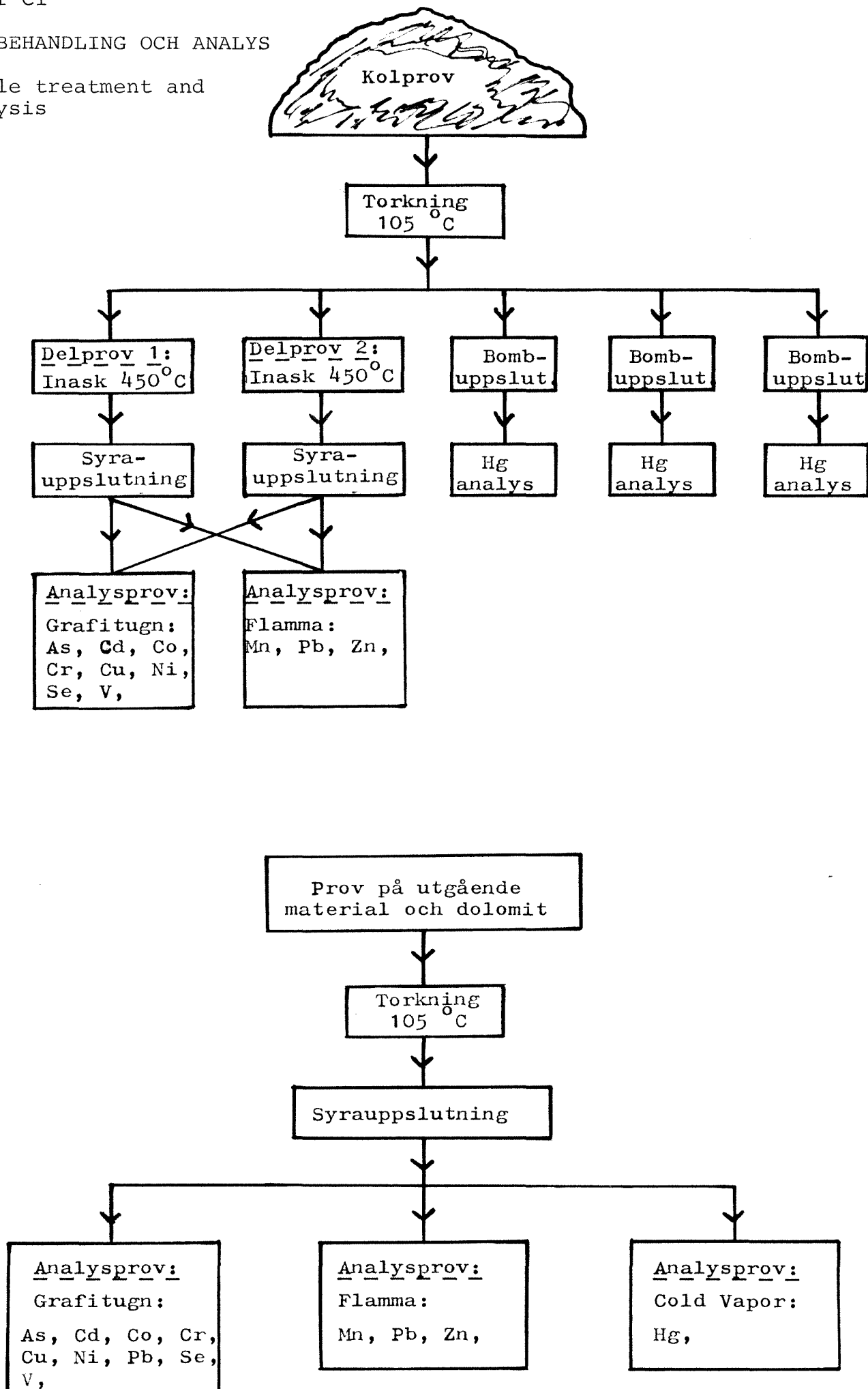
The test rig, schematic
flow diagram



Figur C1

PROVBEHANDLING OCH ANALYS

Sample treatment and analysis



Figur C2

EXEMPEL PÅ UTSKRIFT AV ANALYSVÄRDEN

Printing of values during analysis. Example

PROTOKOLL METALLANALYS AAS

DATUM 83 04 25 SIGN TSG

PROVBETECKNING C 24

PROVTAGNINGSTÄLLE, PFBC

METALL, CO

ANALYSMETOD, GRAFITUGN

INSTALLNING CRA 90 DRY TEMP(°C) 100 TIME(sek) 25
ASH TEMP(°C) 400 TIME(sek) 25
ATM TEMP(°C) 2300 TIME(sek) 1,5 RAMP (°C/sek) 800

INSTALLNING PRM DELAY(sek) 0,4 INT.(sek) 3,5

ANTAL PROV, 13 MÄTNINGAR/PROV, 3

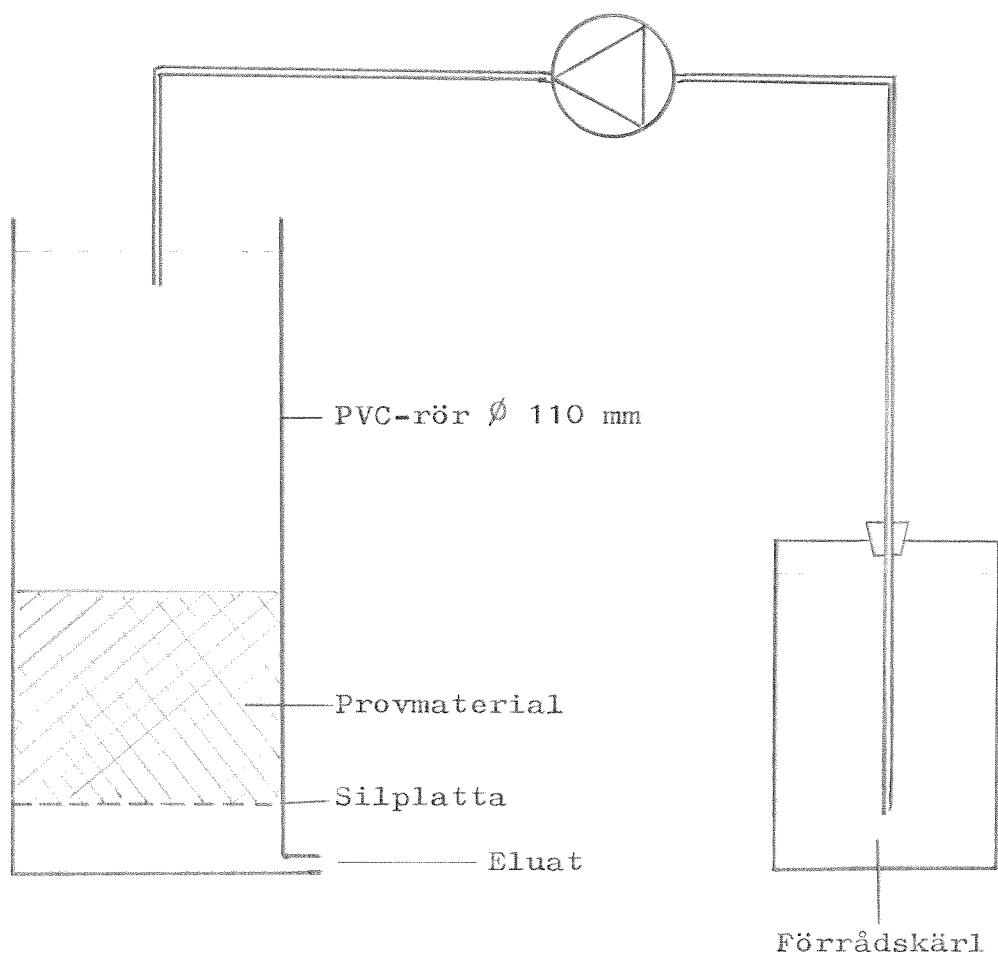
TABELL

PROV	TYP	TILLS. ppb	MÄNGD mg/l	PEAK	INT.	PEAK ppm	INT. ppm
01	C	125		0359	0199		
02	C	250		0450	0301		
03 EX1111:1B	P		2931	0117	0067	0026	0023
04 EX1111:1A	P		2870	0116	0064	0026	0023
05 EX1111:1C	P		5465	0207	0140	0024	0026
06	C	125		0209	0097	$\bar{x}=25$	$\bar{x}=24$
07	C	250		0428	0200		
08 BM1111:8B	P		3590	0023	0016	0004	0006
09 BM1111:1A	P		4824	0035	0020	0004	0005
10 BM1111:1B	P		1727	0018	0010	0006	0008
11 BM1111:8A	P		2455	0020	0010	0005	0005
12 BM1111:1C	P		2125	0021	0012	0006	0007
13 BM1111:8C	P		2864	0015	0010	0003	0005
						$\bar{x}=5$	$\bar{x}=6$

Figur E 1

UTRUSTNING FÖR KOLONNLAKNING

Laboratory set-up for column leaching test



Tabell B1

HUVUDDATA FÖR TESTANLÄGGNING I MALMÖ

Main technical data of the test rig in Malmö

Termisk effekt	15400 kW
Ånggeneratoreffekt	9000 kW
Bäddtemperatur	850 ⁰ C
Bäddhöjd	4 m
Bäddmassa	3.6 ton
Kolflöde	0.58 kg/s
Dolomitflöde (kol med 4 % S)	0.17 kg/s
Förbränningsluft genom bädden	7.61 kg/s
Lufttemperatur före bädden	182 ⁰ C
Lufttryck före bädden	16.8 bar
Rökgasflöde ur bädden	8.10 kg/s
Matarvattenflöde	3.81 kg/s
Matarvattentemperatur	250 ⁰ C
Ångtemperatur	530 ⁰ C
Ångtryck	100 bar

Tabell B2

KOL OCH DOLOMIT ANALYSER

Analyses of coal and dolomite

Material		A (Leverans 1)	B (Leverans 2)
<u>Kol</u>			
Fukt	%	2.5	4.2
Flyktiga ämnen	%	37.0	41.2
Aska	%	13.6	12.9
C	%	68.7	67.2
H	%	4.8	4.9
N	%	1.3	1.3
O	%	7.0	9.8
S	%	4.65	4.68
<u>Asksammansättning</u>			
SiO ₂	%	44.4	38.8
Al ₂ O ₃	%	20.0	22.8
Fe ₂ O ₃	%	27.1	29.0
Qgross	MJ/kg	28.3	29.5
<u>Dolomit</u>			
CaO	%	30.6	31.0
MgO	%	20.2	21.6
SiO ₂	%	1.3	—
Al ₂ O ₃	%	0.5	—
Fe ₂ O ₃	%	0.7	0.3

Tabell C1

DRIFTPARAMETRAR UNDER TESTPERIODERNA

Operating conditions during the test periods

Test	Datum	Bäddhöjd (m)	Termisk effekt(MW)	Ca/S (mol/mol)	Tryck (ata)	Bädd- temp (°C)	Bränsle	Total prov- tid (h)
I *								
II	821207	2,6	10,3	1,8			A	12
III	830308-9	4,0	14,9	1,8			A	29
IV	830810	3,3	13,7	2,0	16,0	850	B	100
V:A	830813	2,7	10,2	1,5	11,9	845	B	21
V:B	830814-15	4,1	13,7	1,5	15,5	845	B	32

* Ej fullföljt p g a instabila förhållanden

Tabelle C2

METALLHALTER, TEST II

Metalllevel, Test II

Metall (mg/kg)	Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1	Cyklon 2	Cyklon 3	Exhaust
Arsenik (As)	32±7	23±8	21±5	52±16	60±10	69±24	183±36
Kadmium (Cd)	0,19±0,04	1,06±0,13	0,74±0,22	1,62±0,20	4,87±0,58	5,40±0,71	4,21±0,25
Kobolt (Co)	47±7	11±4	8±1	16±3	26±4	29±4	29±3
Krom (Cr)	22±2	48±8	67±8	84±4	152±10	168±5	209±5
Koppar (Cu)	8±2	17±3	15±5	39±8	50±7	60±11	66±6
Kviksilver (Hg)	0,055±0,019	0,16±0,07	<0,10	0,14±0,08	0,16±0,04	0,52±0,23	0,19±0,08
Mangan (Mn)	162±33	152±22	177±15	519±84	449±23	573±29	471±31
Nickel (Ni)	12±3	12±3	13±3	43±10	64±2	112±9	120±11
Bly (Pb)	11±1	21±4	18±7	43±4	115±7	102±4	102±2
Selen (Se)	1,7±0,8	3,8±1,3	7,8±1,8	4,6±1,7	6,5±1,3	7,6±2,6	18,8±4,0
Vanadin (V)	53±14	480±76	337±59	249±43	63±18	494±82	238±35
Zink (Zn)	19±1	363±155	333±73	667±82	795±48	841±29	884±36

Tabell C3

METALLHALTER, TEST III

Metalllevel, Test III

Metall (mg/kg)	Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1	Cyklon 2	Cyklon 3	Exhaust
Arsenik (As)	22±8	26±8	22±3	48±12*	61±3	100±57*	81±18
Kadmium (Cd)	0,10±0,05	1,10±0,45	0,66±0,14	1,16±0,14	3,04±0,36	3,61±0,60	3,44±0,10
Kobolt (Co)	4±1	1±0,4	6±1	11±1	17±2	25±2	24±2
Krom (Cr)	29±8	54±10	47±8	79±3	124±23	135±35	202±10
Koppar (Cu)	5±1	10±4	10±2	34±3	42±3	41±4	42±1
Kvikksilver (Hg)	0,18±0,05	0,29±0,09	0,24±0,09	0,14±0,03	0,27±0,05	0,33±0,23	0,09±0,03
Mangan (Mn)	158±107	147±24	552±534*	465±109	228±14	233±5	228±10
Nickel (Ni)	9±2	8±3	11±4	45±5	58±13	65±17	88±7
Bly (Pb)	6±1	14±2	22±8	30±7	141±5	153±8	90±9
Selen (Se)	6,4±1,8	17±6	38±14	24±9	59±13	40±20	97±29
Vanadin (V)	16±3	536±97	72±22*	201±43	297±24	141±22	266±56
Zink (Zn)	14±2	414±187	137±14	743±180	600±50*	685±49*	796±120*

* = stor variation i tiden

Tabell C4

METALLHALTER, TEST IV

Metalllevel, Test IV

Metall (mg/kg)	Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1	Cyklon 2	Cyklon 3	Exhaust
Arsenik (As)	5±2	3±1	6±2	16±7	24±6	22±2	25±11
Kadmium (Cd)	1,48±0,15	0,17±0,04	1,50±0,03	2,86±0,07	21,5±0,8	12,9±0,5	13,0±0,7
Kobolt (Co)	8±1	1±1	10±2	14±2	35±2	44±3	65±14
Krom (Cr)	20±3	73±2	52±5	90±5	135±8	186±5	585±102
Koppar (Cu)	26±5	3±1	21±3	39±4	91±2	113±8	119±3
Kvicksilver (Hg)	0,030±0,010	0,04±0,02	0,06±0,04	0,02±0,01	0,15±0,05	0,16±0,03	0,05±0,01
Mangan (Mn)	63±6	198±6	673±131	592±64	337±8	494±18	638±48
Nickel (Ni)	20±3	6±1	17±1	52±19	132±10	94±15	416±39
Bly (Pb)	20±6	4±1	10±1	29±2	123±11	104±19	95±8
Selen (Se)	8±2	8±1	16±1	8±1	10±4	16±6	34±17
Vanadin (V)	86±25	75±18	345±198	248±88	286±26	610±70	490±66
Zink (Zn)	94±10	44±3	147±49	290±15	691±12	589±7	846±8

Tabell C5

METALLHALTER, TEST V:A

Metallevel, Test V:A

Metall (mg/kg)	Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1	Cyklon 2	Cyklon 3	Exhaust
Arsenik (As)	8±1	29±9	24±17*	55±15*	130±8	49±12	148±33*
Kadmium (Cd)	1,99±0,21	2,27±0,03	3,94±0,31	10,2±1,1	26,1±2,4	17,3±0,34	26,1±0,6
Kobolt (Co)	6±1	5±1	9±2	20±2	42±2	33±3	52±8
Krom (Cr)	26±3	11±2	37±10	103±9	98±24	241±47	447±62
Koppar (Cu)	25±2	14±2	33±4	59±13	83±15	155±6	179±13
Kvikksilver (Hg)	0,066±0,028*	0,04±0,02	0,04±0,02	0,03±0,01	0,12±0,03	0,25±0,03	0,10±0,05
Mangan (Mn)	45±7	109±15	186±46*	253±17	372±6	332±8	409±15
Nickel (Ni)	8±1	5±2	25±7	40±13	65±2	124±7	204±14
Bly (Pb)	11±2	7±1	14±3	44±5	136±16	121±13	253±4
Selen (Se)	0,46±0,09	3±1	3±1	2±1	3±0	4±1	6±4
Vanadin (V)	30±4	31±0	160±67	333±45	295±35	338±41	455±11
Zink (Zn)	63±6	22±4	91±12	215±5	603±20	487±3	852±19

*=stor variation i tiden

Tabell C6

METALLHALTER, TEST V:B

Metallevel, Test V:B

Metall (mg/kg)	Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1	Cyklon 2	Cyklon 3	Exhaust
Arsenik (As)	9±1	13±5	13±5	43±6	101±36*	63±15*	133±29
Kadmium (Cd)	1,86±0,15	1,83±0,54	3,52±0,23	7,85±1,89	27,2±3,5	19,1±1,0	28,2±1,4
Kobolt (Co)	5±1	5±1	8±2	18±1	34±3	37±4	51±10
Krom (Cr)	28±3	10±3	26±6	96±7	80±14	239±14	1066±120
Koppar (Cu)	21±3	10±1	44±4	60±14	85±13	147±19	161±28
Kvikksilver (Hg)	0,053±0,027	0,05±0,02	0,05±0,02	0,04±0,02	0,12±0,04	0,14±0,04	0,19±0,04
Mangan (Mn)	41±4	154±46	239±35	265±18	298±9	437±49*	398±24
Nickel (Ni)	8±1	3±2	19±3	34±6	54±11	108±11	822±113
Bly (Pb)	9±2	5±1	11±2	41±5	81±10	93±14	155±28
Selen (Se)	0,41±0,10	3±1	2±1	2±1	3±1	5±2	6±4
Vanadin (V)	51±9	32±10	129±38	323±27	245±50	300±17	342±34
Zink (Zn)	67±9	20±3	83±19*	223±12	689±24	583±41*	731±24

*=stor variation i tiden

Tabell C7

MASSBALANS, TEST II

Massbalance, Test II

Metall/Material		Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1+2+3	Exhaust	Utfall % ut/in
As	mg/MJ	0,18	0,40	0,22	0,51	0,053	50
Cd	µg/MJ	7,0	18,5	7,9	16,4	1,2	100
Co	mg/MJ	(1,73)*	0,19	0,09	0,16	0,008	(13)
Cr	mg/MJ	0,81	0,84	0,72	0,83	0,061	98
Cu	mg/MJ	0,30	0,30	0,16	0,39	0,019	95
Hg	µg/MJ	2,0	2,8	<1	1,4	0,055	30
Mn	mg/MJ	5,98	2,66	1,89	5,10	0,14	83
Ni	mg/MJ	0,44	0,21	0,14	0,43	0,035	93
Pb	mg/MJ	0,41	0,37	0,19	0,44	0,030	85
Se	µg/MJ	63	66	83	46	5,5	104
V	mg/MJ	1,96	8,39	3,60	2,45	0,069	59
Zn	mg/MJ	0,70	6,34	3,56	6,59	0,26	148

* Troligen förorenat

Tabelle C8

MASSBALANS TEST III

Massbalance, Test III

Metall/Material	Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1+2+3	Exhaust	Utfall % ut/in
As mg/MJ	0,83	0,47	0,22	0,40	0,008	48
Cd µg/MJ	3,8	19,9	6,6	9,7	0,35	70
Co mg/MJ	0,15	0,02	0,06	0,09	0,002	89
Cr mg/MJ	1,09	0,98	0,47	0,65	0,020	55
Cu mg/MJ	0,19	0,18	0,10	0,27	0,004	101
Hg µg/MJ	6,80	5,24	2,41	1,17	0,009	30
Mn mg/MJ	5,93	2,65	5,55	3,77	0,023	109
Ni mg/MJ	0,34	0,14	0,11	0,37	0,009	102
Pb mg/MJ	0,23	0,25	0,22	0,26	0,009	102
Se µg/MJ	240	307	382	199	10	108
V mg/MJ	0,60	9,69	0,72	1,65	0,027	23
Zn mg/MJ	0,53	7,49	1,38	6,05	0,080	94

Tabell C9

MASSBALANS TEST IV

Massbalance, Test IV

Metall/Material	Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1+2+3	Exhaust	Utfall i % Ut/in
As mg/MJ	0,19	0,06	0,08	0,14	0,001	88
Cd µg/MJ	56,5	3,7	20,8	26,5	0,7	80
Co mg/MJ	0,31	0,02	0,14	0,12	0,004	80
Cr mg/MJ	0,76	1,58	0,72	0,77	0,032	65
Cu mg/MJ	0,99	0,06	0,29	0,34	0,007	61
Hg µg/MJ	1,15	0,87	0,83	0,18	0,003	50
Mn mg/MJ	2,41	4,29	9,35	4,95	0,035	214
Ni mg/MJ	0,76	0,13	0,24	0,45	0,023	80
Pb mg/MJ	0,76	0,09	0,14	0,26	0,005	48
Se µg/MJ	305	173	221	68	2	61
V mg/MJ	3,28	1,62	4,80	2,10	0,027	141
Zn mg/MJ	3,59	0,95	2,04	2,50	0,046	101

Tabell C10

MASSBALANS, TEST V:A

Massbalance, Test V:A

Metall/Material	Kol	Dolomit	Bäddmassa	Cyklon 1+2+3	Exhaust	Utfall % Ut/in
As mg/MJ	0,30	0,45	0,20	0,42	0,005	83
Cd µg/MJ	76	35	33	79	0,9	102
Co mg/MJ	0,23	0,08	0,07	0,15	0,002	72
Cr mg/MJ	0,99	0,17	0,31	0,78	0,016	95
Cu mg/MJ	0,99	0,22	0,27	0,45	0,006	60
Hg µg/MJ	2,5	0,6	0,3	0,24	0,004	17
Mn mg/MJ	1,71	1,70	1,55	1,92	0,015	101
Ni mg/MJ	0,30	0,08	0,21	0,31	0,007	139
Pb mg/MJ	0,42	0,11	0,12	0,34	0,009	88
Se µg/MJ	17	47	25	15	0,2	63
V mg/MJ	1,14	0,48	1,33	2,51	0,016	238
Zn mg/MJ	2,39	0,34	0,76	1,67	0,031	90

Tabell C11

MASSBALANS TEST V:B

Massbalance, Test V:B

Metall/Material	Kol	Dolmit	Bäddmassa	Cyklon 1+2+3	Exhaust	Utfall % Ut/in
As mg/MJ	0,34	0,20	0,11	0,38	0,006	92
Cd µg/MJ	70	28	30	71	1,2	104
Co mg/MJ	0,19	0,08	0,07	0,16	0,002	86
Cr mg/MJ	1,06	0,15	0,22	0,83	0,044	90
Cu mg/MJ	0,79	0,15	0,37	0,52	0,007	95
Hg µg/MJ	2,0	0,8	0,4	0,4	0,008	29
Mn mg/MJ	1,55	2,38	2,01	2,31	0,017	110
Ni mg/MJ	0,30	0,05	0,16	0,30	0,034	141
Pb mg/MJ	0,34	0,08	0,09	0,36	0,006	109
Se µg/MJ	16	47	17	18	0,2	56
V mg/MJ	1,93	0,50	1,08	2,80	0,014	160
Zn mg/MJ	2,53	0,31	0,70	2,01	0,030	96

Tabell C12

SAMMANSTÄLLNING AV MASSBALANSERNAS UTFALL (%)

Comparison between the outcome of the massbalances (%)

Testomgång/ Metallutfall	Test II	Test III	Test IV	Test V:A	Test V:B
Arsenik (As)	50	48	88	83	92
Kadmium (Cd)	100	70	80	102	104
Kobolt (Co)	(13)	89	80	72	86
Krom (Cr)	98	55	65	95	90
Koppar (Cu)	95	101	61	60	95
Kvicksilver (Hg)	30	30	50	17	29
Mangan (Mn)	83	109	214	101	110
Nickel (Ni)	93	102	80	139	141
Bly (Pb)	85	102	48	88	109
Selen (Se)	104	108	61	63	56
Vanadin (V)	59	23	141	238	160
Zink (Zn)	148	94	101	90	96

Tabell C13

BERÄKNAT BIDRAG FRÅN EXHAUST OM STOFUTSLÄPPET REDUCERAS TILL 20 mg/MJ TERMISK EFFEKT

Heavy metals from exhaust if reduced to 20 mg/MJ thermal power.

Metall	Test II	Test III	Test IV	Test V:A	Test V:B
As $\mu\text{g}/\text{MJ}$	3,6	2	0,2	2,8	2,9
Cd $\mu\text{g}/\text{MJ}$	0,08	0,07	0,15	0,5	0,6
Co $\mu\text{g}/\text{MJ}$	0,5	0,4	0,9	1,1	1,0
Cr $\mu\text{g}/\text{MJ}$	4,2	4,0	7,0	8,9	21
Cu $\mu\text{g}/\text{MJ}$	1,3	0,8	1,5	3,3	3,3
Hg $\mu\text{g}/\text{MJ}$	0,004	0,002	0,0007	0,002	0,004
Mn $\mu\text{g}/\text{MJ}$	9,6	4,6	7,7	8,3	8,1
Ni $\mu\text{g}/\text{MJ}$	2,4	1,8	5,1	3,9	16
Pb $\mu\text{g}/\text{MJ}$	2,1	1,8	1,1	5,0	2,9
Se $\mu\text{g}/\text{MJ}$	0,4	2,0	0,4	0,1	0,1
V $\mu\text{g}/\text{MJ}$	4,7	5,4	5,9	8,9	6,7
Zn $\mu\text{g}/\text{MJ}$	18	16	10	17	14

Tabell C14

VARIATIONER AV METALLHALTER HOS KOLET I TEST III

Variation of metals in coal during Test III

Metall (mg/kg) Tid (h)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Se	V	Zn
T	16	0,05	4	30	4	0,706	92	9	5	8	17	15
T + 5	20	0,11	3	26	5	0,252	106	8	6	5	17	14
T + 10	18	0,15	4	29	7	0,188	271	11	7	7	18	16
T + 15	25	0,11	5	30	5	0,108	240	10	7	6	15	14
T + 20	33	0,11	4	30	5	0,124	88	10	7	7	15	13
Medelvärde:	22	0,10	4	29	5	0,18	158	9	6	6,4	16	14
Standardavvikelser:												
S ₁ (tid)	5,6	0,023	<0,1	<0,1	0,6	0,04	82	0,7	0,6	0,5	<0,1	0,8
S ₂ (analys)	5,2	0,039	1,0	8,3	0,7	0,03	70	1,6	1,1	1,7	3,4	1,6
S (total)	7,7	0,046	1,0	8,3	0,9	0,05	107	1,7	1,3	1,8	3,4	1,8

Tabell C15

VARIATION AV METALLHALTEN HOS DOLOMITEN I TEST III

Variation of metals in dolomite during Test III

Metall (mg/kg) Tid (h)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Se	V	Zn
T	23	1,16	1	49	12	0,36	125	9	15	17	532	564
T + 5	31	1,56	1	63	13	0,20	172	11	16	24	758	452
T + 10	22	1,00	2	48	8	0,24	161	8	12	13	562	472
T + 15	31	1,07	1	46	7	0,38	132	7	13	14	472	341
T + 20	32	0,52	1	64	12	0,26	149	6	14	19	572	152
Medelvärde:	26	1,10	1	54	10	0,29	147	8	14	17	536	414
Standardavvikelser:												
S ₁ (tid)	1,1	0,33	<0,1	8,1	2,0	0,06	17	1,3	1,2	3,1	<10	143
S ₂ (analys)	7,8	0,30	0,4	5,9	3,1	0,07	18	2,6	1,8	5,3	97	120
S (total)	7,9	0,45	0,4	10,0	3,7	0,09	24	2,9	2,2	6,1	97	187

Tabell D1

EPA LAKNING, Test II

EPA shaking, Test II

	<u>Utlakat (µg/kg):</u>						<u>Utlakat i % av utgångsmaterialet</u>					
	K	D	BM	C1	C2	C3	K	D	BM	C1	C2	C3
As	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cd	1,03	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Co	24	<1	<1	<1	<1	<1	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cr	23	<1	<1	3	5	7	0,10	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cu	4	<1	4	3	<1	2	0,05	<0,01	0,03	0,01	<0,01	<0,01
Hg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mn	4007	1	<1	<1	4	6	2,47	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ni	46	<1	<1	9	<1	<1	0,38	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01
Pb	12	17	17	25	32	26	0,11	0,08	0,09	0,06	0,03	0,03
Se	<1	<1	<1	10	<1	3	<0,01	<0,01	<0,01	0,22	<0,01	0,04
V	<50	50	73	282	50	62	<0,01	0,01	0,02	0,11	0,08	0,01
Zn	216	18	23	18	14	15	1,14	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01

K=Kol BM=Bäddmassa C2=Cyklon 2

D=Dolomit C1=Cyklon 1 C3=Cyklon 3

Tabelle D2

EPA LAKNING, Test III

EPA shaking, Test III

Utlakat (µg/kg):								Utlakat i % av utgångsmaterialet:							
	K	D	BM	C1	C2	C3	Exh		K	S	BM	C1	C2	C3	Exh
AS	<1	<1	<1	<1	69	65	272		<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,11	0,07	0,34
Cd	0,58	<0,1	<0,1	<0,1	69	65	19,10		0,58	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,11	0,53
Co	37	2	1	1	<1	2	135		0,93	0,20	0,02	0,01	<0,01	0,01	0,56
Cr	8	<1	35	<1	5	9	913		0,03	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	0,01	0,45
Cu	<1	<1	<1	2	7	6	489		<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,02	0,01	1,16
Hg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5		<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mn	648	123	1	<1	108	232	251		0,41	0,08	<0,01	<0,01	0,05	0,10	0,11
Ni	42	6	16	1	1	1	865		0,47	0,08	0,15	<0,01	<0,01	<0,01	0,98
Pb	7	16	18	13	32	35	107		0,12	0,11	0,08	0,04	0,02	0,02	0,12
Se	<1	5	<1	<1	<1	12	169		<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,17
V	424	60	<50	<50	81	<50	<50		2,65	0,11	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01
Zn	56	81	21	28	23	17	299		0,40	0,02	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,04

K=Kol C1=Cyklon 1 Exh=Exhaust

D=Dolomit C2=Cyklon 2

BM=Bäddmassa C3=Cyklon 3

Tabell D3

EPA LAKNING, Test IV
EPA shaking, Test IV

	<u>Utlakat (ug/kg):</u>						<u>Utlakat i % av utgångsmaterialet:</u>					
	K	D	BM	C1	C2	C3	K	D	BM	C1	C2	C3
As	22	18	12	13	28	33	0,44	0,45	0,20	0,09	0,12	0,15
Cd	35,4	0,12	0,14	0,12	0,25	0,31	2,48	0,04	0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Co	160	5	5	4	6	5	1,78	0,17	0,06	0,03	0,02	0,01
Cr	1	<1	11	<1	18	13	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,01	0,01
Cu	239	6	14	10	19	23	0,96	0,12	0,06	0,02	0,02	0,02
Hg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mn	1996	10	1	2	6	7	2,81	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ni	291	31	36	46	28	29	1,46	0,28	0,23	0,10	0,02	0,03
Pb	5	6	7	5	9	11	0,02	0,07	0,07	0,01	0,01	0,01
Se	36	54	54	54	157	411	0,45	0,77	0,42	0,54	1,57	2,57
V	154	46	158	232	148	332	0,20	0,05	0,11	0,08	0,05	0,05
Zn	3973	10	10	6	7	7	4,05	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

K=Kol BM=Bäddmassa C2=Cyklon 2

D=Dolomit C1=Cyklon 1 C3=Cyklon 3

EPA shaking, Test V

	Utlakat (µg/kg) :						Utlakat i % av utgångsmaterialet:*					
	K	D	BM	C1	C2	C3	K	D	BM	C1	C2	C3
As	64	81	54	67	135	37	0,80	0,54	0,42	0,14	0,13	0,06
Cd	39,5	4,4	3,6	3,4	7,5	71,1	2,05	0,22	0,10	0,04	0,03	0,38
Co	133	10	9	8	10	129	2,66	0,20	0,11	0,04	0,03	0,36
Cr	62	1	65	76	74	69	0,23	0,01	0,21	0,08	0,09	0,03
Cu	624	9	10	11	23	27	271	0,08	0,03	0,02	0,03	0,02
Hg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mn	1155	18	1	<1	55	230	269	0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,06
Ni	258	26	4	6	10	203	3,23	0,87	0,18	0,02	0,02	0,19
Pb	15	27	9	11	12	6	0,15	0,45	0,08	0,03	0,01	0,01
Se	7	3	9	9	138	220	1,63	0,10	0,45	0,45	4,60	4,40
V	177	173	167	212	356	242	0,41	0,54	0,12	0,06	0,14	0,08
Zn	2714	13	12	11	11	78	4,18	0,06	0,01	0,01	<0,01	0,01

K=Kol
D=Dolomit

BM=Bäddmassa
C1=Cyklon 1

C2=Cyklon 2
C3=Cyklon 3

*) Medelvärde av test V:A och V:B

Tabell D5

JÄMFÖRELSE MELLAN UTLAKAD METALL FÖR DE OLIKA EPA-LAKNINGARNA

Comparison between leached metal from the different shaking tests

	Medelvärde för utlakad metall från Test II och III (µg/kg)						Medelvärde för utlakad metall från Test IV och V (µg/kg)						Utlakat i % från Test II och III jämfört med Test IV och V:					
	K	D	BM	C1	C2	C3	K	D	BM	C1	C2	C3	K	D	BM	C1	C2	C3
As	<1	<1	<1	<1	35	33	43	50	34	40	82	35	-	-	-	-	43	94
Cd	0,81	<1	<1	<1	0,13	1,98	37,5	2,3	1,9	1,8	3,9	35,7	2	-	-	-	3	6
Co	31	1	1	1	<1	2	147	8	7	6	8	67	21	13	14	17	-	3
Cr	16	<1	18	2	5	8	32	1	38	38	46	41	50	-	47	5	11	20
Cu	2	<1	2	2	4	4	432	8	12	11	21	25	<1	-	17	18	19	19
Hg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	-	-	-	-
Mn	2328	62	1	<1	56	119	1576	14	1	1	31	119	148	443	100	-	181	100
Ni	44	3	8	5	1	1	275	29	20	26	19	116	16	10	40	19	5	1
Pb	10	17	18	19	32	31	10	17	8	8	11	9	100	100	225	238	291	344
Se	<1	3	<1	5	<1	8	22	29	32	32	148	316	-	10	-	16	-	3
V	212	55	37	141	66	31	166	110	163	222	252	287	128	50	23	64	26	11
Zn	136	50	22	23	19	16	3344	12	11	9	9	43	4	417	200	256	211	37

K=Kol

BM=Bäddmassa

C2=Cyklon 2

D=Dolomit

C1=Cyklon 1

C3=Cyklon 3

Tabell D6

HYGIENISKA GRÄNSVÄRDEN I DRICKSVATTEN $\mu\text{g/l}$

Drinking water standards $\mu\text{g/l}$

Metall:	Sverige *	EPA **	EG*	Maximalt tillåten utlakning enl EPA **
Arsenik (As)	200	50		500
Kadmium (Cd)	5	10		100
Krom (Cr)	50	50		500
Koppar (Cu)	50		3000	
Kvicksilver (Hg)		2		20
Nickel (Ni)			50	
Bly (Pb)	10	50		500
Selen (Se)	50	10	10	100

EPA = Environmental Protection Agency

EG = Europeiska gemensamma marknaden

* Muntlig info Statens Livsmedelsverk, Uppsala och
KHM slutrapport, kap 24

** Referens nr 5

Tabell E1

KOLONNLAKNINGSFÖRSÖK

Column leaching experiments

Lakning	Material	Lakvätska ^{**}	Antal bäddvolym
A	aska [*]	I	50
B	"	II	90
C	dolomit	I	70
D	"	II	70
E	kol	I	35
F	"	II	25

* 50 % bäddmaterial + 50 % cyklon-1-aska

** I: 3 mM HNO₃

II: 0.8 mM H₂SO₄ + 0.8 mM HNO₃

Tabell E 2

RESULTAT KOLONNLEAKNING A

Result columnleaching A

Provnummer:	A1	A2	A3	A5	A7	A9	A11	A13	A15	A17	A19	A21	A23	A25	A27	A29	A31	A33
Provomfattning (1):	0,0-0,1	0,1-0,2	0,7-0,9	1,2-1,4	5,3-5,5	6,0-6,2	6,8-7,0	7,4-7,6	12,0-12,2	12,7-12,9	13,5-13,7	14,1-14,3	19,9-20,1	20,9-21,1	21,2-21,4	21,9-22,1	22,5-22,7	23,0-23,2
<u>Analysor:</u>																		
pH	10,4	12,5	12,6	12,6	12,3	12,2	12,2	12,2	12,0	11,9	11,9	11,8	11,1	11,1	11,0	10,7	10,7	10,5
Konduktivitet $\mu\text{S}/\text{cm}$	3730	9200	9620	8900	4980	4660	4470	4360	3720	3370	3200	3160	1980	1210	1560	1480	1430	1370
<u>Metaller: ($\mu\text{g}/\text{l}$)</u>																		
Arsenik (As)	32	19	22	31	17	25	20	23	16	14	25	19	11	16	11	28	11	14
Kadmium (Cd)	4,36	0,53	0,53	0,15	0,18	0,18	0,20	0,13	0,10	0,06	0,18	0,05	0,33	0,25	0,23	0,18	0,25	0,05
Kobolt (Co)	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	4
Krom (Cr)	21	11	0	0	2	2	2	0	1	0	3	1	0	0	0	0	0	0
Koppar (Cu)	22	20	5	4	2	3	2	2	2	0	15	0	0	1	0	0	0	2
Kviksilver (Hg)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Mangan (Mn)	8	2	1	0	1	2	2	1	1	1	2	2	11	11	15	17	21	21
Nickel (Ni)	18	7	10	14	10	7	8	11	12	10	15	5	13	15	12	16	14	13
Bly (Pb)	14	6	4	8	9	5	6	8	10	9	6	8	8	7	10	6	8	6
Selen (Se)	50	20	38	38	32	50	35	26	29	41	29	20	35	32	29	38	32	23
Vanadin (V)	150	150	135	116	107	107	92	82	73	67	67	75	46	39	36	46	101	39
Zink (Zn)	14,9	8,1	10,0	9,2	7,8	5,5	5,6	9,5	5,1	4,8	6,7	6,0	15,6	12,4	14,9	19,8	22,1	16,0

Tabell E 3

RESULTAT KOLONNLEAKNING B

Result columnleaching B

Provnummer:	B1	B2	B3	B5	B7	B9	B11	B13	B15	B17	B19	B21	B23	B25	B27	B29	B31	B33	B35	B37	B39
Provmottattning: (1)	0,0-0,1	0,1-0,2	0,4-0,6	2,9-3,1	3,5-3,7	6,3-6,5	6,9-7,1	7,5-7,7	10,9-11,1	11,8-12,0	12,7-12,9	13,4-13,6	14,3-14,5	20,3-20,5	21,5-21,7	22,3-22,5	23,5-23,7	24,7-24,9	25,9-26,1	26,7-26,9	27,9-28,1
<u>Analys:</u>																					
ph	10,2	12,5	12,6	12,5	12,5	12,2	12,2	12,2	12,0	11,5	11,1	10,4	4,0	3,4	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Konduktivitet $\mu S/cm$	5720	11000	10840	7840	7240	3820	4320	4120	2870	1530	1140	920	820	930	1140	1170	1240	1190	1160	1120	1250
<u>Metaller: ($\mu g/l$)</u>																					
Arsenik (As)	21	21	22	25	11	18	26	3	17	18	14	13	15	13	18	13	15	17	23	21	7
Kadmium (Cd)	11,02	0,74	1,14	0,14	0,10	0,78	0,16	0,14	0,08	1,00	1,16	1,20	0,86	0,66	0,36	0,42	0,26	0,40	0,34	0,32	0,20
Kobolt (Co)	11	9	10	11	11	12	9	8	18	10	11	10	12	10	10	8	13	9	8	9	10
Krom (Cr)	17	6	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Koppar (Cu)	13	4	7	1	1	1	1	1	5	2	3	4	4	4	2	5	4	3	3	3	3
Kvikksilver (Hg)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Mangan (Mn)	12	2	2	2	2	8	2	2	7	9	11	16	27	23	19	11	18	22	20	22	14
Nickel (Ni)	15	10	10	10	10	9	9	9	16	5	12	14	12	10	16	16	11	12	12	13	11
Bly (Pb)	10	11	4	6	5	21	5	6	4	12	13	16	16	13	10	8	6	6	6	6	6
Selen (Se)	71	42	29	32	39	26	35	52	35	58	35	48	26	39	22	75	16	55	26	42	48
Vanadin (V)	403	239	246	224	187	224	172	134	112	389	89	59	59	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
Sink (Zn)	7,9	7,0	8,8	7,2	6,1	23,3	7,0	5,6	10,1	12,6	13,7	14,2	16,6	18,5	16,4	14,0	18,2	16,8	14,5	15,2	12,7

Tabell E 4

RESULTAT KOLONNLEAKNING C

Result columnleaching C

Provnnummer:	C1	C2	C3	C5	C7	C9	C11	C13	C17	C21	C25	C29	C33	C37	C41	C45	C49	C53	C57	C59
Provomfattning: (1)	0,0- 0,1	0,1- 0,2	0,3- 0,4	1,1- 1,3	1,8- 2,0	2,6- 2,8	4,8- 5,0	7,0- 7,2	11,4- 11,6	15,8- 16,0	18,2- 18,4	22,6- 22,8	28,3- 28,5	32,9- 33,1	39,6- 39,8	44,6- 44,8	49,3- 49,5	56,7- 56,9	63,1- 63,3	66,5- 66,7
<u>Analyser:</u>																				
pH	7,1		6,8	6,5	6,8	6,9	6,4	7,7	6,8	6,7	6,1	6,7	6,6	6,4	6,4	6,6	6,4	6,4	6,7	6,7
Konduktivitet µS/cm	660		600	570	570	570	570	560	560	560	530	570	560	560	560	580	560	580	570	580
<u>Metaller: (µg/l)</u>																				
Arsenik (As)	17	20	14	15	15	20	15	5	17	24	18	24	17	31	24	22	15	14	20	20
Kadmium (Cd)	7,79	1,95	0,65	0,37	0,83	0,43	0,26	0,34	0,41	0,41	0,39	0,39	0,41	0,45	0,38	0,67	0,35	0,42	0,39	0,38
Kobolt (Co)	2	3	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
Krom (Cr)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Koppar (Cu)	10	1	1	3	1	3	2	3	3	1	3	2	1	3	2	1	2	3	1	1
Kvikksilver (Hg)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Mangan (Mn)	38	37	25	34	41	44	44	45	40	35	31	32	32	27	24	20	19	25	28	25
Nickel (Ni)	19	15	14	15	13	13	14	14	14	21	13	13	16	13	15	15	12	15	13	16
Bly (Pb)	67	24	9	4	3	5	3	4	4	4	4	5	5	4	4	3	3	4	3	3
Selen (Se)	5	5	7	10	8	2	5	6	13	9	8	8	7	7	5	8	9	13	4	6
Vanadin (V)	104	85	78	67	74	55	70	55	67	72	< 50	52	67	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Zink (Zn)	48,9	24,2	19,1	16,6	17,9	18,9	17,9	16,9	17,6	21,5	18,2	15,8	17,2	19,5	18,5	12,1	17,3	18,3	16,9	15,1

Tabell E 5

RESULTAT KOLONNLEAKNING D

Result columnleaching D

Provnummer:	D1	D2	D3	D5	D7	D9	D11	D13	D15	D17	D19	D21	D23	D25	D27	D31	D35	D39	D41	D43	D45
Provmfattning: (1)	0,0- 0,1	0,1- 0,2	0,6- 0,8	1,3- 1,5	2,2- 2,4	5,4- 5,6	8,9- 9,1	12,1- 12,3	14,8- 15,0	19,3- 19,5	22,5- 22,7	24,4- 24,6	27,6- 27,8	30,8- 31,0	34,0- 34,2	40,2- 40,4	47,1- 47,3	56,5- 56,7	59,7- 59,9	62,9- 63,1	67,5- 67,7
<u>Analyser:</u>																					
pH	7,4		7,0	7,0	7,3	8,2	7,3	7,4	7,0	6,9	7,1	7,9	6,9	7,1	7,2	6,9	6,8	7,4	6,9	6,7	6,7
Konduktivitet $\mu\text{S}/\text{cm}$	600		550	540	530	540	530	530	540	530	550	550	520	520	530	520	530	500	500	500	500
<u>Metaller: ($\mu\text{g}/\text{l}$)</u>																					
Arsenik (As)	27	22	19	22	14	27	22	24	24	16	20	22	19	20	25	14	17	14	19	25	12
Kadmium (Cd)	1,02	7,60	0,25	0,12	0,21	0,16	0,21	0,12	0,23	0,27	0,05	0,36	0,18	0,20	0,29	0,18	0,09	0,14	0,18	0,12	0,16
Kobolt (Co)	3	4	3	3	3	3	2	2	2	3	3	2	4	5	4	3	3	2	3	3	2
Krom (Cr)	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Koppar (Cu)	3	24	4	2	2	3	4	3	2	3	2	3	2	3	5	2	6	5	2	2	3
Kviksilver (Hg)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Mangan (Mn)	23	34	49	63	61	72	63	58	61	52	46	33	41	37	62	38	31	30	29	31	25
Nickel (Ni)	15	16	15	15	12	14	13	11	14	12	11	16	12	14	14	21	12	15	13	14	15
Bly (pb)	8	57	4	5	3	3	1	3	3	8	4	5	4	2	3	3	5	5	2	4	3
Selen (Se)	13	14	10	16	12	12	13	8	10	15	13	14	20	12	7	12	6	9	8	9	21
Vanadin (V)	104	65	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Zink (Zn)	12,6	35,1	11,0	12,2	14,3	14,7	16,2	18,2	16,9	19,7	13,0	13,9	20,6	17,6	20,7	26,0	14,8	14,5	15,0	17,9	16,3

Tabell E 6

RESULTAT KOLONNLEAKNING E

Result columnleaching E

Provnummer:	E1	E2	E3	E5	E7	E9	E11	E13	E15	E17	E19	E21	E23
Provomfattning (l):	0,0- 0,1	0,1- 0,2	1,1- 1,3	2,5- 2,7	5,0- 5,2	8,1- 8,3	12,5- 12,7	16,9- 17,1	21,3- 21,5	25,5- 25,7	30,1- 30,3	33,3- 33,5	36,4- 36,6
<u>Analysör:</u>													
pH	2,3		2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Konduktivitet µS/cm	6900	3600	2800	2100	1650	1750	1750	1750	1750	1750	1740	1700	1680
<u>Metaller: (µg/l)</u>													
Arsenik (As)	772	493	20	38	35	32	47	35	35	17	23	65	29
Kadmium (Cd)	59,74	82,12	54,87	23,93	20,48	11,00	7,58	7,58	6,34	4,99	4,10	3,61	3,91
Kobolt (Co)	613	459	147	60	52	39	32	28	25	19	20	15	18
Krom (Cr)	50	32	9	3	2	1	< 1	1	1	< 1	< 1	1	< 1
Koppar (Cu)	381	301	94	65	65	48	41	39	32	26	24	20	20
Kviksilver (Hg)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Mangan (Mn)	5129	4104	1143	609	415	276	207	178	158	105	85	89	89
Nickel (Ni)	1141	919	284	144	110	59	78	56	47	39	32	27	31
Bly (Pb)	92	18	6	8	2	12	2	3	1	3	2	3	2
Selen (Se)	40	37	19	11	23	16	23	19	11	8	31	11	22
Vanadin (V)	2328	410	184	123	89	82	232	82	61	54	< 50	61	50
Zink (Zn)	1893	8852	3049	982	663	436	309	293	231	191	159	150	146

Tabell E 7

RESULTAT KOLONNLEAKNING F

Result columnleaching F

Provnummer:	F1	F2	F3	F5	F7	F9	F11	F13	F15	F17	F19
Provmfattning: (l):	0,0- 0,1	0,1- 0,2	0,7- 0,9	3,9- 4,1	7,5- 7,7	10,4- 10,6	13,9- 14,1	16,7- 16,9	20,2- 20,4	23,5- 23,7	25,7- 25,9
<u>Analyser:</u>											
pH	2,2		2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4
Konduktivitet $\mu\text{S}/\text{cm}$	8500		5200	2470	2080	1840	1600	1525	1460	1700	1780
<u>Metaller: ($\mu\text{g}/\text{l}$)</u>											
Arsenik (As)	1953	1749	84	39	26	39	29	21	39	29	45
Kadmium (Cd)	99,08	95,62	50,83	11,02	6,08	4,53	3,41	2,97	2,17	2,01	1,80
Kobolt (Co)	498	515	166	54	42	38	27	26	21	20	16
Krom (Cr)	133	121	27	7	4	4	2	1	4	4	4
Kopper (Cu)	777	751	220	59	39	35	33	29	24	28	23
Svikksilver (Hg)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Mangan (Mn)	8395	10584	3016	618	264	307	195	165	125	119	99
Nikkel (Ni)	1429	1779	580	179	93	107	76	63	48	42	42
Bly (Pb)	3	2	4	2	1	2	2	2	2	2	1
Selen (Se)	108	31	20	8	10	11	6	4	7	7	9
Vanadin (V)	674	627	184	99	81	168	78	68	62	56	62
Zink (Zn)	11259	11924	6618	1094	726	513	358	322	225	205	180

Tabell F1

UPPSKATTNING AV YTKONCENTRATION
FÖR OLIKA ELEMENT I FLYGASKA *

Surface concentration of different
elements in fly ash

Element	Total koncentration µg/g	Ytkoncentration i ett 300 Å skikt, µg/g
As	600	1500
Cd	24	700
Co	65	440
Cr	400	1400
Pb	620	2700
S	7100	252000
V	380	760

* Hämtat ur ref 9.

Tabell F2

JÄMFÖRELSE AV UTLAKAD TUNGMETALL FRÅN SKAK-
RESPEKTIVE KOLONNLAKNINGSFÖRSÖK, µg/kg aska

Comparison between leached heavy metal from shake-
and column experiments, µg/kg ash

Metall	Skakförsök BM + C1-aska (mv för test IV)	Kolonnlakning A
Arsenik	200	840
Kadmium	2	13
Kobolt	72	150
Krom	86	31
Koppar	190	53
Mangan	24	750
Nickel	660	460
Bly	100	560
Selen	860	1900
Vanadin	3100	2600
Zink	130	710

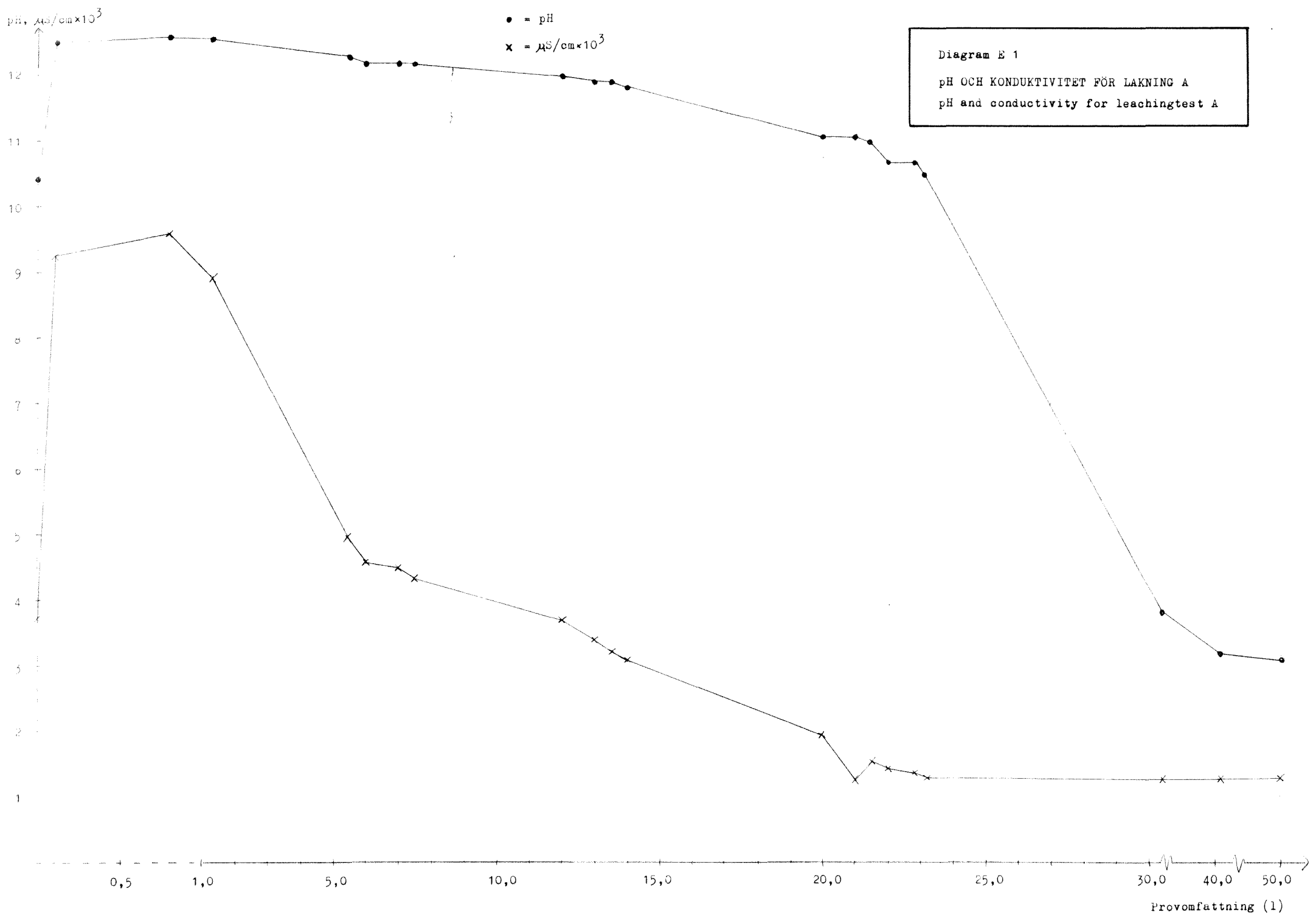
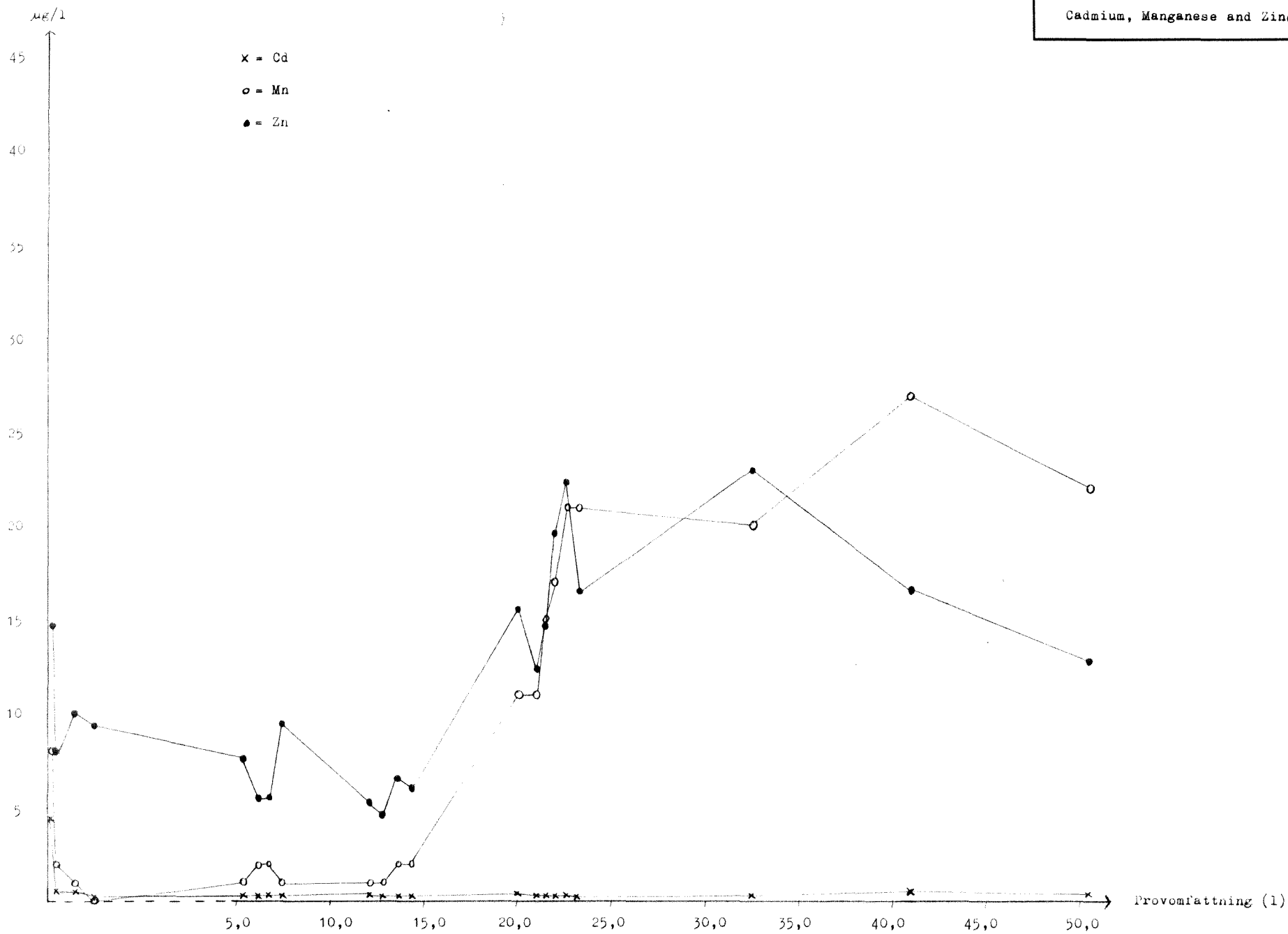
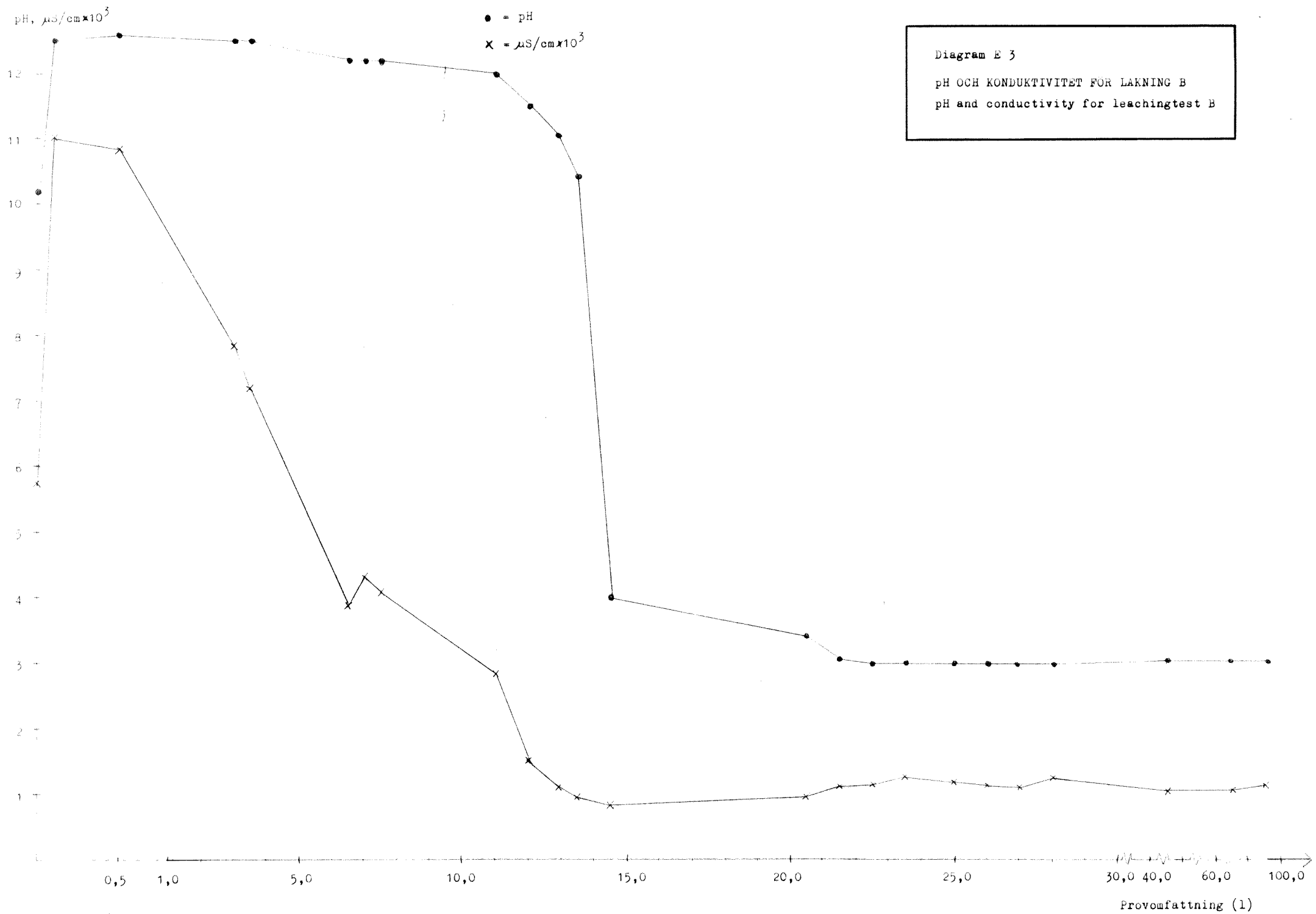


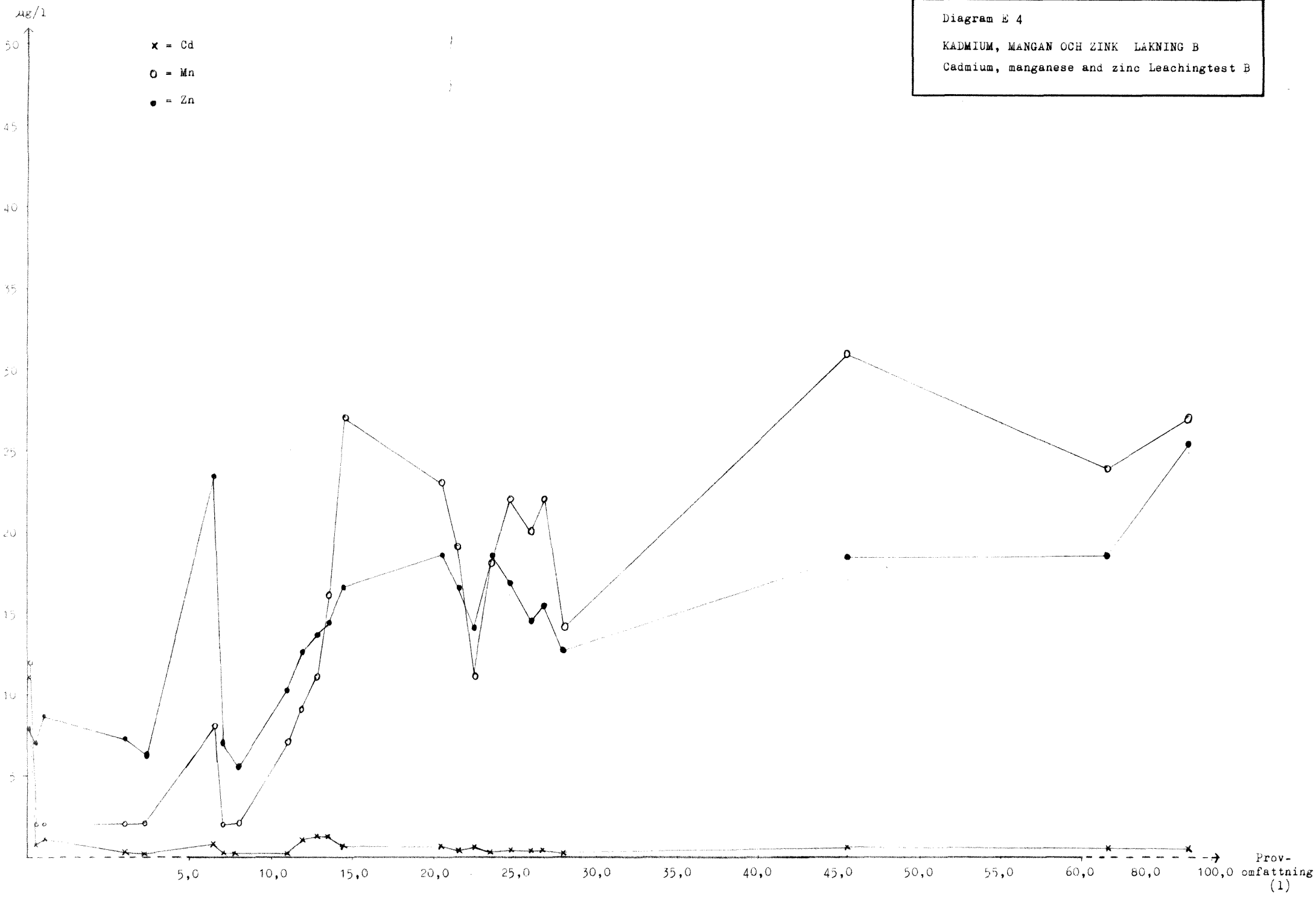
Diagram E 2

KADMIUM, MANGAN OCH ZINK LÄKNING A

Cadmium, Manganese and Zinc leaching test A







pH, $\mu\text{S}/\text{cm} \times 10^3$

4

12

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

• = pH

x = $\mu\text{S}/\text{cm} \times 10^3$

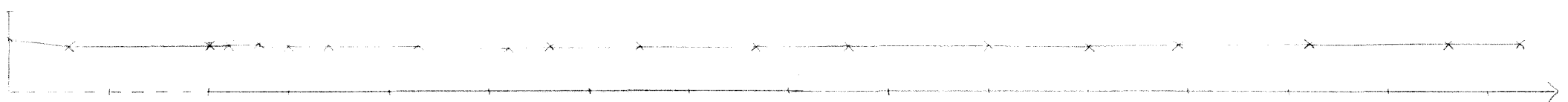
Diagram E 5

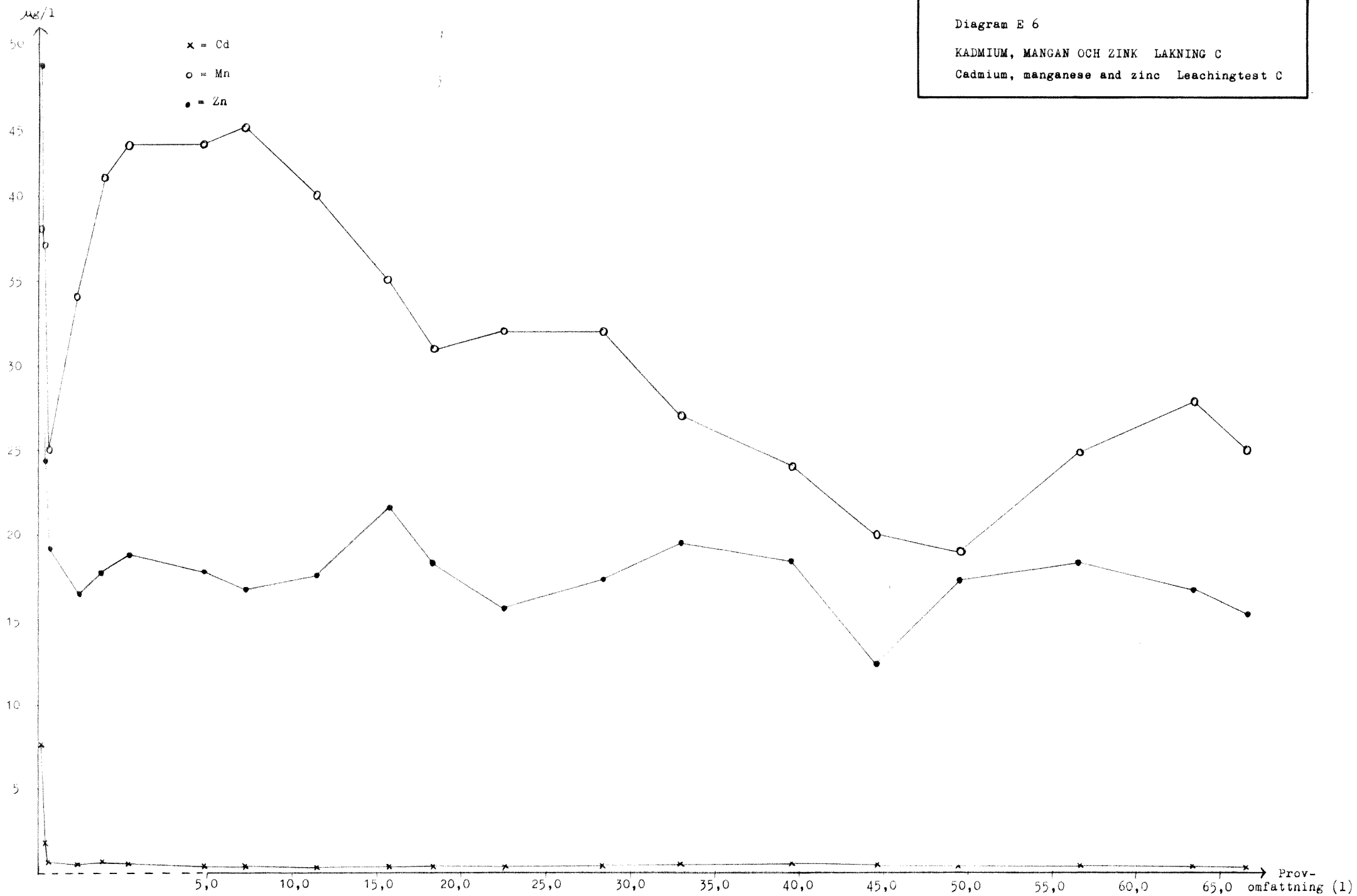
pH OCH KONDUKTIVITET FÖR LÄKNING C

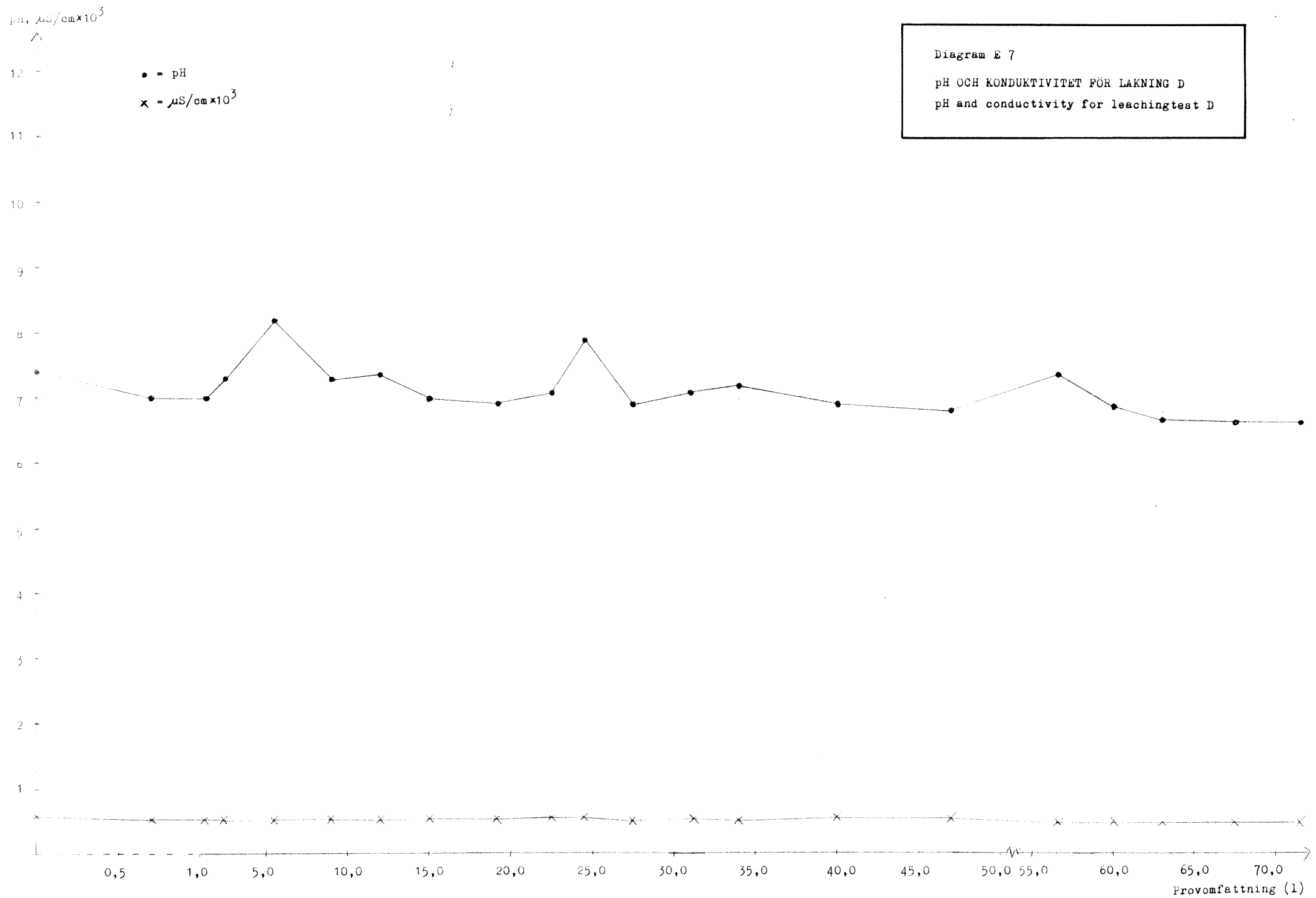
pH and conductivity for leaching test C

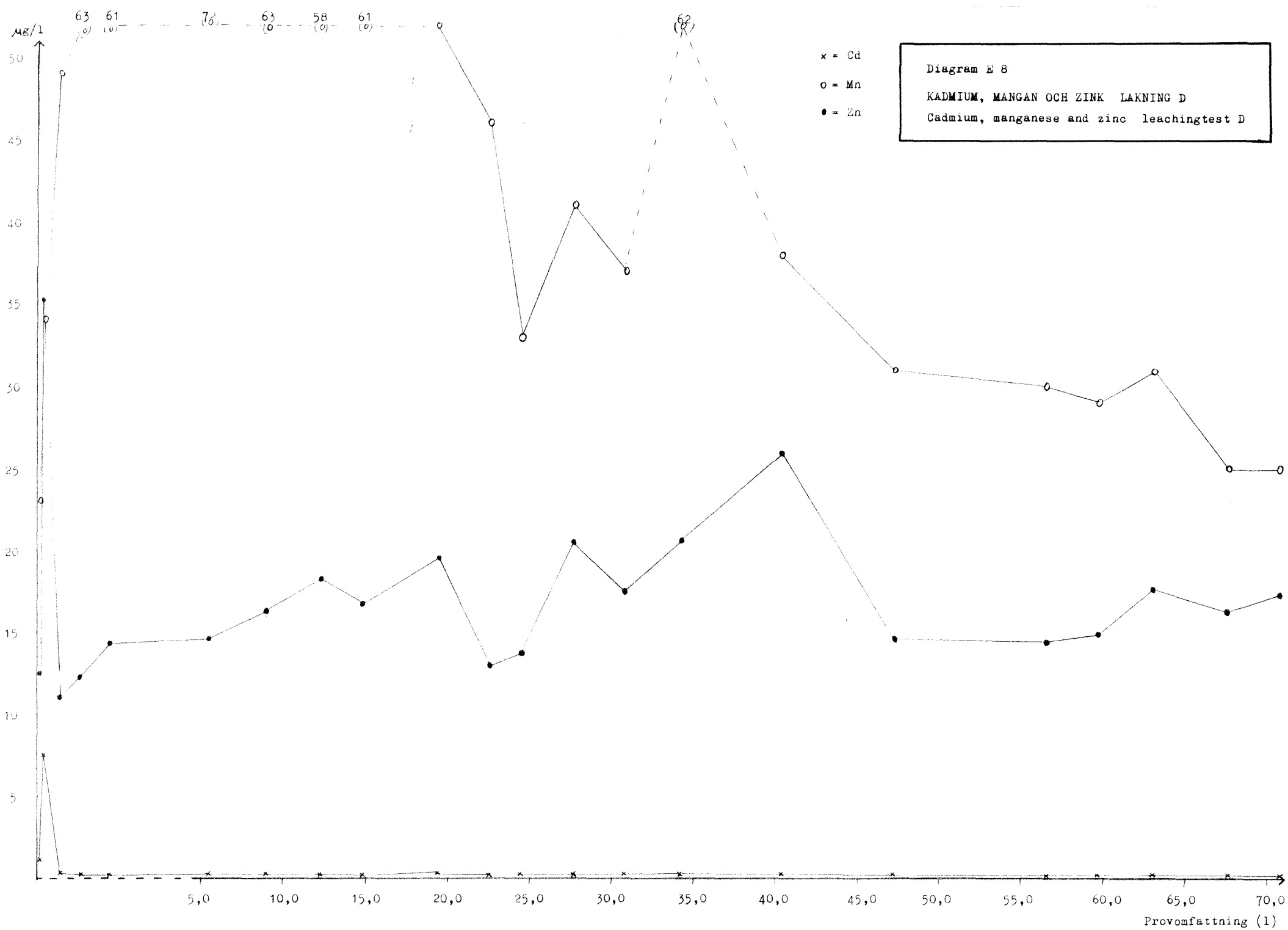
Provomfattning (1)

0,5 1,0 5,0 10,0 15,0 20,0 25,0 30,0 35,0 40,0 45,0 50,0 55,0 60,0 65,0









pH, $\mu\text{S}/\text{cm} \times 10^3$

• = pH

x = $\mu\text{S}/\text{cm} \times 10^3$

Diagram E 9

pH OCH KONDUKTIVITET FÖR LÄKNING E

pH and conductivity for leaching test E

12

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0,5 1,0

5,0

10,0

15,0

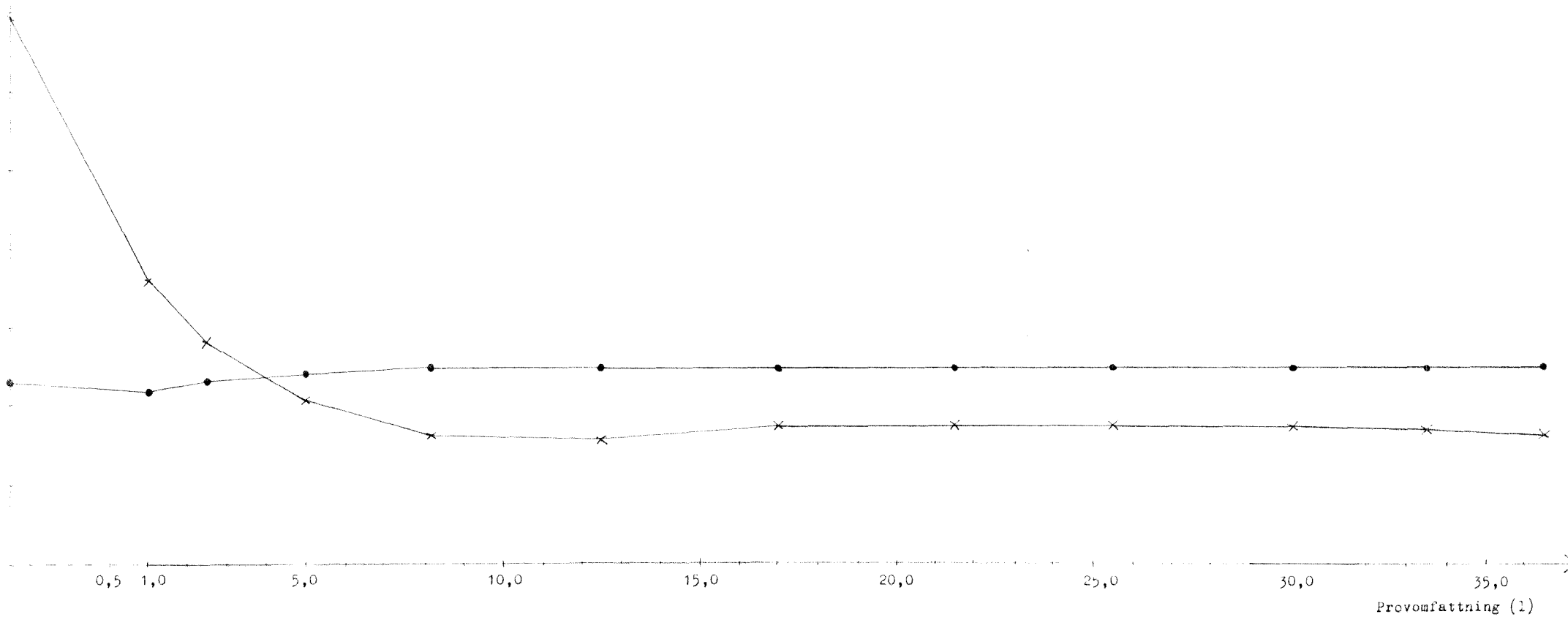
20,0

25,0

30,0

35,0

Provomfattning (l)



x = Cd
o = Pb

$\mu\text{g}/\text{l}$

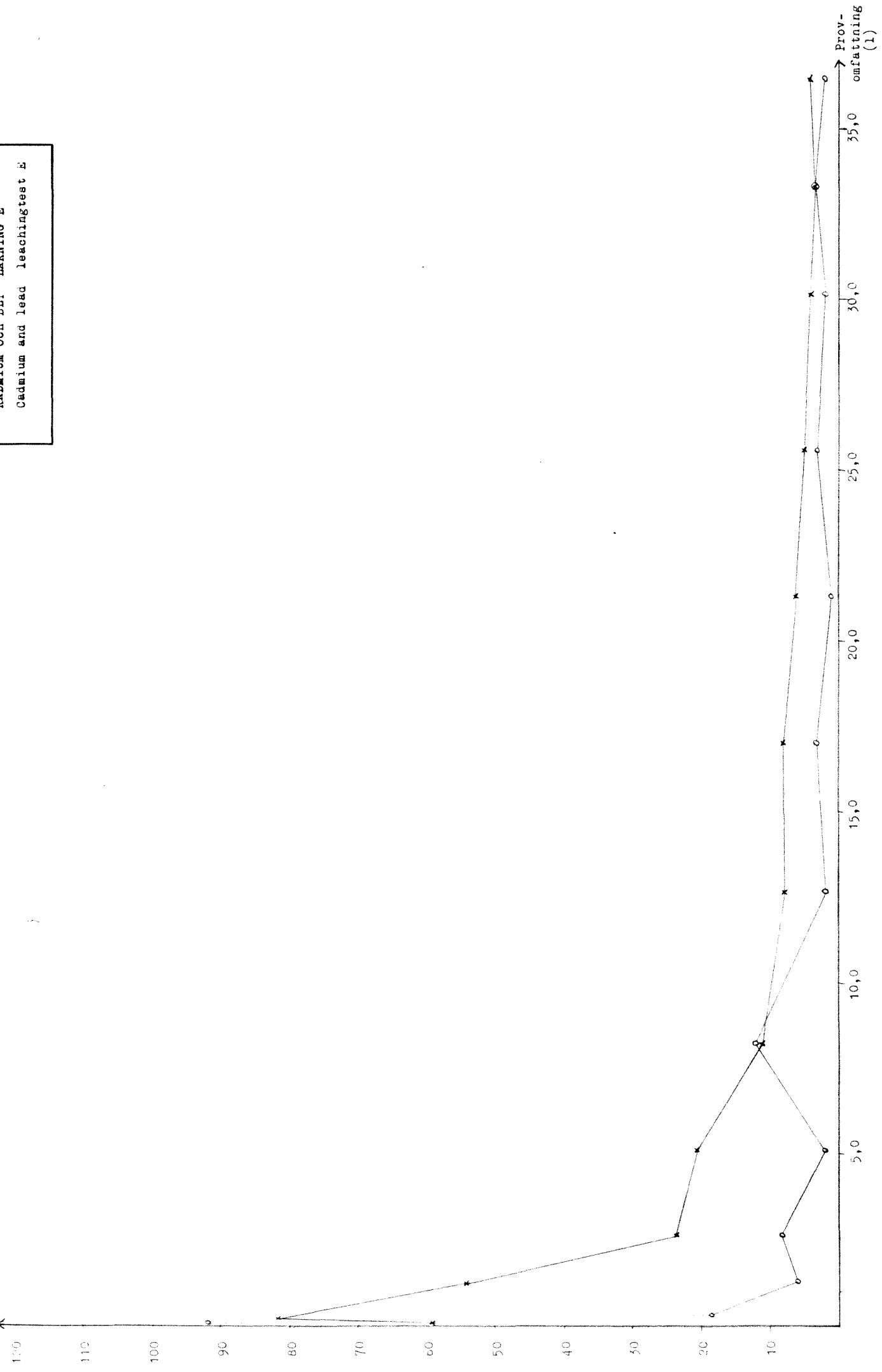
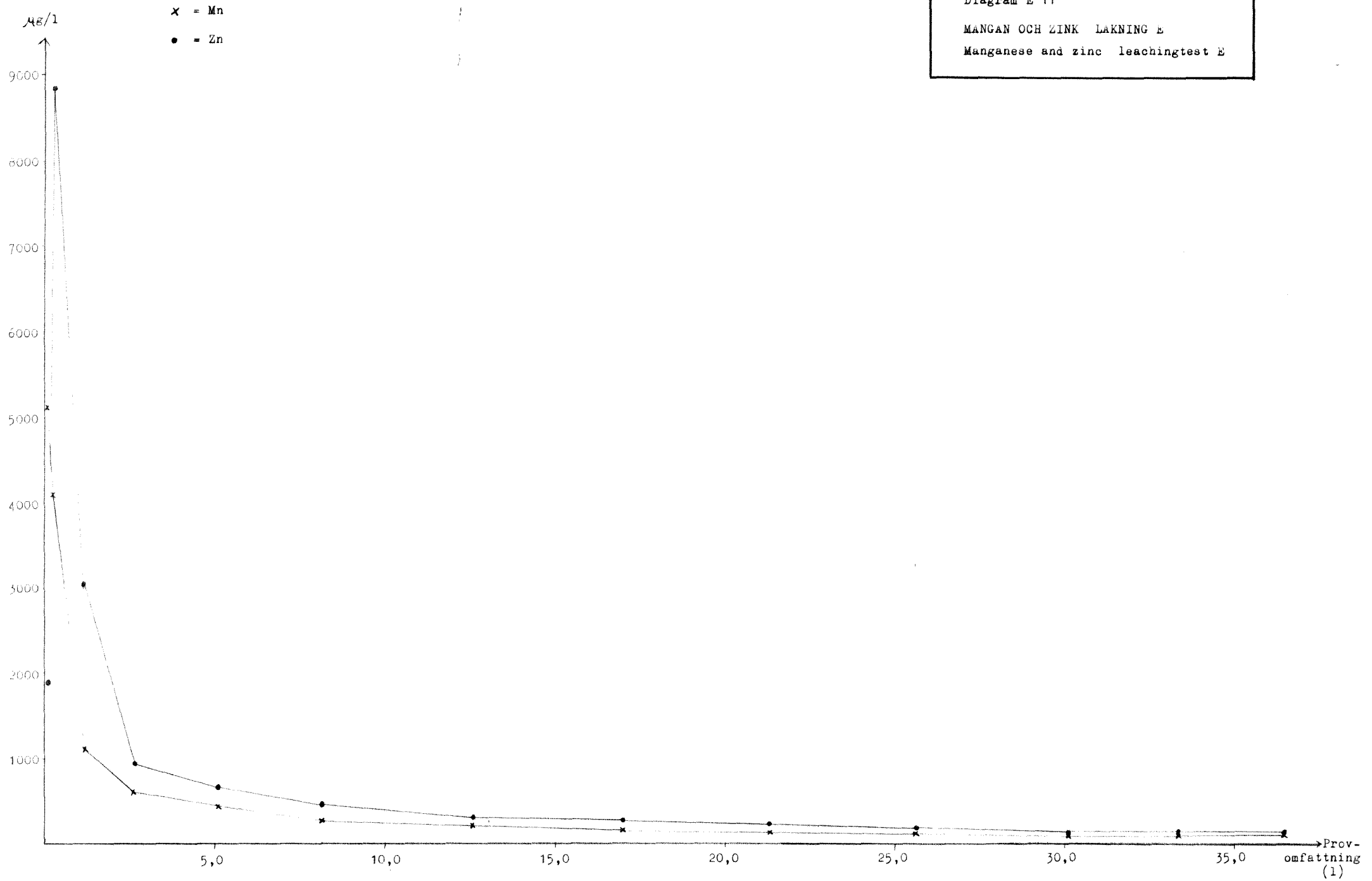


Diagram E 10
KADMIUM OCH BLY LÄKNING E
Cadmium and lead leachingtest E

Diagram E 11

MANGAN OCH ZINK LÄSNING E

Manganese and zinc leaching test E



$\mu\text{S}/\text{cm} \times 10^3$

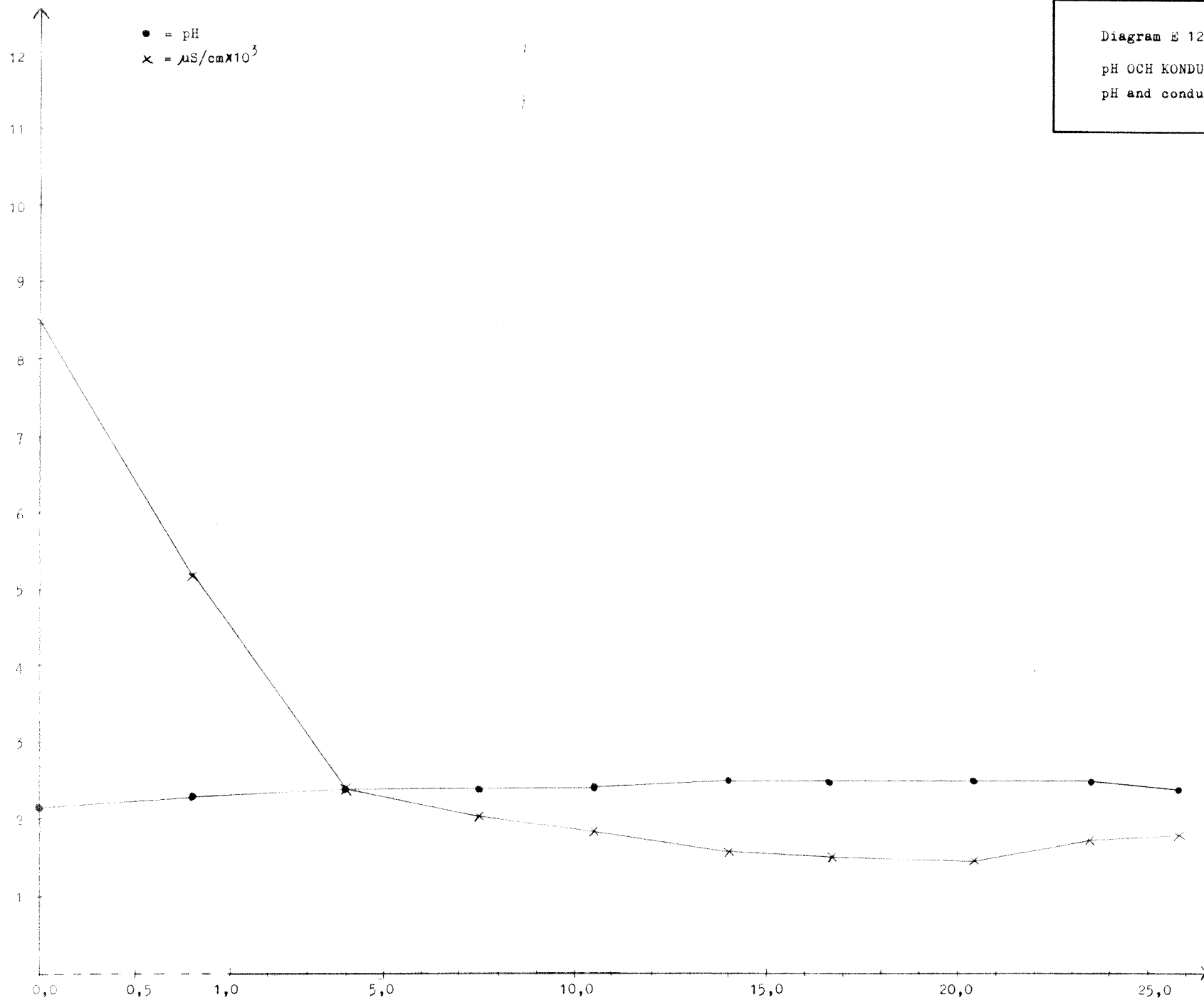
● = pH

× = $\mu\text{S}/\text{cm} \times 10^3$

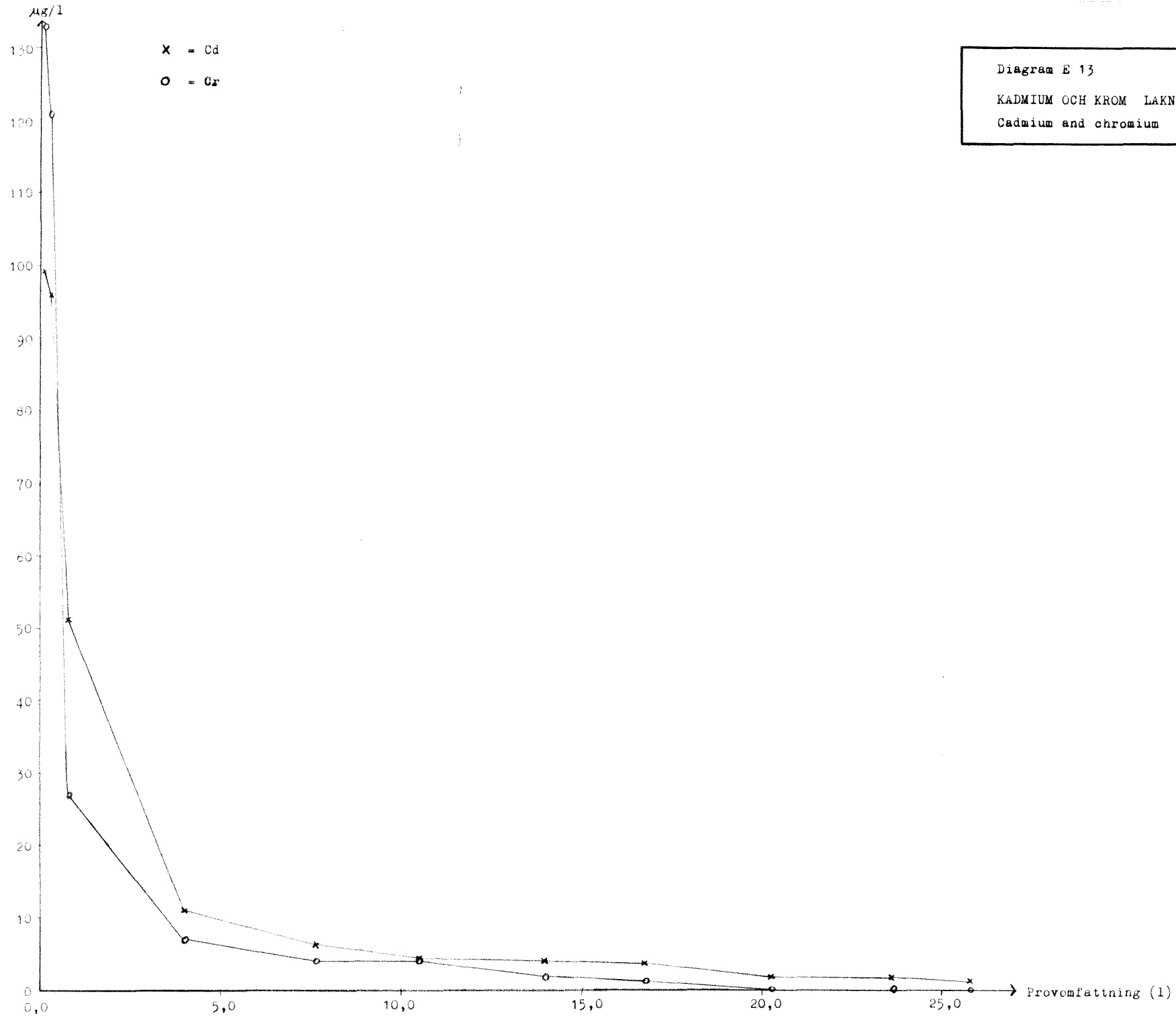
Diagram E 12

pH OCH KONDUKTIVITET FÖR LÄKNING F

pH and conductivity for leaching test F



Provmängd (l)



x = Mn
• = Zn

$\mu\text{g/l}$

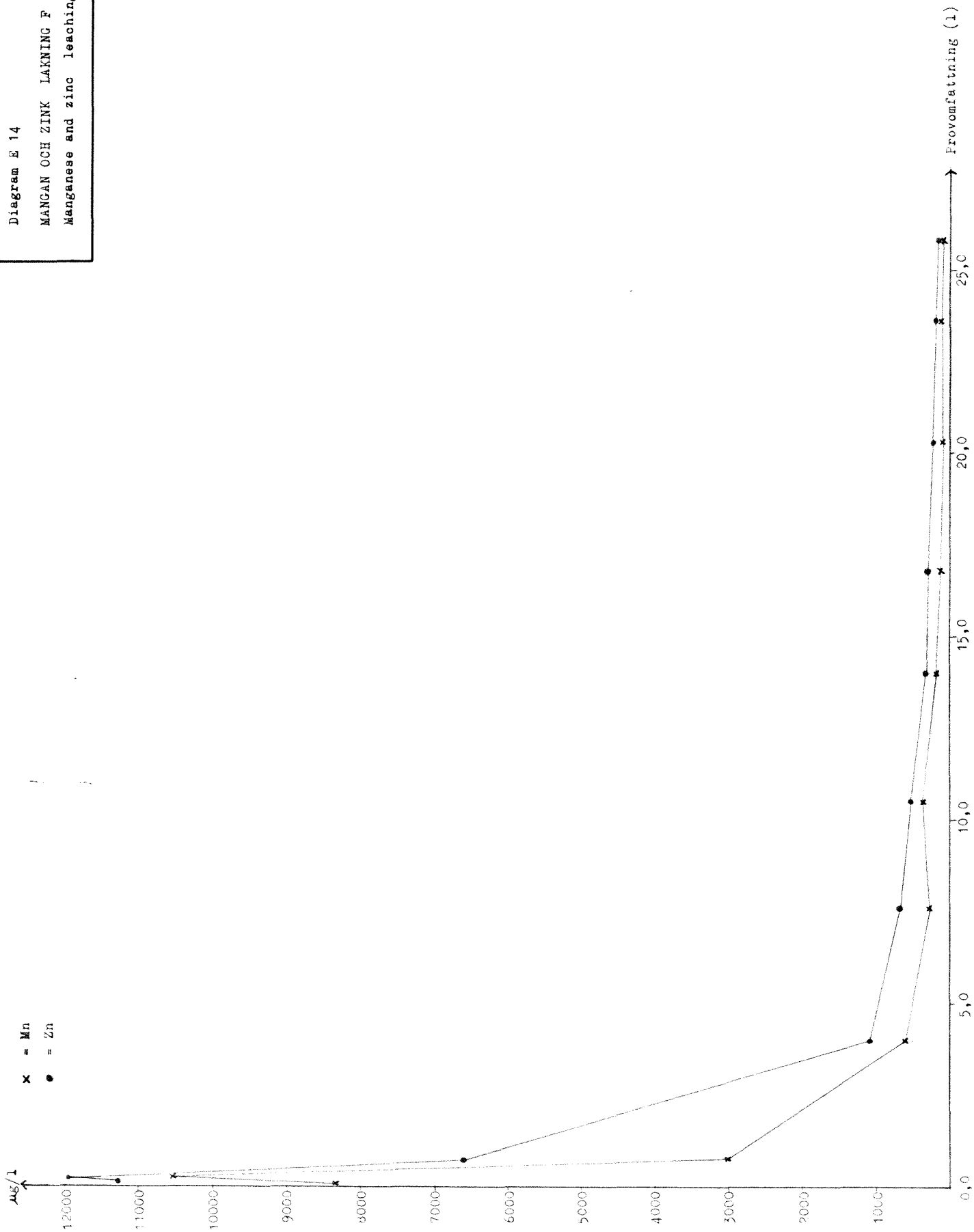


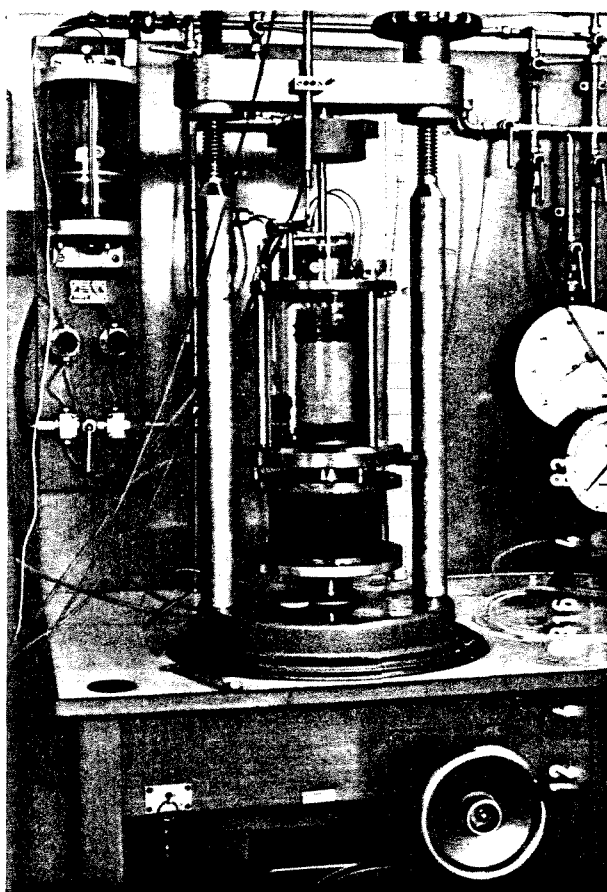
Diagram E 14

MANGAN OCH ZINK LÄKNING F

Manganese and zinc leachingtest F

CODEN : LUTVDG / (TVGT - 7009) / 1 - 21 / (1983)

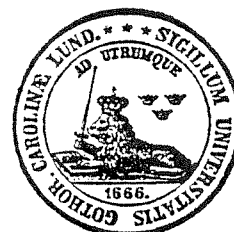
**GEOTEKNISKA EGENSKAPER
HOS RESTPRODUKTER
FRÅN PFBC-ANLÄGGNINGEN
VID ÖRESUNDSVERKET**



GISLI H GUDMUNDSSON
BO S MALMBORG

INTERN RAPPORT TVGT-7009

LUND 1983



FÖRORD

Denna rapport redovisar undersökning som har utförts vid avdelningen för Geoteknik, Tekniska Högskolan i Lund, på uppdrag av SVF genom Sydkraft AB. Tidigare har avd för Geoteknik utfört andra undersökningar av tekniska egenskaper hos restprodukter som uppkommer vid förbränning av kol inom projektet Kol-Hälsa-Miljö, och tidigare uppdrag av Sydkraft.

Alla som hjälpt till under arbetets gång får varmt tack. Civ ing Clas Ingers och Civ ing Lars-Erik Johannesson, båda verksamma vid avd för Geoteknik, har såväl ställt upp med råd vid försöken som korrekturläst rapporten. Christer Nilson hos Sydkraft har bidragit med fakta om restprodukternas kemiska bakgrund.

LUND i december 1983.

Gisli H Gudmundsson

Bo S Malmborg

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

sid

Förord

Innehållsförteckning

Sammanfattning

1. Inledning		1
2. Utförande		2
3. Resultat		8
4. Resultatdiskussion		19
5. Slutsatser		21

Referenslista

SAMMANFATTNING

TITEL

Geotekniska egenskaper hos
restprodukter från PFBC-anläggningen
vid Öresundsverket.

Av Gisli H Gudmundsson och Bo S Malmberg

INLEDNING

Ett utnyttjande av restprodukter från kolförbränning för fyllningsändamål, kräver att dessa produkters geotekniska egenskaper klarläggs. Få undersökningar finns gjorda på material från förbränning i fluidiserande bädd. I denna undersökning, som utförts på uppdrag av Sydkraft AB, har två typer av material undersökts. Dessa är ren bäddmassa och en blandning av bäddmassa och cyclonaska.

UTFÖRANDE

Materialen har undersökts med hänsyn till packbarhet, hållfasthet, kompressibilitet, kapilläritet och permeabilitet. Vidare har inverkan av olika lagringstider och vattenkvoter på hållfasthets- och deformationsegenskaper studerats.

RESULTAT

Vid packning erhållen torrdensitet är okänslig för vattenkvotsvariationer. Båda materialen har hög hållfasthet. Hållfastheten tillväxer kraftigt med tiden. En inblandning av cyclonaska i bäddmassan (50/50) medför en förhöjd hållfasthet jämfört med ren bäddmassa. En fyllning av detta material kommer att vara mycket svår-schaktad. Deformationsegenskaper och kompressibilitet kan jämföras med den för sand och grus. Ren bäddmassa har lägre kapillär stighöjd och högre permeabilitet relativt blandningen av bäddmassa och cyclonaska.

1. INLEDNING

Denna undersökning har som syfte att beskriva geotekniska egenskaper hos restprodukter från en trycksatt fluidiserande bädd, s k PFBC. Att känna materialens geotekniska egenskaper är viktigt med hänsyn till deponering och lagring men även vid eventuell användning inom byggnadsmaterialindustrin.

Olika krav ställs på materialegenskaperna, beroende på hur dessa restprodukter kommer att nyttjas. Vid enbart deponering kommer kraven på tekniska egenskaper ej att vara så omfattande, medan långtgående krav ställs om materialet skall användas som fyllning under hus eller i vägbankar. Andra krav tillkommer om material skall användas inom cementindustrin, t ex krav på att restprodukternas egenskaper uppvisar mycket liten variation.

Studien har utförts på restprodukter från en försöksanläggning på Öresundsverket, där kol förbränns under tryck tillsammans med dolomit. Dolomiten utgör grundmaterialet för bädden och fungerar samtidigt som svavelabsorbent. De huvudsakliga restprodukterna, bäddmassa och cyclonaska, är därför kemiskt karakteriserade av sitt innehåll av kalcium och sulfat. I Sverige finns mycket få undersökningar på liknande material gjorda.

Undersökningen gäller dessa två material, dels ren bäddmassa och dels en blandning av bäddmassa och cyclonaska i förhållande 1: 1. Följande geotekniska egenskaper hos materialen har studeras; packbarhet, hållfasthet, kompressibilitet, kapillaritet och permeabilitet.

2. FÖRSÖKENS UTFÖRANDE OCH OMFATTNING

För vardera av de två materialtyperna har följande undersökningar utförts:

1. Kompaktdensitetsbestämningar	4-6 st
2. Bestämning av packningskurva	12 punkter
3. Triaxiella tryckförsök	12 st
4. Kompressionsförsök	12 st
5. Kapillaritetsbestämningar	4-6 st
6. Permeabilitetsbestämningar	8

Försöken har utförts i laboratorium tillhörande avd för Geoteknik. De flest använda försöksrutinerna är standartiserade och finns beskrivna i Svensk standard och SGFs laboratorieanvisningar, se referenslista.

Undersökningen utfördes under tiden dec. 82 - okt. 83.

De i försöksserien varierade parametrarna har varit vattenkvot, packningsgrad och lagringstid. Packningskurvan bestämdes först, och på basis av denna har provkropparna till belastningsförsöken tillverkats. Därvid har vattenkvoten varierats.

Belastningsförsöken har gjorts på provkroppar direkt efter packning (lagringstid 1 dygn) och efter 7 dygns lagring i klimatrium (temperatur 8⁰ C och 90 % relativ fuktighet). Avsikten var att klargöra om hållfasthets-och kompressionsegenskaper förändrades med, från packningstillfället, förfluten tid.

2.1 PACKNINGSKURVA

Packbarheten är väsentlig eftersom materialet vid deponering eller användning som fyllningsmaterial, kommer att behöva packas. Packningskurvan ger kännedom om vid vilken vattenkvot materialet bäst packas. Optimal vattenkvot definieras som den vattenkvot vid vilken det packade materialet vid ett givet packningsarbete erhåller högst torrdensitet. Den därvid erhållna densiteten motsvarar 100 % packningsgrad.

Packningskurvan bestämdes utifrån 12 värden på torrdensitet och tillhörande vattenkvot, bestämda enligt SGFs geotekniska laboratorieanvisningar del 5, tung laboratoriestampning. Materialet packades i fem lager i en cylinder med känd volym (nära 1 dm³). Packningsarbetet åstadkoms med en 4.5 kg hammare, som fick falla fritt 25 gånger på varje lager.

För att en packningskurva skall vara komplett måste mättningslinjen bestämmas. Mättningslinjen representerar det tillstånd i materialet när alla porer eller hålrum mellan mineralkornen är fyllda med vatten. För att kunna bestämma mättningslinjen krävs kännedom om materialets kompaktdensitet. Kompaktdensiteten bestämdes med Pyknometer, enligt SGFs lab. anv., del 7 och Svensk standard SIS 02 71 15.

2.2 TRIAXIELLA TRYCKFÖRSÖK

För att bestämma en jords hållfasthetsegenskaper i laboratorium kan antingen enaxiella eller triaxiella tryckförsök utföras. I denna undersökning har valts att använda triaxiella tryckförsök. Hållfastheten uttrycks då med friktionsvinkel (ϕ') och kohesion (c'), enligt Mohr-Coulombs brotteori.

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\phi')$$

där:

τ = skjuvhållfasthet (kPa)

σ = normalspänning mot brottytan (kPa)

Standard triaxiella tryckförsök utfördes i en cylindrisk cell där provet utsattes för ett allsidigt tryck och belastades axiellt till brott. Pålagd kraft och deformation registrerades kontinuerligt och försöksutvärderingen gjordes med dator. På så sätt erhöles brottspänning samt brottdeformation. Från dessa utvärderas E-modul (sekantmodul). Mohrs hållfasthetsparametrar c' och ϕ' utvärderades ur en grupp om tre försök mellan vilka enbart celltrycket varierats. Utvärderingen gjordes i σ_1 - σ_3 diagram med en linjär regression, under antagande att sambandet mellan huvudspänningarna kan beskrivas av följande ekvation.

$$\sigma_1' = \sigma_3' \cdot \tan^2(45 + \phi'/2) + 2c' \cdot \tan(45 + \phi'/2)$$

där:

σ_1' = axiell brottspänning (största huvudspänningen kPa)

σ_3' = celltryck (minsta huvudspänningen kPa)

Hållfastheten bestämmer tillåtna grundtryck vid eventuell fyllning för husbyggnasändamål. Mohr-Coulombs hållfasthetsparametrar c' och ϕ' används vid framräknande av tillåtna grundtryck vid plattgrundläggning, och då gäller att desto högre c' och ϕ' är desto högre grundtryck kan tillåtas.

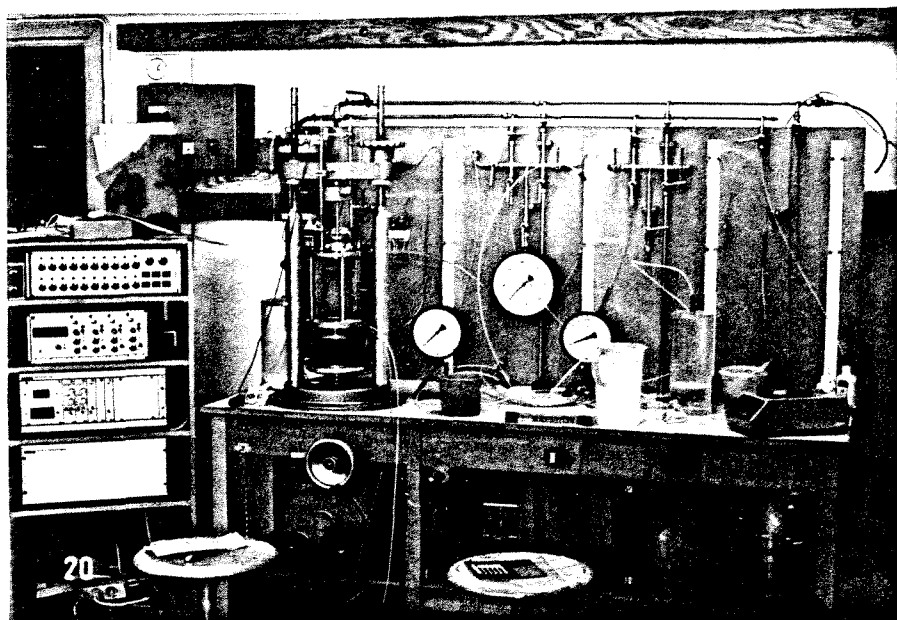


FIG. 1. Försöksutrustning vid triaxiella tryckförsök

Varierade parametrar var lagringstid och vattenkvot. Vid varje kombination av vattenkvot och lagringstid utfördes triaxiella tryckförsök med tre olika celltryck. Dessa var $\sigma_3 = 30, - 60$ och 90 kPa . De triaxiella försöken utfördes på provkroppar med diametern 5 cm och höjden 10 cm . Dessa packades noggrannt i fyra lager så att deras vattenkvot och torrdensitet blev i enlighet med packningskurvan. Samtliga triaxiella försök utfördes dränerade, vilket innebar att vatten kunde avgå från, eller tas upp, av provkroppen under belastningen. För ren bäddmassa valdes deformationshastigheten till 0.49 mm/min och för blandningen till 0.0395 mm/min . Dessa bedömdes tillräckligt långsamma till att säkerställa att inga porvattenövertryck uppstår under skjuvningsfasen.

TABELL 1

Triaxialförsökens omfattning. Antal utförda försök vid respektive kombination av vattenkvot och lagringstid.

Lagring- tid dygn	Bäddmassa		Bäddmassa och cyclonaska		
	Vattenkvot %		Vattenkvot %		
	15	20	9	13	16
1	3	3	3	3	3
7	3	3		3	

2.3 KOMPRESSIÖNSFÖRSÖK

Kompressionsförsök (ödometerförsök) är belastningsförsök ur vilket jordens sättningsegenskaper kan utvärderas. Provet packas i en metallcylinder och belastas axiellt vid förhindrad radiell deformation, vilket simulerar det verkliga sättningförloppet in situ. Försöken utfördes som CRS-försök (constant rate of strain), vilket innebär att provet deformerades med konstant hastighet. Registreringen av, pålagd last, deformation samt i förekommande fall porvattentryck, skedde kontinuerligt och utvärdering gjordes i dator. För ren bäddmassa, valdes deformationshastigheten till 0.033 mm/min och för blandningen av bäddmassa och cyclonaska 0.0056. Provkropparnas diameter var 7.5 cm och höjden 3 cm.

TABELL 2

Kompressionsförsökens omfattning. Antal utförda försök vid respektive kombination av vattenkvot och lagringstid.

Lagrings tid dygn	<u>Bäddmassa</u>			<u>Bäddmassa och cyclonaska</u>		
	<u>Vattenkvot %</u>			<u>Vattenkvot %</u>		
	0	15	20	9	13	16
1	1	1+1	1+1	1+1	1+1	1+1
7	1	1+1	1+1 *		1+1	
14		1	1			

* : def hastighet = 0.027 mm/min

2.4 KAPILLARITET OCH PERMEABILITET

Kapillariteten är ett mått på materialets förmåga att från en fri grundvattenyta suga upp vatten. Den kapillära stighöjden är viktig för material som skall användas i fyllningar. I Svensk Byggnorm (SBN) finns krav på kapillärbrytande skikt i det fall att fyllningsmaterialet under golv har hög kapillär stighöjd. I vägbankar kan kapillära stighöjden ha stor inverkan på tjälfarligheten. Kapillaritesbestämningar har utförts enligt Svensk standard SIS 02 71 12, samt SGFs lab.anv., del 8. Kapillarimeter typ m/50.

Permeabiliteten eller vattengennomsläppligheten är viktig av samma orsaker som kapillariteten. Den uttrycker materialets förmåga att transportera vatten.

Försöksutförande vid permeabilitetsbestämningarna beskrivs i SGFs lab. anv., del 8. Permeabilitetsbestämningar utfördes i triaxialapparat. Vatten drevs genom provkroppen med hjälp av övertryck samtidigt som provet utsattes för ett allsidigt celltryck. Varierade parametrar var lagringstid, vattenkvot samt celltryck σ_3 .

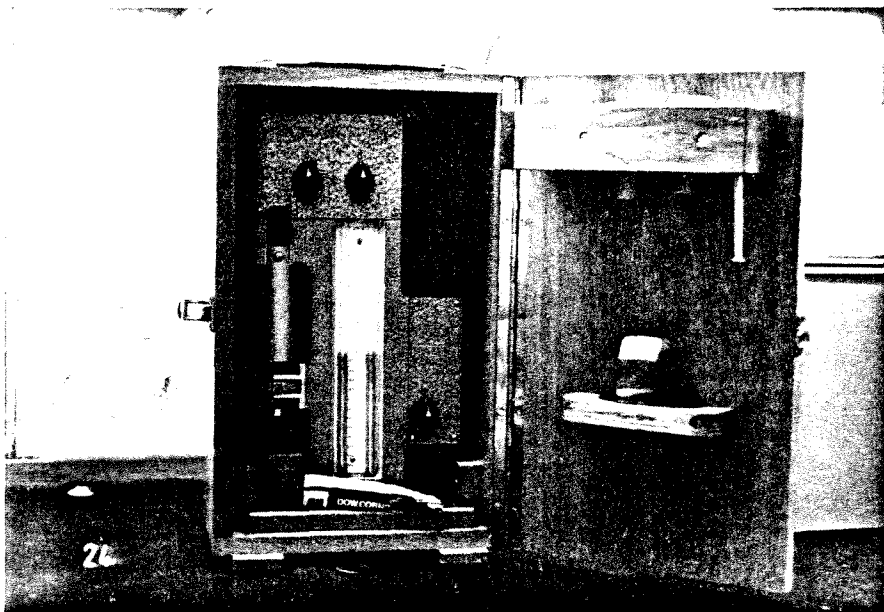


FIG. 2
Kapillärimeter.

3. RESULTAT

3.1 PACKNINGSKURVA

För ren bäddmassa var medelvärdet av sex kompaktdensitetsbestämningar $\rho_s = 3.03 \text{ t/m}^3$. Fyra försök på blandningen av bäddmassa och cyclonaska gav $\rho_s = 3.00 \text{ t/m}^3$. Mättningslinjen angivs i fig 3 med $\rho_s = 3.00 \text{ t/m}^3$.

Som jämförelse så kan nämnas att kompaktdensiteten för vanliga lermineral som Illit och Kaolinit ligger mellan 2.6 och 2.7 t/m^3 . Ett exempel på bergartsbildande lermineral är Amfibol som har en kompaktdensitet mellan 2.8 och 3.4 t/m^3 .

a) Bäddmassa

Packningskurvan har ett mycket flackt förlopp, se fig 3.

Max torrdensitet $\rho = 1.58 \text{ t/m}^3$ vid $w_{\text{opt}} = 20\%$

min $\rho = 1.50$ $w = 15\%$

Enligt detta motsvarar minsta torrdensiteten 95% packningsgrad.

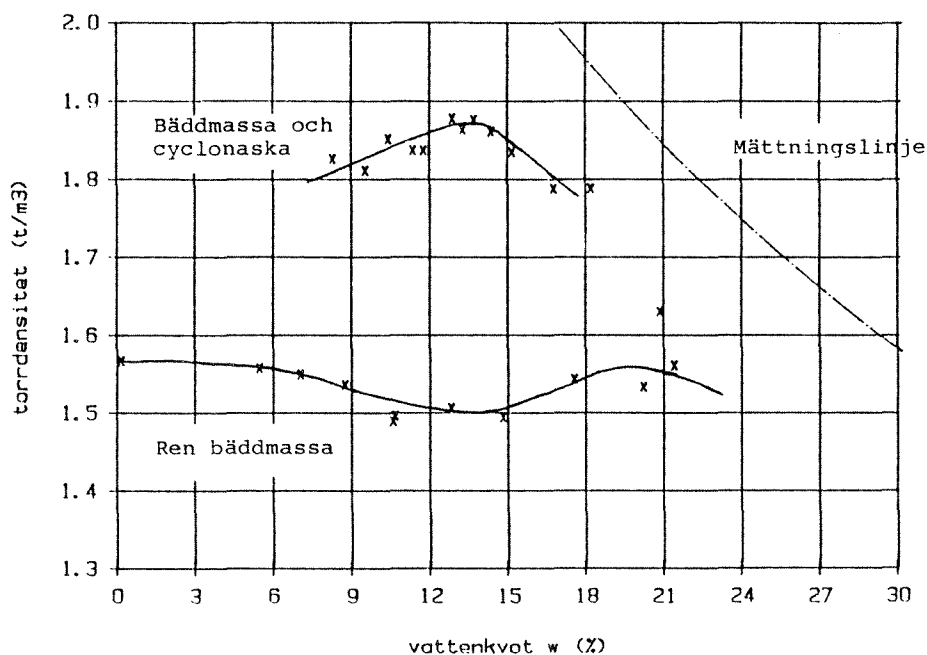


FIG. 3

Packningskurvor.

Anmärkning 1

För varje enskilt prov var det svårt att erhålla förutbestämd vattenkvot, eftersom en del av tillfört vatten försvann, m a o vattenkvoten efter torkning motsvarade ej tillsatt vattenmängd. Detta kan bero på kemiska reaktioner mellan vatten och materialet i provkropparna. Med lite erfarenhet kunde dock förutbestämda vattenkvoter uppnås.

Anmärkning 2

Efter att de första punkterna hade bestämts såg det ut som om det vore en puckel på packningskurvan vid $w = 20 \%$. När punkterna hade tätats visade det sig att torrdensiteten där var lite lägre än den först uppskattade. Den sanna torrdensiteten vid $w_{opt} = 20 \%$ är $\rho = 1.54 \text{ t/m}^3$. När detta upptäcktes hade försöken redan startats, och för att vara konsekvent har $\rho = 1.58 \text{ t/m}^3$ använts genom hela försöksserien. Detta har troligen ingen större betydelse för erhållna resultat.

b) Bäddmassa och cyclonaska

Max torrdensitet $\rho = 1.87 \text{ t/m}^3$ vid vattenkvot $w_{opt} = 13 \%$, se fig 3.

Vid belastningsförsöken packades provkropparna in vid tre olika vattenkvoter, d v s optimal vattenkvot $w = 13 \%$ och $w = 9 \%$ och $w = 16 \%$. Båda dessa motsvarar packningsgrad 98% med $\rho = 1.82 \text{ t/m}^3$.

Den för ren bäddmassa erhållna flacka packningskurvan innebär att materialet kan packas vid valfri vattenkvot med hänsyn till uppnådd torrdensitet.

3.2 TRIAXIALFÖRSÖK

Fig 4 och 5 visar typexempel på arbetskurvor för ren bäddmassa, för provkroppar som skjuvats direkt efter packning och provkroppar som först lagrats 7 dygn. Utifrån erhållna brottvärden har hållfasthetsparametrarna utvärderats. Värdena visas i $\sigma_1 - \sigma_3$ diagram i fig 6. M h a linjär regression anpassades en linje genom de tre punkterna. Denna linje gav hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' . Mohr-Coulombs brottlinje kunde nu bestämmas, se fig 7.

Försöksresultaten sammanfattas i tabell 3 och 4. I tabellerna står σ_1 för axiell brottspänning vid angivet celltryck σ_3 och ϵ_b för motsvarande brottdeformation. E står för elasticitetsmodulen ($E = (\sigma_1 - \sigma_3) / \epsilon_b$) (sekantmodul).

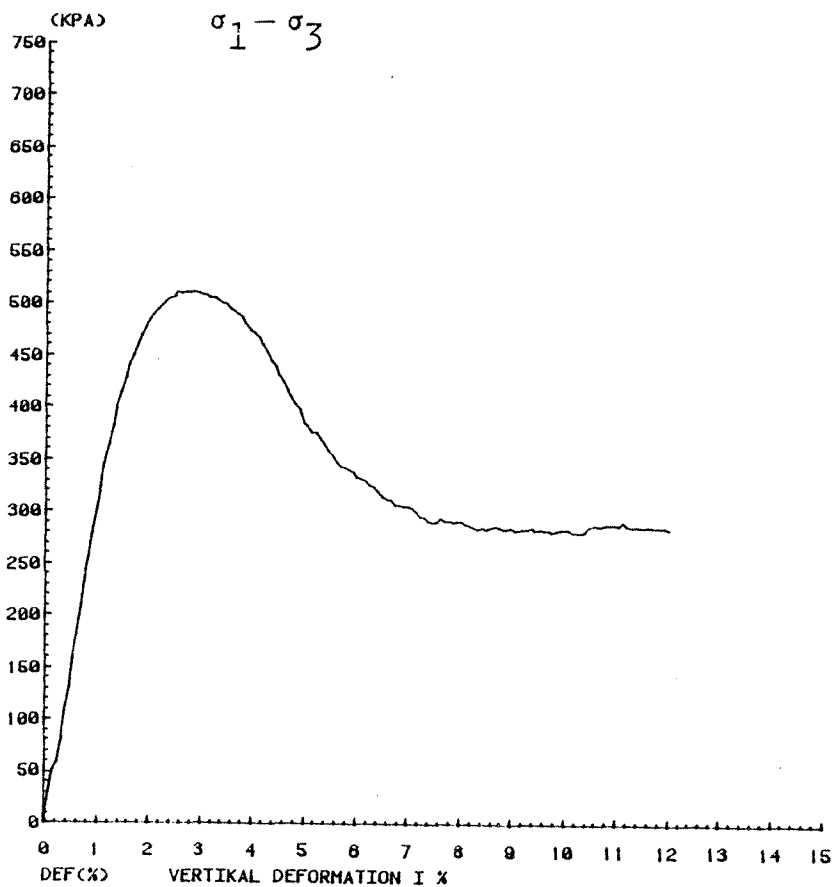


FIG. 4
Arbetskurva från
triaxiella försök.
Ren bäddmassa
packad vid
 $w = w_{opt}$ och
lagringstid 1 dygn.

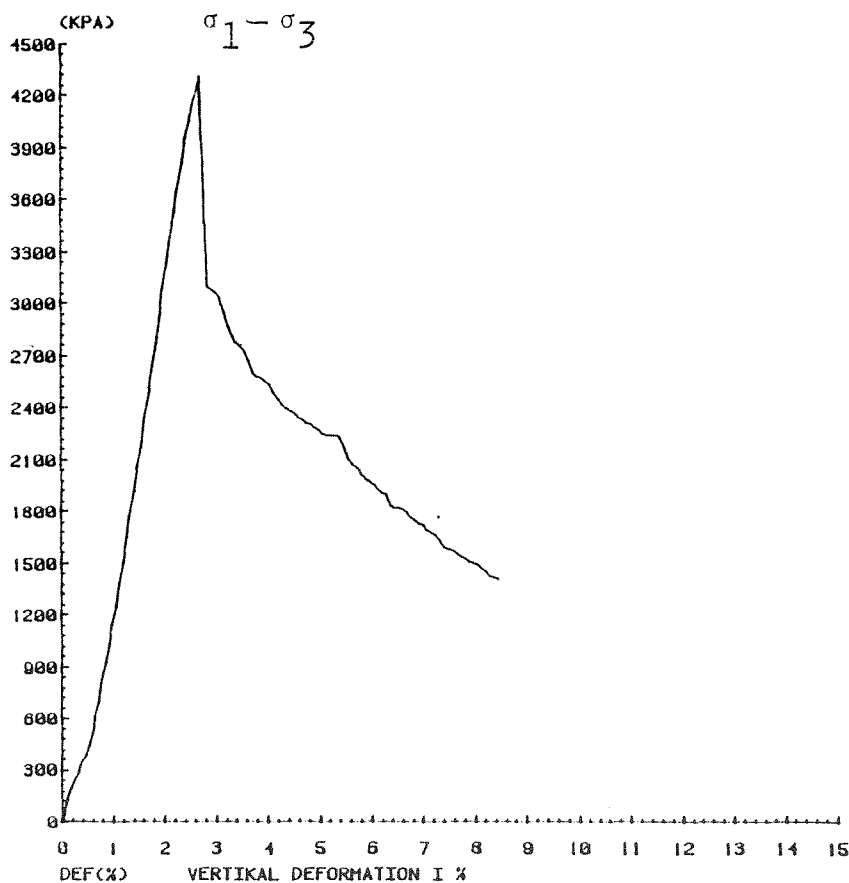


FIG. 5
Arbetskurva från
triaxiella försök.
Ren bäddmassa
packad vid
 $w = w_{opt}$ och
lagringstid 7 dygn.

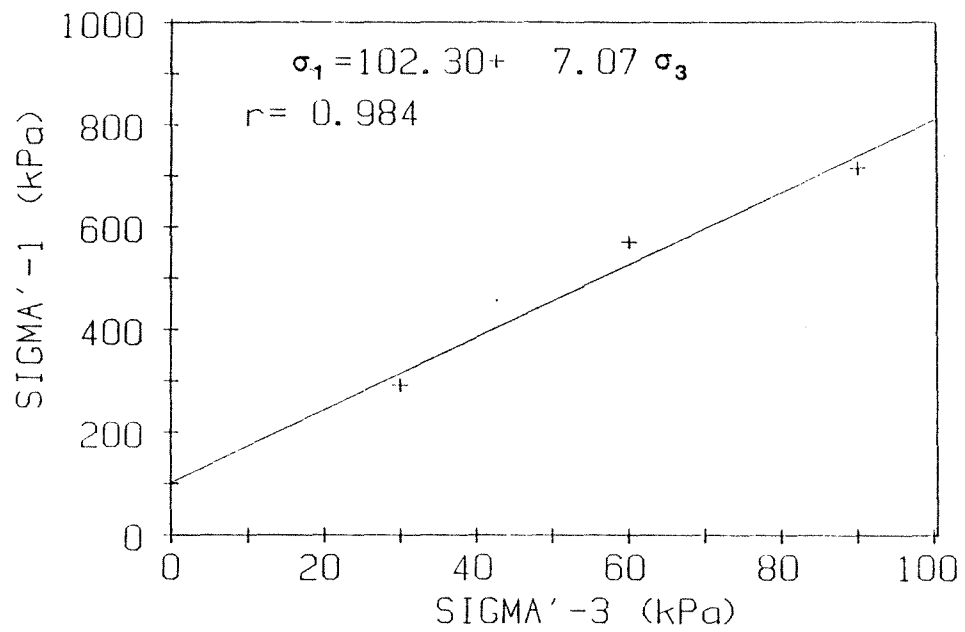


FIG. 6

$\sigma_1 - \sigma_3$ diagram. Ren bäddmassa packad vid
 $w = w_{opt}$ och lagringstid 1 dygn.

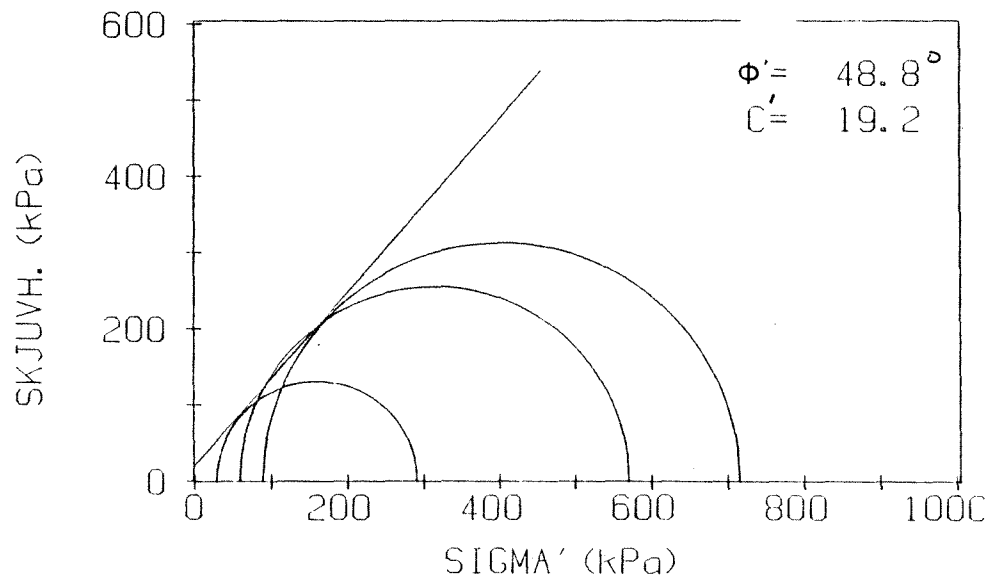


FIG. 7

Mohr diagram för prov i fig 6.

3.2.1 Bäddmassa

I detta avsnitt redovisas erhållna resultat från triaxiella tryckförsök på ren bäddmassa, se tabell 3 och följande jämförelser.

TABELL 3

Resultat från triaxiella försök, ren bäddmassa.

	σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	ϵ (%)	E (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (grader)
Vattenkvot $w = 20 \%$	30	292	2.8	9		
Lagringstid 1 dygn	60	571	2.8	18	19	49
	90	716	2.6	24		
Vattenkvot $w = 20 \%$	30	2556	3.2	79		
Lagringstid 7 dygn	60	3210	2.4	131	151	69
	90	4286	2.6	161		
Vattenkvot $w = 15 \%$	30	218	2.6	7		
Lagringstid 1 dygn	60	490	3.0	14	0	51
	90	690	3.0	20		
Vattenkvot $w = 15 \%$	30	1877*	2.4	77		
Lagringstid 7 dygn	60	1455	2.4	58	27	66
	90	2384	2.0	115		

* : Ej med i linjär regression

i) Jämförelse av brottvärden.

inverkan av lagringstid:

En markant ökning av hållfastheten erhöles för prover lagrade 7 dygn jämfört med prover lagrade 1 dygn.

Vid $w = 15 \%$ erhöles en ca 3 faldig ökning av den axiella brottspänningen, och vid $w = 20 \%$ en ca 6 faldig ökning.

inverkan av vattenkvot:

Hållfastheten var större vid $w = 20 \%$ än vid $w = 15 \%$

Vid 1 dygns lagringstid var skillnaden i brottspänning, mellan $w = 15 \%$ och $w = 20 \%$, liten.

Vid 7 dygns lagringstid var brottspänningen dubbelt så stor vid $w = 20 \%$ som vid 15% .

Dessa jämförelser gäller också för E-modulen.

ii) Jämförelse av hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' .

inverkan av lagrings tid:

Vid lagringen ökade både c' och ϕ' , speciellt bör ökningen av c' noteras.

inverkan av vattenkvot:

Vid 1 dygns lagringstid ökade c' från nästan 0 till 19 kPa vid ökning av vattenkvoten från 15 till 20 %. Friktionsvinklen ϕ' minskade däremot från 51° till 49° . Denna minskning är dock liten och kan anses ligga inom felmarginalen.

Vid 7 dygns lagringstid och $w = 20\%$ ökade c' . Även ϕ' uppvisar en påtaglig ökning.

3.2.2 Bäddmassa och cyclonaska

Tabell 4 ger sammanställning av resultat från triaxiella försök på blandning av bäddmassa och cyclonaska.

TABELL 4

Resultat från triaxiella försök, bäddmassa och cyclonaska.

	σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	ϵ_b (%)	E (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (grader)
Vattenkvot $w = 9\%$	30	1013	1.4	70		
Lagringstid 1 dygn	60	1606	1.6	97	96	59
	90	1798	1.6	107		
Vattenkvot $w = 13\%$	30	1472	1.6	90		
Lagringstid 1 dygn	60	3988*	2.0	196	162	58
	90	2185	2.0	105		
Vattenkvot $w = 16\%$	30	627	1.6	37		
Lagringstid 1 dygn	60	1303	2.4	52	28	62
	90	1571	2.3	64		
Vattenkvot $w = 13\%$	15	9888	2.4	411		
Lagringstid 7 dygn	30	11050	4.4	275	760	73
	60	8259*	3.0	273		

* : Ej med i linjär regression

i) Jämförelse av brottvärden.

inverkan av lagringstid:

Hållfastheten ökade kraftigt vid 7 dygns lagring, eller ca 4-5 faldigt.

inverkan av vattenkvot:

Hållfastheten är högst vid $w_{opt} = 13\%$ och lägst vid 16 %.

ii) Jämförelse av hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' .inverkan av lagringstid:

Vid lagring ökade c' och ϕ'

inverkan av vattenkvot:

Vid lagringstid 1 dygn varierar ϕ' mellan 58° och 62° . c' varierar också och är störst där ϕ' är lägst. Statistiskt sett kan dessa variationer vara inom ramen för försöksprocedurens noggrannhet, med hänsyn till att dessa värden erhålls med linjär regression av endast tre punkter. Klart är dock att kohesionen c' är störst vid optimal vattenkvot, d v s $w = 13\%$.

Uppmätta värden på ϕ' kan jämföras med friktionsvinkeln för naturliga jordar, se tabell 5.

TABELL 5

Friktionsvinkel ϕ' efter Bowles (1979)

Table . Typical range of values of true angle of internal friction ϕ' for several soils

Soil	ϕ'	
	Loose	Dense
Sand, crushed (angular)	32-36°	35-45
Sand, bank run (subangular)	30-34	34-40
Sand, beach (well rounded)	28-32	32-38
Gravel, crushed	36-40	40-50
Gravel, bank run	34-38	38-42
Silty sand	25-35	30-36
Silt, inorganic	25-35	30-35
Clay	See Figs. 13-21 and 13-22	

3.2.3 Urlakning.

Eftersom permeabiliteten bestämdes i en triaxialcell fanns det anledning att efter permeabilitetsbestämningarna utnyttja möjligheten att belasta provkropparna triaxiellt, för att få en jämförelse med redan utförda triaxialförsök. Resultaten av dessa försök överensstämmer tämligen väl med tidigare värden, vilket innebär att hållfastheten ej signifikant påverkas av "urlakningen".

3.3 KOMPRESSIONSFÖRSÖK

För båda typerna av material är kompressionsmodulen (M) okänslig för ändringar i vattenkvot, se tabell 6. Dock gäller för bäddmassa som lagrats 7 dygn, att högst kompressionsmodul fås vid vattenkvoten 20%.

Lagringstiden påverkar däremot M-modulen, som ökade vid lagring. För bäddmassan var ökningen ca 2 faldig, och för blandningen av bäddmassa och cyclonaska ca 20 %. Bäddmassan hade lägre M-modul än blandningen, dock ej i fallet w = 20 % och 7 dygns lagring. Figur 8 visar typexempel av arbetskurvor från kompressionsförsöken. Kompressionsmodulen har utvärderats från antagandet om rät linje i spänningsintervallet 1000-5000 kPa förutsättande att den något större krökningen i intervallet 0-1000 kPa enbart beror på anliggningsproblem.

Dessa kompressionsmoduler är höga, och som jämförelse kan nämnas att enligt Bygg 171. 545 varierar kompressionsmodulen för sand och grus mellan 12 och 100 MPa.

TABELL 6

Resultat från kompressionsförsök. Kompressionsmodul M (MPa), utvärderad från antagande om rät linje i spänningsintervallet 1000-5000 kPa.

Lagrings- tid dygn	<u>Bäddmassa</u>			<u>Bäddmassa och cyclonaska</u>		
	<u>Vattenkvot %</u>			<u>Vattenkvot %</u>		
	0	15	20	9	13	16
1	64*	54-67*	67-77*	111-112	103-108	86-103
7	71*	100-105*	160-191	125-138	141-143	133-154
14		102*	121*			

* : M utvärderat i intervallet 1000-3000 kPa

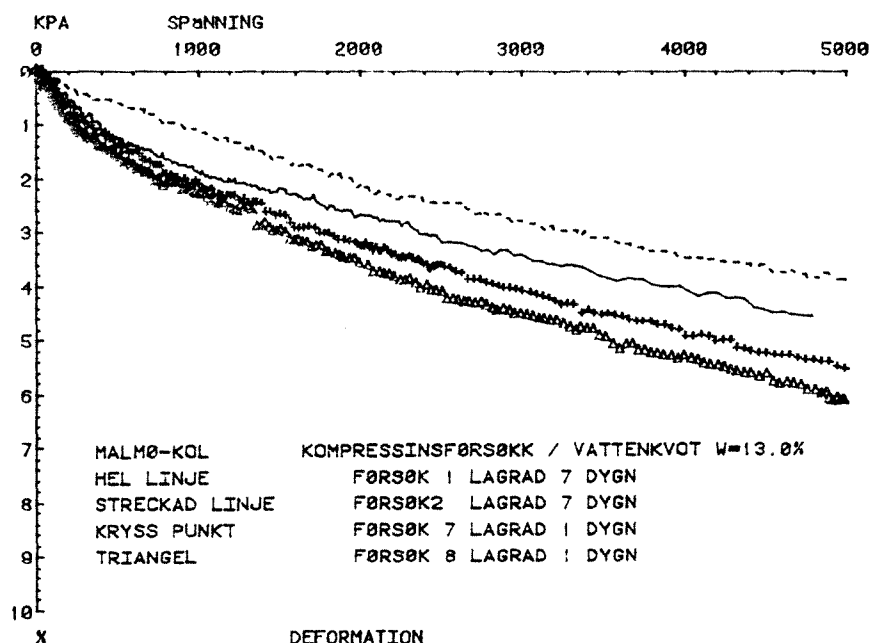


FIG. 8
Arbetskurvor från kompressionsförsök.

3.4 KAPILLARITET OCH PERMEABILITET

Kapillaritet

Den kapillära stighöjden för bäddmassa uppmättes till 0.05-0.1 m V_p och för blandningen till 2.5 m V_p .

Dessa resultat kan jämföras med värden på kapillära stighöjden för naturliga jordar i tabell 7.

TABELL 7.

Från SGFs laboratorieanvisningar, del 8.

TABELL . Överslagsvärden på den undre kapillära höjden vid dränering för olika jordarter.

Jordart	Kapillär höjd, m	
	Lös lagring	Fast lagring
Grovsand	0,03— 0,12	0,04— 0,15
Mellansand	0,10— 0,35	0,12— 0,50
Finsand	0,3 — 2,0	0,4 — 3,5
Grovsilt	1,5 — 5	2,5 — 8
Mellansilt-		
finsilt	4 — 10	6 — 12
Lera	> 8	> 10

Permeabilitet

i) Bäddmassa

I tabell 8 anges uppmätta värden på permeabiliteten för ren bäddmassa.

Vid $w = 15\%$ är permeabiliteten generellt högre än vid $w = 20\%$.

Permeabilitetsförsöken utfördes vid två celltryck (30 kPa o 90 kPa). Vid celltryck $\sigma_3 = 30$ kPa erhöles högre permeabilitet än vid $\sigma_3 = 90$ kPa. Vid $w = 20\%$ är skillnaden nära en faktor 3. Vid vattenkvot $w = 15\%$ och lagringstid 1 dygn är permeabiliteten dock lägre vid $\sigma_3 = 30$ kPa än vid $\sigma_3 = 90$ kPa.

I denna undersökning kunde ingen dramatisk inverkan av lagringstiden på permeabiliteten påvisas. Vid $w = 15\%$ ökar permeabiliteten något vid lagring medan fallet var det motsatta vid $w = 20\%$.

TABELL 8

Permeabilitetskoefficient för bäddmassa $k \text{ (m/s)} \cdot 10^4$

Lagrings- tid dygn	Vattenkvot %			
	15		20	
	Celltryck σ_3 (kPa)		Celltryck σ_3 (kPa)	
	30	90	30	90
1	7.2	8.8	6.6	2.8
7	12.7	10.0	5.8	1.7

ii) Bäddmassa och cyclonaska.

Resultat av permeabilitetsförsök på blandningen av bäddmassa och cyclonaska redovisas i tabell 9. Permeabiliteten var lägre vid $\sigma_3 = 90$ än vid 30 (kPa) (dock ej vid $w = 9 \%$). Vid lagringstid 1 dygn var permeabiliteten lägst vid $w = 16 \%$. Vid $w = 13 \%$ sjönk permeabiliteten vid lagring.

TABELL 9

Permeabilitetskoefficient för blandningen $k \text{ (m/s)} \cdot 10^6$

Lagrings- tid dygn	Vattenkvot %					
	9		13		16	
	Celltryck σ_3 (kPa)		Celltryck σ_3 (kPa)		Celltryck σ_3 (kPa)	
	30	90	30	90	30	90
1	31.2	48.8	27.2	22.1	8.0	6.8
7			4.0	2.2		

Resultat från tabell 8 och 9 bör jämföras med tabell 10.

TABELL 10

Från SGF laboratorieanvisningar, del 8.

TABELL . Överslagsvärden på permeabilitet och tätvärde för olika jordarter.

Jordart	Permeabilitet m/s	Tätvärde
<i>Moräner</i> (välgraderad jord)		
Grusig morän	$10^{-5} - 10^{-7}$	5-7
Sandig morän	$10^{-6} - 10^{-8}$	6-8
Siltig morän	$10^{-7} - 10^{-9}$	7-9
Lerig morän	$10^{-8} - 10^{-10}$	8-10
Moränlera	$10^{-9} - 10^{-11}$	9-11
<i>Sediment</i> (ensgraderad jord)		
Fingrus	$10^{-1} - 10^{-3}$	1-3
Grovsand	$10^{-2} - 10^{-4}$	2-4
Mellansand	$10^{-3} - 10^{-5}$	3-5
Finsand	$10^{-4} - 10^{-6}$	4-6
Grovsilt	$10^{-5} - 10^{-7}$	5-7
Mellansilt-finsilt	$10^{-7} - 10^{-9}$	7-9
Lera	$< 10^{-9}$	> 9

4. RESULTATDISKUSSION

När de geotekniska egenskaperna hos de båda aktuella materialtyperna objektivt jämförs med naturliga jordarter, blir slutsatsen att materialen grovt sett har goda byggnadstekniska egenskaper.

Torr densiteten är relativt okänslig för vattenkvoten. Detta gäller speciellt för ren bäddmassa, och den kommer att erhålla nästan en och samma torrdensitet oberoende av vattenkvot. I fallet blandning av bäddmassa och cyclonaska har vattenkvoten något större betydelse. Man bör tillse att vattenkvoten vid packning ej starkt överskrider den optimala vattenkvoten.

Hållfasthetsparametern ϕ' uppvisar ej något starkt beroende av vattenkvoten. Kohesionen c' visar sig dock i allmänhet öka med ökande vattenkvot.

Lagringstiden har stor inverkan på brottspänningarna och därmed hållfasthetsparametrarna. Blandningen av bäddmassa och cyclonaska hade vid 7 dygns lagring nära 10 Mpa brottspänning vilket är mycket högt jämfört med naturliga jordarter. För betong är karakteristiska tryckhållfastheten för hållfasthetsklass K25, $f_{cc} = 18$ MPa. Vid denna jämförelse bör beaktas att andra provningsmetoder används för betong än för jord. Dessutom är E-modulen för betong är nära 25 GPa.

Båda materialtyperna uppvisade spröda brott, vilket betyder att brott inträffar vid små deformationer (1.1-3.0 %). Detta innebär att om en uppbyggd fyllning av dessa material deformeras kan ett plötsligt brott inträffa. Det krävs å andra sidan mycket stora belastningar för att denna brottdeformation skall uppträda.

Uppmätta värden av kompressionsmodulen M är höga och kan jämföras med de för sand och grus

Ren bäddmassa har gynnsammare uppmätta värden av kapillär stighöjd än blandningen. Större varsamhet med vatten krävs därför för blandningen än för ren bäddmassa.

För ren bäddmassa inverkar lagringstiden ej på permeabiliteten,
för blandningen minskar permeabiliteten vid lagring.

5. SLUTSATSER

Följande konklusioner dras från uppmätta resultat.

1. Torrdensiteten är relativt okänslig för vattenkvoten.
(Speciellt för ren bäddmassa.)
2. Materialen har mycket hög brotthållfasthet vilket ger möjlighet till höga tillåtna grundtryck. Vid lagring i 7 dygn ökade hållfastheten, speciellt för blandningen. Arbetskurvorna visar på spröda brott speciellt för lagrat material. Detta kan vara till nackdel.
3. Kompressionsmodulerna är för båda materialen relativt höga vilket tyder på att endast små sättningar kommer att uppträda.
4. Ren bäddmassa har ca 0.05-0.10 m kapillär stighöjd, vilket ungefär motsvarar den naturliga jordarten sand. Blandningen av bäddmassa och cyclonaska har ca 2.50 m kapillär stighöjd och kan jämföras med fast lagrad grovsilt.
5. Permeabiliteten för båda materialtyperna ligger nära den för finsand, dock har bäddmassa högre permeabilitet än blandningen.
6. Den mycket höga hållfastheten (speciellt hos blandningen) tillsammans med det spröda brottet kan medföra problem. En fyllning av detta material kommer att vara mycket svår-schaktad.

REFERENSLISTA

1. BETONGHANDBOKEN, Konstruktion, AB Svensk Byggtjänst, Stockholm 1980.
2. BYGG 1b, AB Byggmästarens Förlag, Stockholm 1972.
3. BOWLES, Joseph E., Physical and Geotechnical Properties of Soils, McGraw-Hill, Inc. 1979.
4. SBN 80, Statens Planverks Författningssamling, Stockholm, 1980, (PFS:1)
5. SGFs laboratorieanvisningar, del 5,7 och 8, Svensk Byggtjänst, Stockholm.
6. Svensk Standard, SIS 02 71 08, SIS 02 71 11, SIS 02 71 12, SIS 02 71 15, Sveriges standardiseringskommission, Stockholm.

	12323-24
Journal nr	12357
Inkom	

13 MRS. 1984

Provningsprotokoll

Uppdragsgivare: Krister Nilsson, Sydkraft AB, Öresundsverket/Stal-Laval

Föremål: Cyklon- och bäddaska från fluid-bed reaktor.

Undersökningen avsåg att utvärdera möjligheten att använda materialen vid cementmalning. Svensk cement får innehålla högst 4 % SO_3 . SO_3 -halten påverkar cementets bindning och regleras genom gipstillsats vid malningen. Den maximala tillsatsen av askorna kommer att begränsas av deras SO_3 -innehåll. Vi har valt att laboratorietillverka cement med normal SO_3 -halt, 3,5 %, och specifika ytan $380 \text{ m}^2/\text{kg}$. I detta fallet innehöll cementklinkern 1,54 % SO_3 från början.

Resultat

Kemisk analys:

	SO_3
Cyklonaska	17,8 %
Bäddaska	24,3 %
Lab.gips	42,8 %

Fysikalisk provning

Prov nr	12323	12324	12357
SO_3 -källa	Cyklonaska	Bäddaska	Labgips
Inblandning %	12	8,6	4,7
Bindetid min	200	200	190
Vattenhalt %	30,0	30,0	30,0
Tryckhållfasthet MPa			
1 dygn	11,7	11,1	10,2
7 dygn	34,9	33,0	33,6
28 dygn	44,6	42,3	44,1

Kommentar

De undersökta materialen kan ersätta gips vad beträffar cementets bindetid och konsistens (=samma vattenhalt). Skillnaderna i tryckhållfasthet ligger inom metodens noggrannhet. Egenskaper som påverkar hur mycket material, som kan blandas in är:

SO_3 -halt, max 4,0 % i cement

Askhalt, över 5 % aska i cementet, exklusive SO_3 -bärare, ger annan kvalitetsgrupp på cementet, kallad modifierad portlandcement

Cementa AB

Postadress/
Postal address
Box 104
S-620 30 SLITE
SVERIGE

Gatuadress/
Office address
Skeppargatan 1

Telefon/
Telephone No.
Nat. 0498 205 00
INAT - 46498 205 00

Telegram/
Telegramaddress
cemlab

Telex
4110 Cementa S
Telefax
0498 207 00
0498 209 17 (fax)

Postgiro/Postal
giro account
231316

Bankgiro/Bank
giro account
834 8112

CO ₂ -halt,	glödförlust max 3 % för cement föreskrivs i de flesta normer.
Cl-halt,	Cl ⁻ i cement max 0,1 %
Kvartshalt,	Fluidbed reaktorer kan ge kvartshaltigt material, som begränsas av hygieniska gränsvärden.
Kolhalt,	max 5 % kolhalt är gränsen för flygaska till cement
Ljushet,	hänger ofta samman med kolhalten och bör visa små variationer eftersom cementet är känsligt för nyansskillnader.

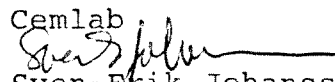
Till slut bör nämnas att innan ett nytt material kan börja användas till cement, så måste omfattande tester göras för att undersöka materialets inverkan på betongens beständighet och andra egenskaper.

Vänliga hälsningar

Slite 1984-03-12

CEMENTA AB

Cemlab


Sven-Erik Johansson

Statistisk behandling av mätdata

Om k betecknar antalet prover och n antalet analyser per prov gäller för spridning inom provet (analysfelet):

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{k(n-1)} \sum_{i=1}^k S_i^2}$$

$$\text{där } S_i^2 = \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

Beräkna sambandet

$$S_3 = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}$$

där $\bar{x}_i$ är delprovets medelvärde och $\bar{\bar{x}}$ är totalmedelvärdet för alla analyser.

Nu fås S_1 , gällande för tidsberoendet, enligt

$$S_1 = \sqrt{S_3^2 - \frac{S_2^2}{n}}$$

Den gemensamma standardavvikelsen beräknas ur sambandet

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$$

som representerar avvikelse vid ett prov och en analys.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk Forskning och utveckling. Stiftelsens forkningsprogram är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Värmeverksföreningen
- Övrig industri

Värmeforsk samarbetar med Närings- och teknikutvecklingsverket (NUTEK).

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Box 1765 · 111 87 Stockholm
Tek: 08-7900600 · Fax 08-796 00 37