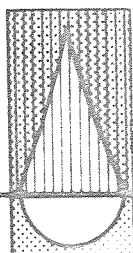
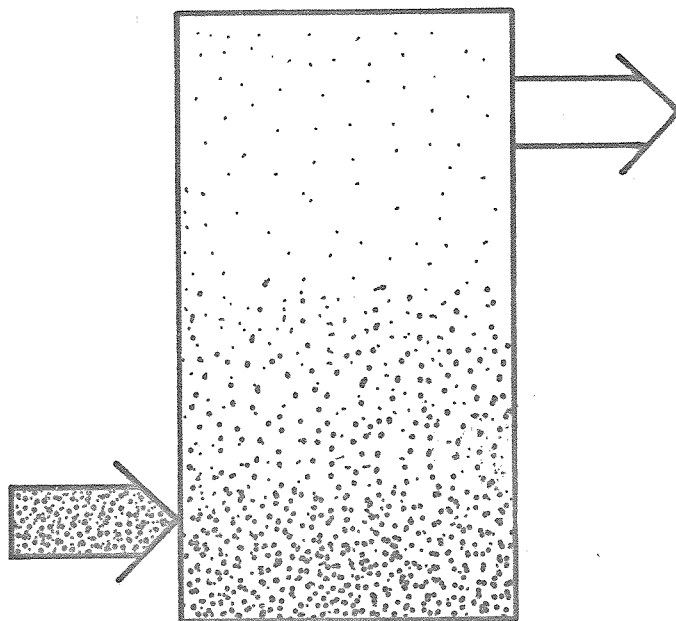


Utredning om bruk av aktivt kull til rensing av kommunalt avløpsvann

2004



FORORD

Prosjektkomiteén for Rensing av Avløpsvann gikk 5. november 1973 inn for at det skulle bevilges midler til en utredning om bruk av aktivt karbon til rensing av kommunalt avløpsvann. Komiteéns bevilgningsforslag ble i brev av 20. desember 1973 godkjent av Miljøverndepartementet. Prosjektet ble av komiteén gitt betegnelsen PRA 2.5, og følgende program ble skissert:

1. Sammenstilling av erfaringer fra rensing av kommunalt avløpsvann med aktivt karbon, i første rekke gjennom litteraturstudier.
2. Foreløpige vurderinger av brukbarheten under norske forhold.

En vil legge spesiell vekt på at de fleste norske renseanlegg sannsynligvis vil være for små til å kunne foreta egen regenerering av karbonet, og mulighetene for sentrale regenereringsanlegg som betjener flere mindre renseanlegg vil derfor bli vurdert. Det skal videre foretas en sammenligning av kostnader med bygging av aktivt karbonrenseanlegg og biologiske renseanlegg.

Dersom nevnte utredning gir resultater som er lovende, er det aktuelt å arbeide videre med forsøk og pilotanlegg for rensing av kommunalt avløpsvann med aktivt karbon."

Arbeidet med prosjektet har vært utført ved teknisk avdeling på NIVA. Ingeniør J. Thaulé har utført dimensjonerings- og kostnadsberegning av alle "konvensjonelle" anleggskomponenter, mens siv.ing. B. Vik har stått for den generelle orienteringen om bruk av aktivt kull og beregning av selve adsorpsjonsanleggene. Tekn.lic. P. Balmér har deltatt i opplegget av arbeidet og i vurderingene av det fremkomne materialet. En rekke firmaer har på forespørsel vært meget hjelpsomme med råd og opplysninger. Spesielt nevnes A/S Flebuluft, Flygt Pumper A/S, Jotungruppen A/S, Kværner Industrier A/S, Maskinaktieselskapet ZETA A/S og Samfunnsteknikk VBB A/S.

Oslo, juli 1974

Bjarne Vik
Bjarne Vik

INNHOLDSLISTE

	Side:
FORORD	2
RESYMÉ	9
1. INNLEDNING	10
2. AKTIVT KULL - FREMSTILLING OG ADSORPSJONSEGENSKAPER	11
2.1 Aktivt kull fremstilles fra kullholdige materialer ved dehydrering, forkulling og aktivering	11
2.2 Karakterisering av aktivt kull	12
2.2.1 Aktivt kull karakteriseres både ved fysiske egenskaper og adsorpsjons-egenskaper	12
2.2.2 Det må være samsvar mellom porestørrelse og molekylstørrelse	14
2.2.3 Stoff som skal adsorberes må ha større affinitet til det aktive kullet enn til løsningsmiddelet.	14
2.3 Beskrivelse av adsorpsjonsprosessen	16
2.3.1 Man kan prinsipielt skille mellom kjemi-sorpsjon og fysikalsk adsorpsjon.	16
2.3.2 Adsorpsjonsisotermer er likevektsskurver som forteller hvilken adsorpsjonskapasitet kullet har ved forskjellige forhold mellom oppløst stoff og aktivt kull	16
2.3.3 Avhengig av fasongen på adsorpsjonsisotermene brukes uttrykkene Langmuir- og Freundlich-isotermer	17
2.3.4 Adsorpsjonshastigheten bestemmer kontakttiden mellom vann og aktivt kull	19
2.3.5 Adsorpsjonsprosessen består av flere trinn	19
2.3.6 Porediffusjonen regnes for å være hastighets-begrensende	21
2.4 Adsorpsjon av forurensninger fra avløpsvann	21
2.4.1 Organiske forbindelser i avløpsvann adsorberes i ulik grad. Løste karbohydrater og organiske syrer adsorberes dårlig	21
2.4.2 Aktivt kull kan også adsorbere uorganiske forbindelser	22
2.4.3 Det kan oppstå biologisk aktivitet i adsorpsjonsenhetene ved bruk av både granulert kull og pulverkull	24

	Side:
3. GRANULERT KULL TIL VANNRENSING	25
3.1 Alle prosesser hvor granulert kull benyttes, er basert på at vannet strømmer gjennom et kullsjikt	25
3.1.1 Nedstrømskolonner	25
3.1.2 Oppstrømskolonner	27
3.1.3 Adsorpsjonskolonner kan utføres i stål eller betong. Stål er mest vanlig	35
3.1.4 Satsvis drift gir dårlig utnyttelse av kullet	35
3.1.5 Kontinuerlig drift med vann og kull i motstrøm gir best utnyttelse av kullet adsorpsjonskapasitet	37
3.2 Valg av prosessutforming	38
3.2.1 Oppstrømskolonner med vann og kull i motstrøm blir trolig det gunstigste alternativ	38
3.3 Dimensjoneringsparametre og betydningen av disse	40
3.3.1 Oppholdstiden bestemmer volumet på adsorpsjonsanlegget	40
3.3.2 Organisk belastning er bestemmende for kapasiteten på regenereringsanlegget	40
3.3.3 Strømningshastigheten avgjør lengde:høydeforholdet på adsorpsjonskolonnen	41
3.3.4 Matematiske modeller gir verdifull forståelse av adsorpsjonsprosessen, men kan ennå ikke brukes til praktisk dimensjonering	41
3.4 Regenerering og transport av granulert kull	42
3.4.1 Regenereringssystem for granulert kull	42
3.4.2 Mulige leveringsformer for granulert kull	43
3.4.3 Innen renseanlegget transporteres granulert kull som en vandig suspensjon	43
4. PULVERKULL TIL VANNRENSING	46
4.1 Prosessteknikk	46
4.1.1 Kommersielle anlegg for regenerering av pulverkull er ennå ikke utviklet	47
4.1.2 Flere trinn i serie reduserer kullforbruket	47
4.1.3 En "virkelig" reaktor har vanligvis større virkningsgrad enn ett teoretisk blandetrinn	50

	Side:
4.2 Levering, lagring og dosering av pulverkull	51
4.2.1 Transport i containere trolig det mest aktuelle	51
4.2.2 Pulverkull kan lagres på renseanlegget som pulver i silo eller som en 10% suspensjon (vekt/volum)	51
4.2.3 Pulverkull doseres til avløpsvann som en 2-3% suspensjon	55
5. DIMENSJONERING OG KOSTNADSOVERSLAG FOR HENHOLDSVIS ETTERFELLING OG KJEMISK FELLING - AKTIVT KULL	55
5.1 Presentasjon av alternativene det blir regnet på	55
5.1.1 Alternativ I a: Etterfellingsanlegg for 2500 pe.	55
5.1.2 Alternativ I b: Etterfellingsanlegg for 25 000 pe.	55
5.1.3 Alternativ IIa: Anlegg med primærfelling - pulverkull for 2500 pe.	55
5.1.4 Alternativ IIb: Anlegg med primærfelling - granulert kull for 25 000 pe.	60
5.2 Forutsetninger for beregningene	60
5.2.1 Dimensjoneringsforutsetninger	60
5.2.2 Forutsetninger for økonomiske beregninger	62
5.3 Dimensjonering og økonomiske beregninger	64
5.3.1 Alt. I a: Etterfellingsanlegg for 2500 pe.	64
5.3.2 Alt. I b: " " " " 25 000 pe.	65
5.3.3 Alt. IIa: Anlegg med primærfelling - pulverkull for 2500 pe.	67
5.3.4 Alt. IIb: Anlegg med primærfelling - granulert kull for 25 000 pe.	69
6. DISKUSJON	72
6.1 Alt. I a og II a: Etterfelling og kjemisk felling - pulverkull for 2500 pe.	72
6.1.1 Investeringskostnader	72
6.1.2 Årskostnader	72
6.2 Alt. I b og II b: Etterfelling og kjemisk felling - granulert kull for 25 000 pe.	73
6.2.1 Investeringskostnader	73
6.2.2 Årskostnader	73
6.3 Vurdering av rensegrad og driftssikkerhet	74

	Side:
6.4 Anleggsstørrelse og valg mellom pulverkull og granulert kull	75
6.5 Regenerering på renseanlegget eller på sentralt regenereringsanlegg	75
7. KONKLUSJON	76
8. LITTERATUR	77

- o -

TABELLFORTEGNELSE

Tabell nr.:

1	Karakteriseringsdata for noen kommersielle kulltyper	13
2	Areal og porevolum for typiske kull til henholdsvis vann- og gassrensing	14
3	Molekylstruktur og andre forhold som har innflytelse på adsorpsjon på aktivt kull	15
4	Oversikt over fjerning av uorganiske stoffer ved kjemisk felling og adsorpsjon på aktivt kull	23
5	Oversikt over status for kjemisk felling/aktivt kull	39

- o -

FIGURFORTEGNELSE

Figur nr.:

1	Skjematisk fremstilling av en typisk adsorpsjonsisoterm for aktivt kull	17
2	Grafisk fremstilling av Langmuir- og Freundlichisoterm på lineær form	19
3	Skjematisk fremstilling av forholdene i en kullpartikkel	20
4	Adsorpsjonskolonne med nedstrøm	25
5	" " " " oppstrøm	25
6	Prosent ekspansjon for kullsjikt som funksjon av strømningshastighet og kulltype	26
7	Nedstrøms trykkolonne, Ponoma, California	28
8	Nedstrøms trykkolonne, Rocky River, Ohio	29
9	Oppstrøms kolonne med vann og kull i motstrøm Orange county, California	30
10	Avdragsarrangement i topp og bunn i en adsorpsjonskolonne for aktivt kull, Orange county, California	31

Figur nr.:	Side:	
11	Vertikalsnitt av utløpsarrangement i en adsorpsjonskolonne for aktivt kull, Orange county, California	32
12	Påfyllingskammer for aktivt kull, Orange county, California	33
13	Åpen oppstrømskolonne med ekspandert sjikt. Planlagt i Vallejo, California	34
14	Skjematisk fremstilling av utløpskonsentrasjonen fra en adsorpsjonskolonne som funksjon av tiden	35
15	Typiske variasjoner i utløpskonsentrasjonen fra adsorpsjonsanlegg med satsvis drift av adsorpsjonsenhetene	36
16	Skjematisk illustrasjon av konsentrasjonsprofilen gjennom en satsvis drevet kolonne	36
17	Prinsippskisse av konsentrasjonsprofilen i en kontinuerlig drevet kolonne med vann og kull i motstrøm	37
18	Vertikalsnitt av en etasjeovn for regenerering av kull	44
19	Flyteskjema for et typisk regenereringsanlegg	45
20	Skisse av venturivasker	45
21	Skjematisk fremstilling av en kombinasjon av kjemisk felling og adsorpsjon på pulverisert kull. Den kjemiske felling og adsorpsjon skjer i ett og samme trinn	46
22	Skjematisk fremstilling av et alternativ med primærfelling etterfulgt av eget trinn for adsorpsjon på pulverisert kull	46
23	Kontaktenhet for aktivt pulverkull med resirkulering	50
24	Skisse av et system med lagring av pulverkull i container og tørrdosering av kullet	52
25	Skisse av et system hvor pulverkull lagres i siloer og tørrdoseres	53
26	Skisse av et system hvor pulverkull transporteres i containere og lagres som suspensjon i tanker	54
27	Alt. I a: Etterfellingsanlegg for 2500 pe. Flyteskjema	56
28	Alt. I b: Etterfellingsanlegg for 25 000 pe. Flyteskjema	57
29	Alt. IIa: Primærfelling - aktivt kull for 2500 pe. Flyteskjema	58
30	Alt. IIb: Anlegg m/primærfelling - aktivt kull for 25 000 pe. Flyteskjema	59

Figur nr.:		Side:
31	Grafisk fremstilling av spesifikke investeringskostnader for de fire alternativer	71
32	Grafisk fremstilling av spesifikke årskostnader for de fire alternativer	71

- o -

BILAG:

Bilag 1:	Oversikt over noen av de vanligste karakteriseringsparametre for aktivt kull	79
Bilag 2.	Planskisser over de fire alternativer	83
Bilag 3.	Masseberegning	88
Bilag 4.	Dimensjonerings	94
Bilag 5.	Kostnader for bygningsmessige arbeider	101
Bilag 6.	Oversikt over maskinelt utstyr	108

---oOo---

RESYMÉ

Denne rapport presenterer resultater fra studier over bruk av aktivt kull til rensing av kommunalt avløpsvann. Det er gitt en generell orientering om aktivt kull og dets egenskaper. Arbeidet har særlig vært konsentrert om muligheten for å erstatte biologisk-kjemisk rensing med kjemisk felling-aktivt kull. Primærfelling - aktivt kull og biologisk-kjemisk rensing vil trolig gi omtrent samme rensegrad med hensyn på kjemisk oksygenforbruk og total fosfor, mens giftstoffer fjernes bedre på aktivt kull. Utløpsvannet fra et adsorpsjonsanlegg vil imidlertid ha en større andel lett nedbrytbart organisk materiale enn vannet fra et biologisk-kjemisk anlegg som vil inneholde mer tungt nedbrytbare forbindelser. Et adsorpsjonsanlegg gir muligheter for større driftssikkerhet enn et biologisk-kjemisk anlegg.

Det er utført kostnadsberegninger for fire alternativer. Disse alternativer omfatter etterfelling eller primærfelling - pulverkull for 2500 pe. og etterfelling eller primærfelling - granulert kull for 25 000 pe. Resultatene fra beregningene viser at for begge anleggsstørrelser blir de totale årskostnader 25 - 50% høyere for primærfelling - aktivt kull enn for etterfellingsanlegg.

Rapportens hovedkonklusjon er at det ut fra dagens teknologi ikke finnes noen økonomisk begrunnelse for bruk av kjemisk felling - aktivt kull til rensing av kommunalt avløpsvann. Det kan imidlertid tenkes at en fremtidig utvikling vil kunne gjøre alternativet mer attraktivt.

1. INNLEDNING

På slutten av 1950-tallet ble man i USA klar over at de konvensjonelle mekaniske og biologiske rensemetoder mange steder ville vise seg å være utilstrekkelige. Det ble derfor startet et stort forskningsprogram (Advanced Waste-water Treatment Research Program) der ulike former for videregående rensing ble studert. For fjerning av organisk stoff viste adsorpsjon på aktivt kull seg som en lovende metode. Fra først av ble aktivt kull betraktet som et kompletterende trinn til konvensjonell mekanisk-biologisk rensing. De positive erfaringene førte imidlertid til at man også begynte å vurdere muligheten for å erstatte det biologiske trinnet med adsorpsjon på aktivt kull. Dermed oppstod det en rensemetode som i amerikansk og engelsk litteratur kalles "physical-chemical treatment". Det er nå flere anlegg av denne type under bygging og prosjektering i USA, og det første antas å være i drift i løpet av 1974.

Fysisk-kjemiske renseanlegg i USA er vanligvis bygd opp etter følgende mønster: Konvensjonell forbehandling, kjemisk felling med kalk, nøytralisering, filtrering og adsorpsjon på aktivt kull.

I Norge er det (hvis man ser bort fra en rekke langtidsluftere) bare noen få biologiske renseanlegg. Det er nå nokså klart at rensekravene mange steder vil bli minst biologisk-kjemisk rensing. Man står nå ved starten av en periode med sterk innsats på avløpsvannrensing. Det er derfor viktig å ha muligheter for valg mellom alternative løsninger.

Kjemisk felling (primærfelling) i kombinasjon med aktivt kull vil renseteknisk kunne være et aktuelt alternativ til biologisk-kjemisk rensing. Formålet med denne rapport er å belyse rensetekniske og økonomiske sider ved en slik bruk av aktivt kull.

2. AKTIVT KULL - FREMSTILLING OG ADSORPSJONSEGENSKAPER

2.1 Aktivt kull fremstilles fra kullholdige materialer ved dehydrering, forkulling og aktivering. 1)

Aktivt kull kan produseres fra en rekke kullholdige materialer som tre, kull, torv, lignin, nøtteskall, avfall fra sukkerrør, sagflis, ben og petroleumsavfall. Kull til rensing av avløpsvann lages hovedsakelig fra forskjellige typer kull og koks som er relativt billige og lett tilgjengelige. Særlig interessant er en mulig utnyttelse av avfallsstoffer som lignin, sulfittlut og avfall fra petroleumsindustrien. Kvaliteten på det ferdige produktet kan være avhengig av råmaterialene. Dette må man ta særlig hensyn til når det aktive kullet skal brukes til spesialformål, f.eks. til rensing av vin og i farmasøytisk industri. I de fleste tilfeller vil imidlertid fremstillingsmetoden være avgjørende for egenskapene.

Pulverisert kull lages ved at kullet først aktiveres og siden knuses og klassifiseres. Granulert kull lages ved at kullet tilsettes et bindemiddel slik at materialet kan formes til små kuler før den endelige aktiveringen. Det må innskytes at det finnes en rekke forskjellige produksjonsmetoder. (Bare i tiden før 1940 ble det tatt ut over 1 000 patenter, Bailleul et al., 1962.) Derfor er det bare mulig å berøre noen av de mest karakteristiske trekk ved fremstillingen.

Dehydrering og forkulling

Råmaterialet dehydreres og forkulles ved langsom oppvarming i fravær av luft. Av og til brukes dehydreringsmidler som sinkklorid eller fosforsyre. I forkullingsprosessen overføres det organiske materialet til "primært" kull som er en blanding av inert uorganisk materiale, tjæreliknende stoffer, amorft kull og krystallinsk kull. Under forkulling vil dekomponeringsprodukter fra tjære tette igjen porene i kullet, men disse fjernes igjen under aktiveringen.

1) Bygger på kapittel 2 i EPA,s Process Design Manual for Carbon Adsorption, 1973.

Aktivering

Aktiveringen består av to faser: Forbrenning av avsetninger (f.eks. tjære) og dannelse av porer. Kull kan aktiveres kjemisk eller termisk. Begge prosesser brukes, men kull til vannrensformål aktiveres termisk.

En typisk fremstillingsmåte kan være som følger:

1. Råmaterialet tørkes ved temperaturer opp til 170 °C.
2. Det tørkede materialet varmes over 170 °C slik at det organiske materialet nedbrytes under utvikling av karbonoksyd, karbondioksyd og eddiksyre.
3. Eksoterm (utvikling av varme) nedbrytning ved 270-280 °C under dannelse av tjære, metanol og andre biprodukter.
4. Forkullingen avsluttes ved en temperatur på 400-600 °C og gir et produkt som består av ca. 80% primært kull.

Det forkullede materialet behandles så med et aktiveringsmiddel som damp eller karbondioksyd (damp er mest brukt). Damp ved 750-950 °C brenner bort avsatte stoffer og utvider porene.

Utbyttet ved produksjon av aktivt kull ligger vanligvis mellom 5 og 50%, beregnet ut fra lufttørt råstoff (Bailleul et al., 1962).

2.2 Karakterisering av aktivt kull

2.2.1 Aktivt kull karakteriseres både ved fysiske egenskaper og adsorpsjonsegenskaper

De fysiske egenskapene som partikkelstørrelse, overflate etc. gir en generell informasjon om kullet, mens adsorpsjonsegenskapene må bestemmes i forhold til definerte løsninger. Bilag 1 gir en oversikt over de mest brukte karakteriseringsparametrene.

Tabell 1 viser data for noen kommersielle kulltyper.

Tabell 1. Karakteriseringsdata for noen kommersielle kulltyper. x)
 (EPA's Design Manual for Activated Carbon, 1973)

	ICI AMERICA HYDRODARCO 3000	CALGON FILTRASORB 300 (8x30)	WESTVACO NUCHAR WV-L (8x30)	WITCO 517 (12x30)
FYSISKE EGENSKAPER				
Spes. overfl. m ² /g BET)	600-650	950-1050	1000	1050
Tilsynelatende tetthet, g/cm ³	0,43	0,48	0,48	0,48
Tetthet, etter tilbakespyling og drenering, g/cm ³	0,35	0,42	0,42	0,48
Virkelig tetthet g/cm ³	2,0	2,1	2,1	2,1
Partikkeltetthet, fuktet i vann, g/cm ³	1,4-1,5	1,3-1,4	1,4	0,92
Effektiv størrelse, mm	0,8-0,9	0,8-0,9	0,85-1,05	0,89
Jevnhetskoeffisient	1,7	1,9 eller mindre	1,8 eller mindre	1,44
Porevolum, cm ³ /g	0,95	0,85	0,85	0,60
Midlere partikkeldiam., mm	1,6	1,5-1,7	1,5-1,7	1,2
SPESIFIKASJONER				
Sikt størrelse (US.std.serien)				
Større enn nr. 8 (maks %)	8	8	8	-
" " " 12 (maks %)	-	-	-	5
Mindre " " 30 (maks %)	5	5	5	5
" " " 40 (maks %)	-	-	-	-
Jodtall	650	900	950	1000
Aske (%)	xx	8	7,5	0,5
Fuktighet (maks %)	xx	2	2	1

x) Andre kulltyper kan fås fra produsent etter ønske.

xx Ingen tilgjengelige data fra produsent.

- Ikke anvendelig på denne type kull.

Tabell 1. Karakteriseringsdata for noen kommersielle kulltyper. x)
(EPA's Design Manual for Activated Carbon, 1973)

	ICI AMERICA HYDRODARCO 3000	CALGON FILTRASORB 300 (8x30)	WESTVACO NUCHAR WV-L (8x30)	WITCO 517 (12x30)
FYSISKE EGENSKAPER				
Spes. overfl. m ² /g (BET)	600-650	950-1050	1000	1050
Tilsynelatende tetthet, g/cm ³	0,43	0,48	0,48	0,48
Tetthet, etter tilhakespyling og drenering, g/cm ³	0,35	0,42	0,42	0,48
Virkelig tetthet g/cm ³	2,0	2,1	2,1	2,1
Partikkeltetthet, fuktet i vann, g/cm ³	1,4-1,5	1,3-1,4	1,4	0,92
Effektiv størrelse, mm	0,8-0,9	0,8-0,9	0,85-1,05	0,89
Jevnhetskoeffisient	1,7	1,9 eller mindre	1,8 eller mindre	1,44
Porevolum, cm ³ /g	0,95	0,85	0,85	0,60
Midlere partikkeldiam., mm	1,6	1,5-1,7	1,5-1,7	1,2
SPESIFIKASJONER				
Sikt størrelse (US.std.serien)				
Større enn nr. 8 (maks %)	8	8	8	-
" " " 12 (maks %)	-	-	-	5
Mindre " " 30 (maks %)	5	5	5	5
" " " 40 (maks %)	-	-	-	-
Jodtall	650	900	950	1000
Aske (%)	xx	8	7,5	0,5
Fuktighet (maks %)	xx	2	2	1

x) Andre kulltyper kan fås fra produsent etter ønske.

xx Ingen tilgjengelige data fra produsent.

- Ikke anvendelig på denne type kull.

2.2.2 Det må være samsvar mellom porestørrelse og molekylstørrelse

For at et molekyl skal adsorberes, må det kunne trenge inn i porene i kullet. En kulltype med stor spesifikk overflate vil vanligvis ha en stor brøkdel av små porer ($< 10 \text{ \AA}$). Dette kullet vil være best egnet for adsorpsjon av små molekyler og brukes derfor gjerne til rensing av gasser.

Vannforurensninger utgjøres ofte av større molekyler. Derfor er det ønskelig med en stor del av porene i en mellomstørrelse ($20 \text{ \AA} - 2000 \text{ \AA}$). Ideelt sett vil man forsøke å kombinere størst mulig overflate med størst mulig del av porene i det området som samsvarer med størrelsen på de molekylene man ønsker adsorbent. Tabell 2 illustrerer forskjellen mellom vannrensekull og gassrensekull.

Tabell 2. Areal og porevolum for typiske kull til henholdsvis vann- og gassrensing (Abram, 1973).

	Totalt		I porer $> 20 \text{ \AA}$ radius	
	areal, m^2/g	pore vol. ml/g	areal, m^2/g	volum ml/g
Vannrensekull	665	0,952	150	0,628
	900	3,238	169	2,558
	1337	2,328	247	1,076
	1234	1,611	535	1,331
	1776	2,133	320	1,508
Gassrensekull	1053	0,585	22	0,138
	1101	0,663	59	0,237
	1246	0,676	30	0,171

2.2.3 Stoff som skal adsorberes må ha større affinitet til det aktive kullet enn til løsningsmiddelet

Stor overflate kombinert med en gunstig porestørrelsesfordeling er som nevnt en nødvendig betingelse for at kullet skal ha gode adsorpsjons-egenskaper. Dette er imidlertid ikke tilstrekkelig. I tillegg må en

kreve at molekyler som skal adsorberes, har større affinitet til det aktive kullet enn til løsningsmidlet. Tabell 3 gir en oversikt over forhold som påvirker adsorpsjon fra vandige løsninger.

Tabell 3. Molekylstruktur og andre forhold som har innflytelse på adsorpsjon på aktivkull (Ford, 1972).

1. Aromatiske stoffer adsorberes vanligvis bedre enn alifatiske stoffer med samme molekylstørrelse.
2. Forgrenete molekyler adsorberes vanligvis bedre enn rette kjeder.
3. Sidegrupper påvirker adsorpsjon i forskjellig grad.

<u>Sidegruppe</u>	<u>Innflytelse</u>
Hydroksyl	Gir vanligvis redusert adsorpsjon. Graden av reduksjon er avhengig av strukturen på modermolekylet.
Amino	Gir redusert adsorpsjon. Flere aminosyrer adsorberes ikke i nevneverdig grad.
Karboxyl	Forskjellig grad. Glykoxylsyre adsorberes bedre enn eddiksyre, men liknende effekter opptrer ikke ved høyere fettsyrer.
Dobbeltbindinger	Forskjellig effekt.
Halogener	Forskjellig effekt.
Sulfo	Gir vanligvis redusert adsorpsjon.
Nitro	Gir vanligvis økt adsorpsjon

4. Økende løselighet gir minkende adsorpsjon.
 5. Sterkt ioniserte løsninger adsorberes dårligere enn svakt ioniserte, slik at udissosierte molekyler prefereres.
 6. Hvis ikke porene blir for trange, adsorberes store molekyler bedre enn mindre molekyler av samme kjemiske natur. Dette fordi det skapes flere bånd mellom kulloverflaten og molekylet slik at adsorpsjon blir vanskeligere.
-

2.3 Beskrivelse av adsorpsjonsprosessen

2.3.1 Man kan prinsipielt skille mellom kjemisorpsjon og fysikalsk adsorpsjon

Kjemisorpsjon forutsetter en kjemisk reaksjon mellom det adsorberte molekyl og en funksjonell gruppe (i betydningen "i stand til å reagere") på overflaten.

Fysikalsk adsorpsjon skjer ved en tiltrekning mellom overflate og molekyl. En antar at mer langtrekkende coulomb-krefter eventuelt van der Waal-krefter virker mellom molekylet og overflaten.

Ofte forsøker man å skille mellom disse to hovedtyper på grunnlag av aktiveringsenergier. Man sier da at fysikalsk adsorpsjon skjer ved lave aktiveringsenergier (< 10 kcal/mol) mens kjemisorpsjon skjer ved høyere aktiveringsenergi (kan bli over 100 kcal/mol). Mattson & Mark (1971) mener at det ved adsorpsjon fra løsning er vanskelig å skille mellom de to adsorpsjonsformer på grunnlag av aktiveringsenergier. Mattson & Mark (1971) foreslår at man i stedet for kjemisorpsjon og fysikalsk adsorpsjon bruker spesifikk og ikke-spesifikk adsorpsjon henholdsvis. Vi vil ikke komme nærmere inn på den diskusjonen her. Det ønskelige ville være å kunne sette de observerte adsorpsjonsfenomener i direkte sammenheng med reaksjoner mellom funksjonelle grupper og adsorberte molekyler. Kunnskapen om aktive overflategrupper er imidlertid ennå altfor mangelfull.

2.3.2 Adsorpsjonsisotermer er likevektskurver som forteller hvilken adsorpsjonskapasitet kullet har ved forskjellige forhold mellom oppløst stoff og aktivt kull

Uavhengig av hvilken type adsorpsjon man har, kan adsorpsjonen beskrives ved likevektskurver som kalles adsorpsjonsisotermer. Isotermene bestemmes ved konstant temperatur og beskriver metningskonsentrasjonen av adsorbent stoff (angis ofte i g adsorbent stoff pr. g aktivt kull) som funksjon av mengde oppløst stoff. (Se fig. 1.)

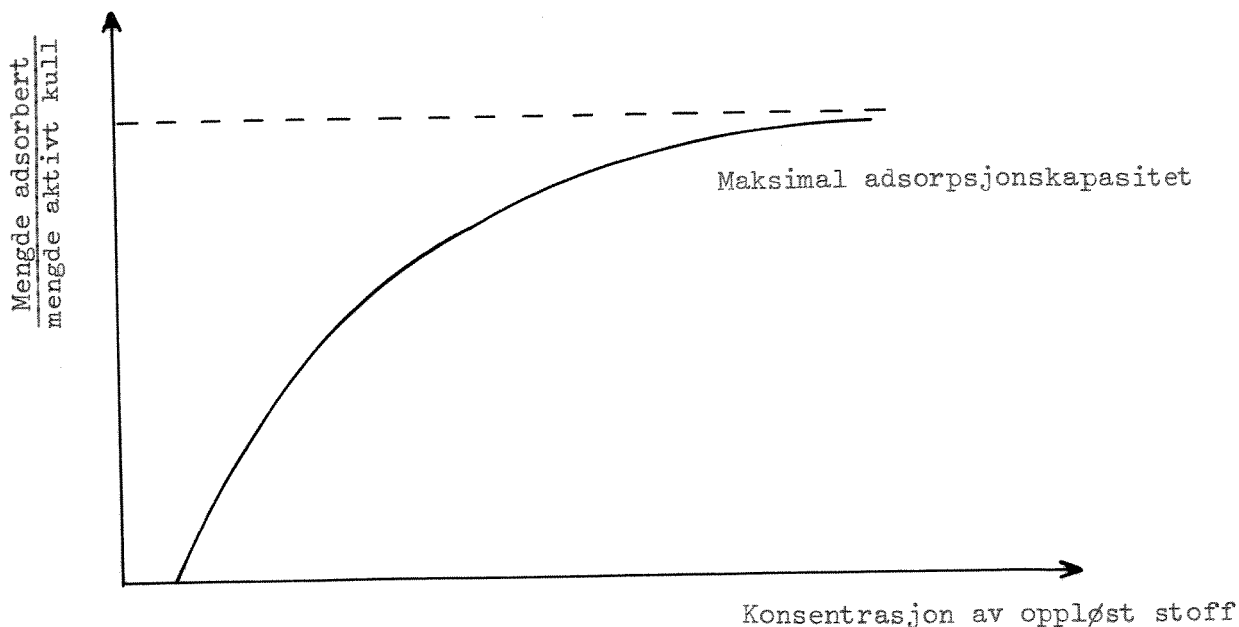


Fig. 1 Skjematisk fremstilling av en typisk adsorpsjonsisoterm for aktivt kull.

En ser av figuren at mengde oppløst stoff adsorbent pr. vektenhet kull øker med økende konsentrasjon i løsningen. Ved høye konsentrasjoner flater kurven ut. Kullet er da fullstendig mettet. En eksperimentell kurve går normalt ikke gjennom origo, men skjærer den horisontale akse, hvilket vil si at det blir tilbake en ikke adsorberbar rest (se diskusjonen side 21).

2.3.3 Avhengig av fasongen på adsorpsjonsisotermene brukes uttrykkene Langmuir- og Freundlich-isotermar

En Langmuirisoterm kan utledes teoretisk. Det henvises til Mattson & Mark (1971). Likningen for en Langmuir-isoterm er gitt ved

$$X = X_m \cdot \frac{KC}{KC + 1} \quad (1)$$

hvor

- X = mengde adsorbent pr. vektenhet kull
- X_m = " " " " " ved fullstendig metning
- C = konsentrasjon av løst stoff
- K = likevektskonstant.

For det tilfellet at $KC \ll 1$ (hvilket kan realiseres ved lave konsentrasjoner), reduseres likning (1) til

$$X = X_m KC \quad (2)$$

Isotermen blir da en rett linje.

Som oftest må isotermene beskrives ved hjelp av empiriske likninger. Freundlich-isotermen er en slik empirisk isoterm. Likningen gis ofte på følgende form

$$X = KC^n \quad (3)$$

hvor K og n er konstanter.

Kurvene til likn. (2) og (3) går gjennom origo, noe som vanligvis ikke er tilfelle i praksis. Det kan også være slik at en eksperimentell isoterm bare kan beskrives ved hjelp av én av de nevnte likninger i ett bestemt konsentrasjonsområde.

I praksis må man ad eksperimentell vei avgjøre om en adsorpsjon følger en Langmuir- eller en Freundlich-isoterm. For å illustrere forskjellen mellom de to isoterner kan likningene føres over på lineær form:

Langmuir:

$$1 + \frac{1}{KC} = \frac{X_m}{X} \quad (4)$$

Freundlich:

$$\log X = \log K + n \cdot \log C \quad (5)$$

Langmuir-isotermen gir en rett linje når $\frac{1}{C}$ plottes mot $\frac{1}{X}$, mens Freundlich-isotermen gir en rett linje når $\log C$ plottes mot $\log X$. Den lineariserte likningen er framstilt grafisk i fig. 2.

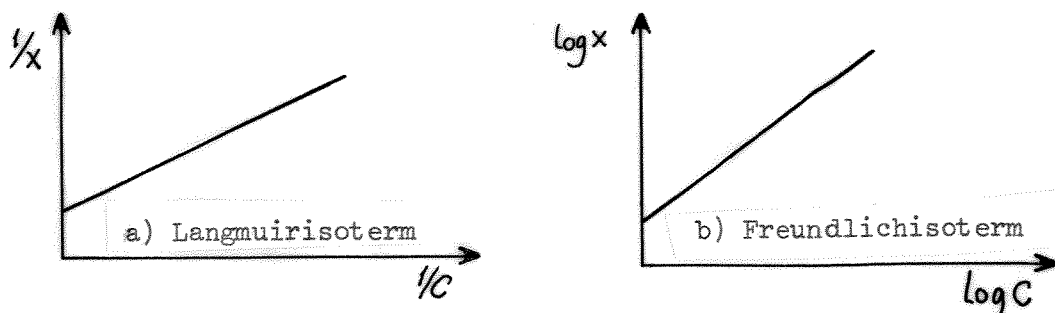


Fig. 2. Grafisk fremstilling av Langmuir- og Freundlichisoterm på lineær form.

2.3.4 Adsorpsjonshastigheten bestemmer kontakttiden mellom vann og aktivt kull

Likevektsskurven uttrykker den minimale mengde kull som er nødvendig for å adsorbere en gitt mengde oppløst stoff. Adsorpsjonshastigheten forteller hvor hurtig denne likevekten nås. Den bestemmer kontakttiden mellom vannet og kullet og dermed også størrelsen på adsorpsjonsapparatene.

2.3.5 Adsorpsjonsprosessen består av flere trinn

Mekanismen for adsorpsjon på aktivt kull kan tenkes å bestå av følgende trinn (se fig. 3).

1. Diffusjon gjennom væskefilmen som omgir kullpartiklene.
2. Diffusjon i porene i kullet.
3. Adsorpsjon på overflaten.

I tillegg kan det skje en overflatediffusjon ved at molekyler vandrer langs poreveggene. Denne diffusjon skjer parallelt med den ordinære porediffusjonen.

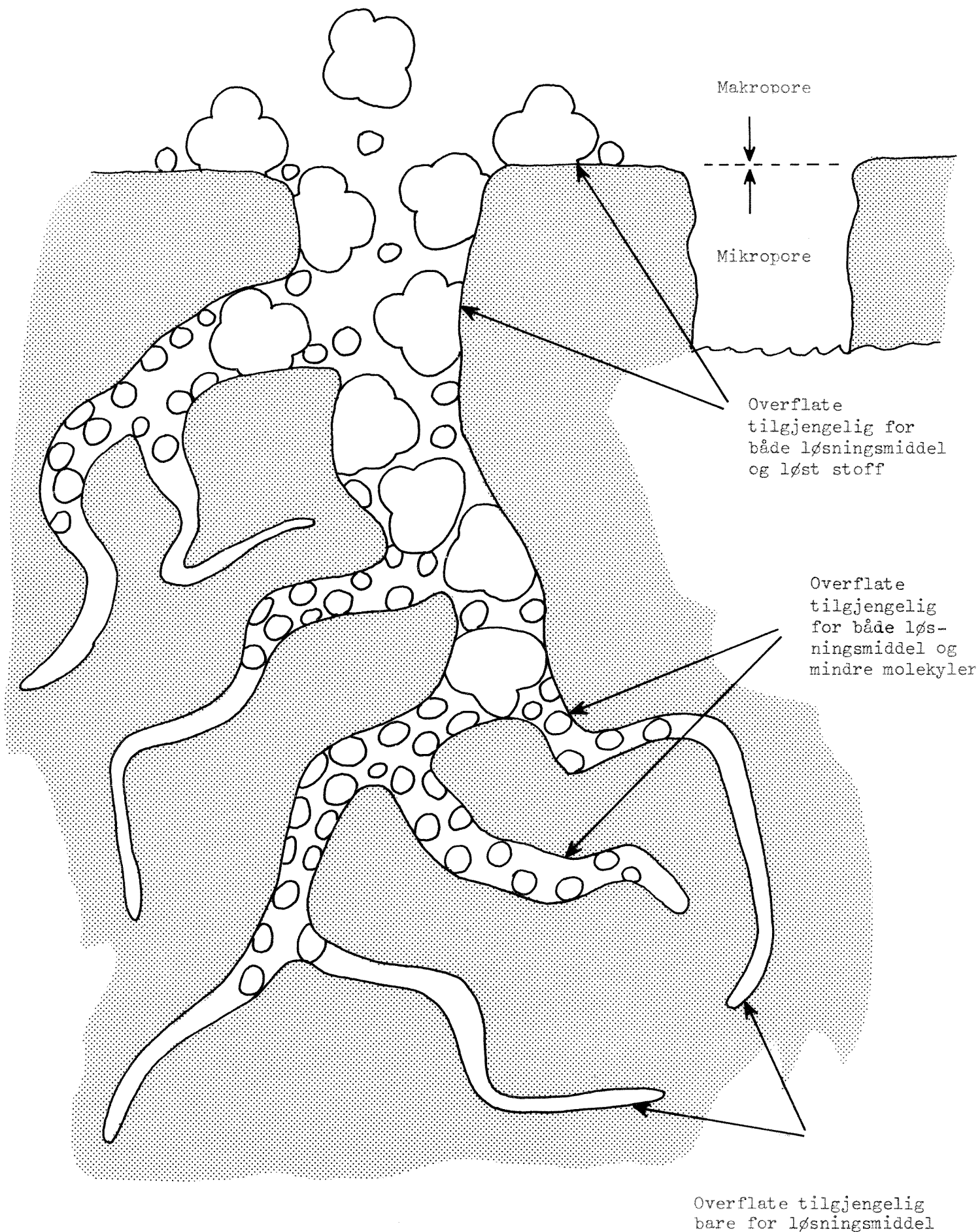


Fig. 3 Skjematisk fremstilling av forholdene i en kullpartikkel.

Generelt gjelder at der hvor en reaksjon består av flere trinn i serie, vil det langsomste trinn være bestemmende for den observerte reaksjonshastigheten.

2.3.6 Porediffusjonen regnes for å være hastighetsbegrensende

Det hersker en del uenighet om hvilket trinn som er hastighetsbestemmende ved en adsorpsjon på aktivkull. Keinath & Weber (1968) hevder at det er film-diffusjonen som er hastighetsbegrensende ved adsorpsjon av DNOSBP (= dinitro-o-sek-butyلفenol). Westerberg (1973 b)) har derimot funnet at porediffusjonen er hastighetsbegrensende. Han har studert adsorpsjon av organisk materiale fra avløpsvann. Westerberg (1973) mener at film-diffusjonen kan være hastighetsbegrensende når kullet er ferskt fordi adsorpsjonen da skjer på den ytre overflaten og i poremunningene. Når karbonet blir mer mettet, må molekylerne diffundere videre inn i porene før de kan bli adsorbent. Mattson & Mark (1971) mener at porediffusjonen er hastighetsbegrensende for de fleste systemer. Det er enighet om at selve adsorpsjonen ikke er hastighetsbegrensende.

2.4 Adsorpsjon av forurensninger fra avløpsvann

2.4.1 Organiske forbindelser i avløpsvann adsorberes i ulik grad.

Løste karbohydrater og organiske syrer adsorberes dårlig

I standard vannanalyser brukes biokjemisk oksygenforbruk (BOF) og kjemisk oksygenforbruk (KOF) som et mål for oksyderbart organisk materiale. Imidlertid vil disse parametre gi liten informasjon om hvilke organiske forbindelser vannet inneholder. Som nevnt side 15 vil organiske forbindelser adsorberes i ulik grad. Generelt kan man si at stoffer som vanskelig nedbrytes ad biologisk vei, lar seg lett adsorbere. Disse forbindelser har gjerne en hydrofob karakter. Eksempler på slike forbindelser er aromater, fargestoffer og overflateaktive forbindelser.

På den andre siden finnes organiske materialer som vanskelig lar seg adsorbere uansett hvor mye en øker kuldoseringen og oppholdstid i adsorpsjonsanlegget (Cooper & Bailey, 1973). Det er kommet fram noen data som viser at en stor del av det ikke-adsorberbare materiale utgjøres av løste karbohydrater (Westermark, 1973 a)) og organiske syrer (Rebhun et al., 1974).

De nevnte forbindelser er vanligvis lett biologisk nedbrytbare. Den praktiske konsekvensen av det ovenfornevnte forhold er at hvis en kjører et vann med høyt innhold av løst organisk materiale inn på et adsorpsjonsanlegg, så vil det bli tilbake en organisk rest som kan være betydelig. I England har man et konsentrert avløpsvann (2-3 ganger konsentrasjonen i Norge). Man (Cooper & Bailey, 1973) mener derfor at bruk av aktivt kull ikke fullt ut kan erstatte biologisk rensing, men snarere er å betrakte som et supplement.

Hvis en regner med at kjemisk rensed vann kan ha et innhold av løst KOF på 60-100 mg/l, kan en regne med et KOF-innhold på 10-40 mg/l etter behandling med aktivt kull. Det presiseres at det her i landet ikke finnes data som kan dokumentere dette, men at dette er et anslag basert på resultater i utenlandske undersøkelser.

2.4.2 Aktivt kull kan også adsorbere uorganiske forbindelser

Sigworth & Smith (1972) har gitt en oversikt over adsorpsjon av uorganiske stoffer. Et utdrag av deres data er gjengitt i tabell 4.

Tabell 4. Oversikt over fjerning av uorganiske stoffer ved kjemisk felling og adsorpsjon på aktivt kull.
 Adsorpsjonsdata er hentet fra Sigworth & Smith (1972).
 Fellingsdata er gitt av Falk-Frederiksen. ¹⁾

Forbindelse	Adsorberbarhet	Grad av fjerning ved kjemisk felling	
		pH 6 - 7	pH > 9
Klor, Cl ₂	Høy	-	-
Arsen, As	"	Høy	Middels
Krom, (Cr ⁶⁺ (Cr ³⁺	Middels	Lav	Lav
	-	Høy	Høy
Kvikksølv, Hg	Middels	Middels	-
Kobolt, Co	"	Lav	Høy
Bly, Pb	"	Høy	"
Nikkel, Ni	"	Lav	Middels
Jern, (Fe ³⁺ (Fe ²⁺	"	Høy	Høy
	Lav	Lav	Lav
Kobber, Cu	"	"	Høy
Kadmium, Cd	"	"	"
Sink, Zn	"	"	"
Barium, Ba	"	-	-
Molybden, Mo	"	Lav	Lav
Mangan, Mn	"	"	Høy
Ortofosfat, PO ₄ ³⁻	"	Høy	"

1) Ole Falk-Frederiksen, Norsk institutt for vannforskning, Oslo.
 Muntlig meddelelse.

En ser at av de giftige metallene adsorberes **arsen**, krom, kvikksølv og bly godt, mens kadmium og barium adsorberes dårlig. Det er også verdt å legge merke til at klor adsorberes godt, mens ortofosfat adsorberes dårlig. En kombinasjon av kjemisk felling og aktivt kull vil for de fleste av metallene i tabell 4 gi muligheter for god fjerning.

Fjerning av metaller fra kommunalt avløpsvann blir dog neppe aktivt kulls primære oppgave. Det må snarere sees på som en gunstig bieffekt.

2.4.3 Det kan oppstå biologisk aktivitet i adsorpsjonsenhetene ved bruk av både granulert kull og pulverkull

I tillegg til en ren adsorpsjon på kullet kan det skje en biologisk aktivitet i adsorpsjonsenhetene. En adsorpsjonskolonne vil kunne virke som et anaerobt biologisk filter. Det skjer en reduksjon av sulfat til sulfid samtidig som organisk materiale (f.eks. organiske syrer) brytes ned. Sulfiddannelse i adsorpsjonskolonner rapporteres av en rekke forfattere, f.eks. Tofflemire et al. (1973) og Shell & Burns (1973). Den biologiske aktiviteten kan være ønskelig for så vidt som den fjerner organisk materiale, men som oftest vil den være uønsket.

Klorering har vært benyttet for å hindre biologisk aktivitet uten at det har vært helt vellykket (Weber et al., 1970). Tilsetning av nitrat kan hindre sulfiddannelse (EPA's Design Manual for Carbon Adsorption, 1973). Reduksjon av nitrat til fritt nitrogen (denitrifikasjon) skjer da i stedet for reduksjon av sulfat til sulfid.

Også ved bruk av pulverkull vil det kunne oppstå biologisk aktivitet i adsorpsjonsdelen. Burns & Shell (1974) mener at metangjæring ikke skjer ved en midlere oppholdstid for pulverkullet i adsorpsjonsenheten på mindre enn 5-7 døgn, og at sulfiddannelse ikke vil skje ved oppholdstider på mindre enn 2-4 døgn. Ved å holde korte oppholdstider for kullet kan man få en gunstig biologisk nedbrytning uten sulfiddannelse. Når man skal beregne kulldosering, vil biologisk aktivitet komme inn som en ukjent faktor. (Gjelder både for granulert kull og pulverisert kull.) Imidlertid er det ikke vanlig (og vel heller ikke mulig) å ta hensyn til biologisk aktivitet.

3. GRANULERT KULL TIL VANNRENSING

3.1 Alle prosesser hvor granulert kull benyttes, er basert på at vannet strømmer gjennom et kullsjikt

Vannet kan gå som oppstrøm eller nedstrøm gjennom sjiktet (fig. 4-5).

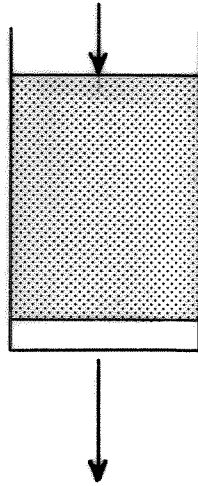


Fig. 4 Adsorpsjonskolonne med nedstrøm.

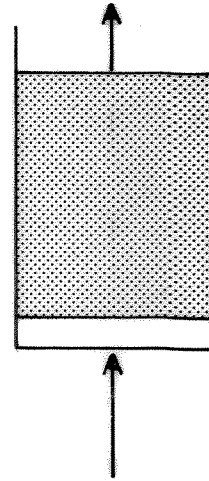


Fig. 5 Adsorpsjonskolonne med oppstrøm.

3.1.1 Nedstrømskolonner

I nedstrømskolonner kan vannet graviteres, eller det kan pumpes ned gjennom sjiktet. Sjiktet i kolonner med nedstrøm vil alltid være pakket og stasjonært. Kullsjiktet er her både filter- og adsorpsjonsmedium. Typiske strømningshastigheter er 5-25 m/h. Nedstrømskolonner må tilbakespyles med jevne mellomrom. Daglig tilbakespyling er vanlig uten hensyn til mengde suspendert stoff akkumulert. Total spyletid kan være 60-90 min. (Culp, 1971). Ved tilbakespylingen må sjiktet ekspanderes 30-50%. Dette krever en strømningshastighet på 35-50 m/h. Sammenhengen mellom prosentuell ekspansjon og strømningshastighet for forskjellige kulltyper er vist i fig. 6.

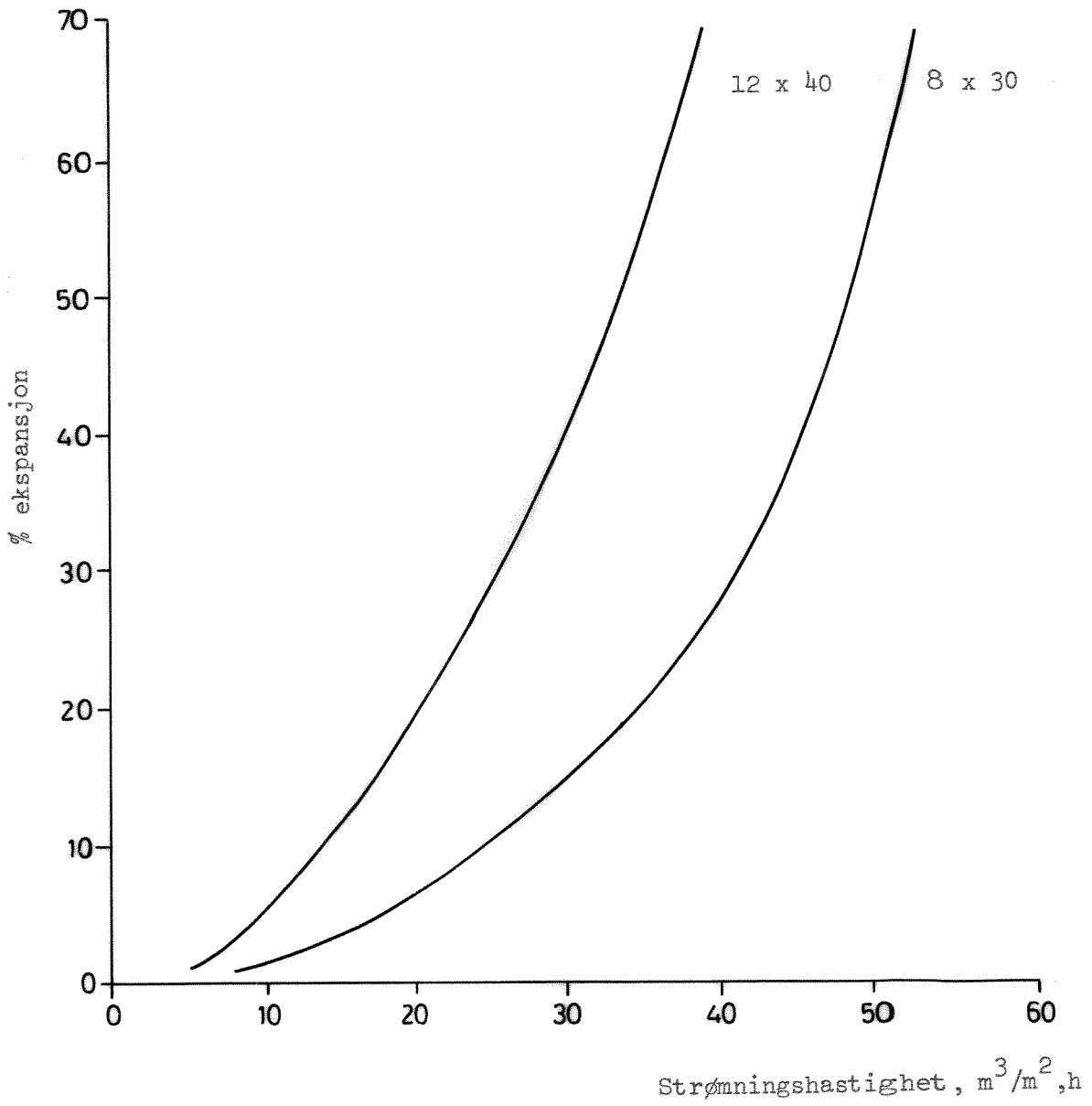


Fig. 6 Prosent ekspansjon for kullsjikt som funksjon av strømningshastighet og kulltype.

Man har flere muligheter for utforming av adsorpsjonskolonnene.

Kullet kan f.eks. hvile på en enkel perforert plate (fig. 7) eller på et lag av sand og grus (fig. 8).

Nedstrømskolonner drives satsvis og tas ut av drift når kullet må skiftes ut. Derfor kan kullet mates og tas ut gjennom samme rørsystem (se fig. 8), eller kullet kan tas ut i bunnen og fylles på øverst, som vist i fig. 7.

3.1.2 Oppstrømskolonner

Oppstrømskolonner kan ha pakkede eller fluidiserte sjikt. Graden av fluidisering bestemmes av strømningshastigheten (se fig. 6).

Fluidiserte kolonner virker ikke som filter for suspendert stoff og trenger normalt ikke tilbakespyles. Kolonner med pakket sjikt vil virke som filter. Nå kan det være vanskelig (tidkrevende) å tilbakespyle en oppstrømskolonne hvor det suspenderte materialet akkumuleres på undersiden av sjiktet. En unngår som oftest denne vanske ved å filtrere vannet før det kommer inn på adsorpsjonskolonnene.

Det finnes flere mulige alternativer for utforming av inn- og utløpsanordninger for vann og kull. Fig. 9 viser hvordan dette er tenkt løst i Orange County, California. Systemet brukes også ved Lake Tahoe, California. Vannet kommer inn via en hovedledning. Det blir deretter ført inn på kolonnen gjennom flere grener slik at vannet blir fordelt over hele tverrsnittet. På enden av innløpsrørene er det en sil (detaljtegning i fig. 10). Utløpsanordningen er utformet identisk med innløpsanordningen (se fig. 11).

Øverst på kolonnen sitter et kammer for påfylling av kull (se fig. 11).

Detaljtegning er i fig. 12. Kullet dras ut i bunnen av kolonnen gjennom en ventil (fig. 9).

I Vallejo, California, har man valgt en løsning som vist i fig. 13.

Man ser at kolonnen er utstyrt med falsk bunn, og at kullet trekkes ut gjennom et traktsystem. Den falske bunnen skal også være med på å fordele innkommende vann. Så vidt vites er ikke systemet prøvd i fullskala-anlegg.

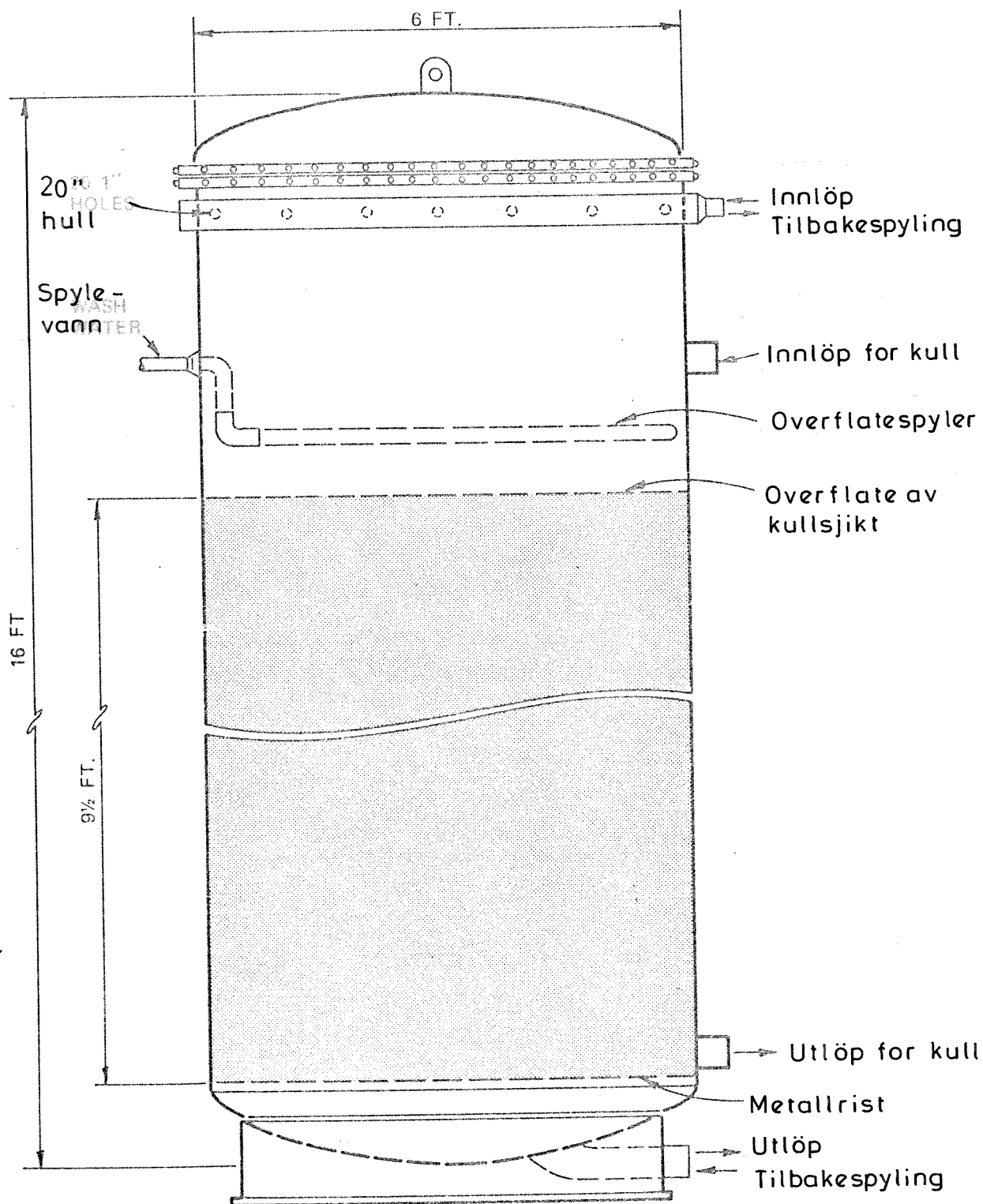


Fig. 7 Nedströms trykkolonne Pomona, California
(EPA's design manual for activated carbon, 1973)

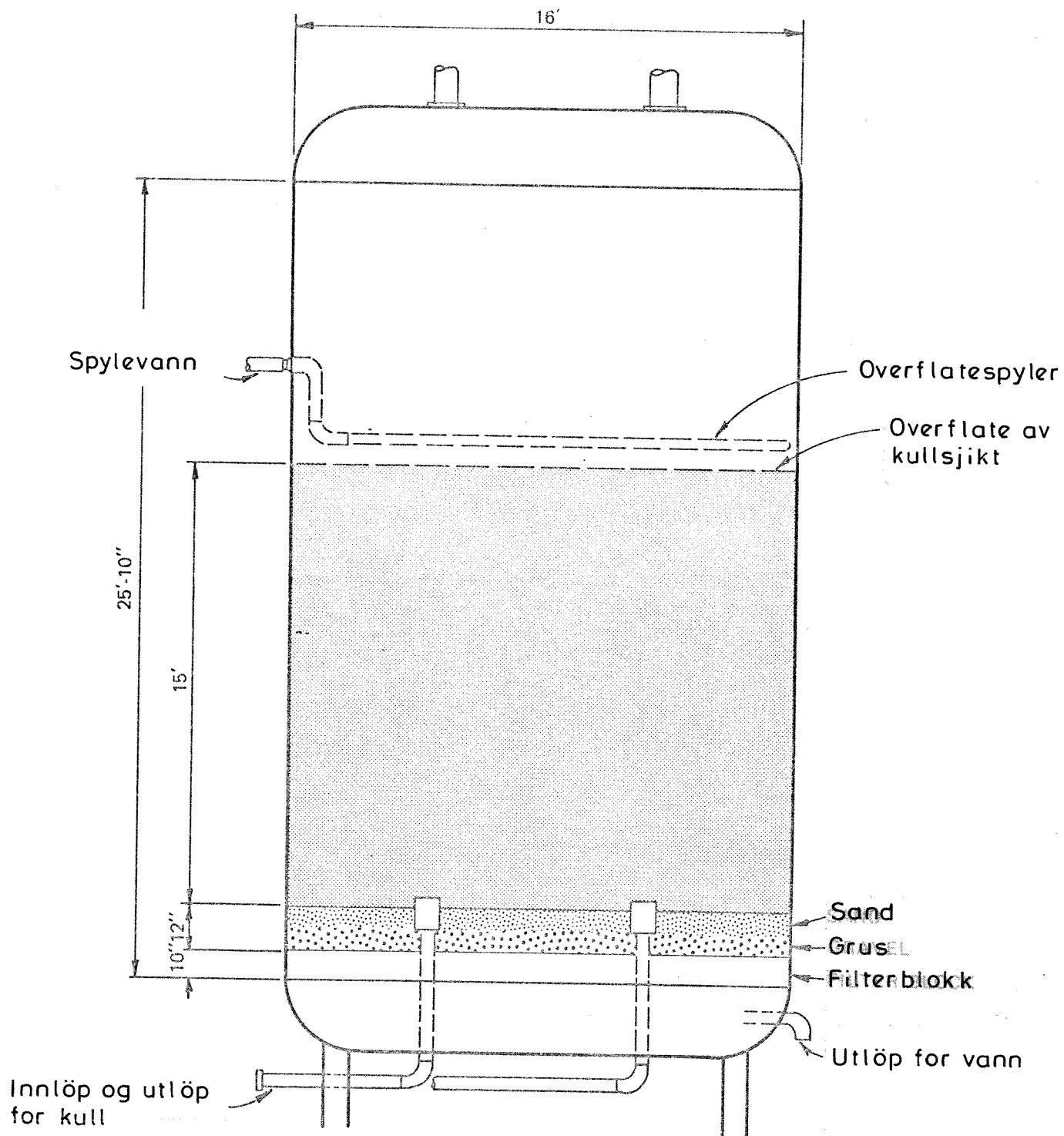


Fig. 8 Nedströms trykkolonne Rocky River, Ohio
(EPA's design manual for activated carbon, 1973)

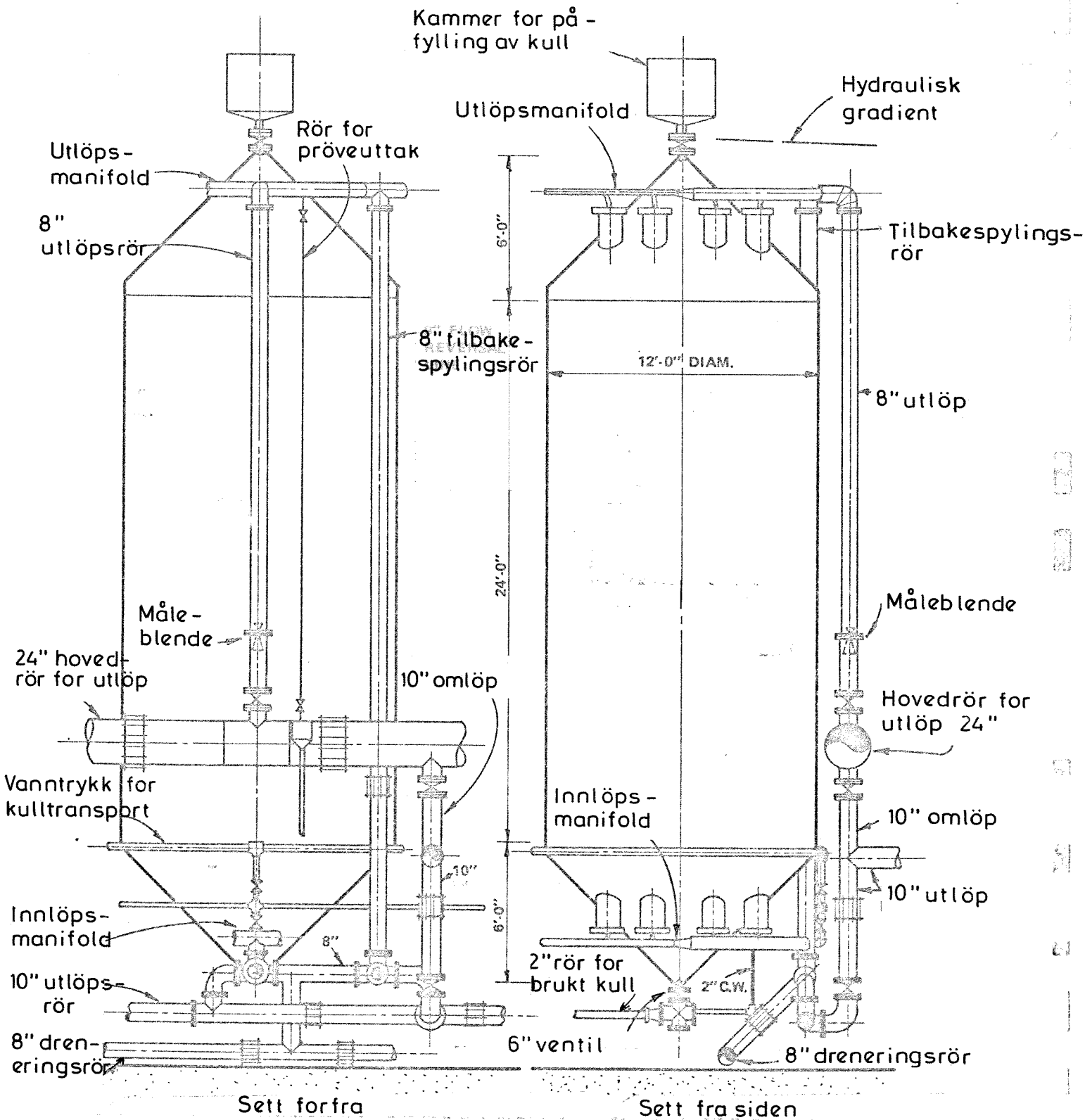


Fig. 9 Oppstrøms kolonne med vann og kull i motstrøm
 Orange county, California
 (EPA's design manual for activated carbon, 1973)

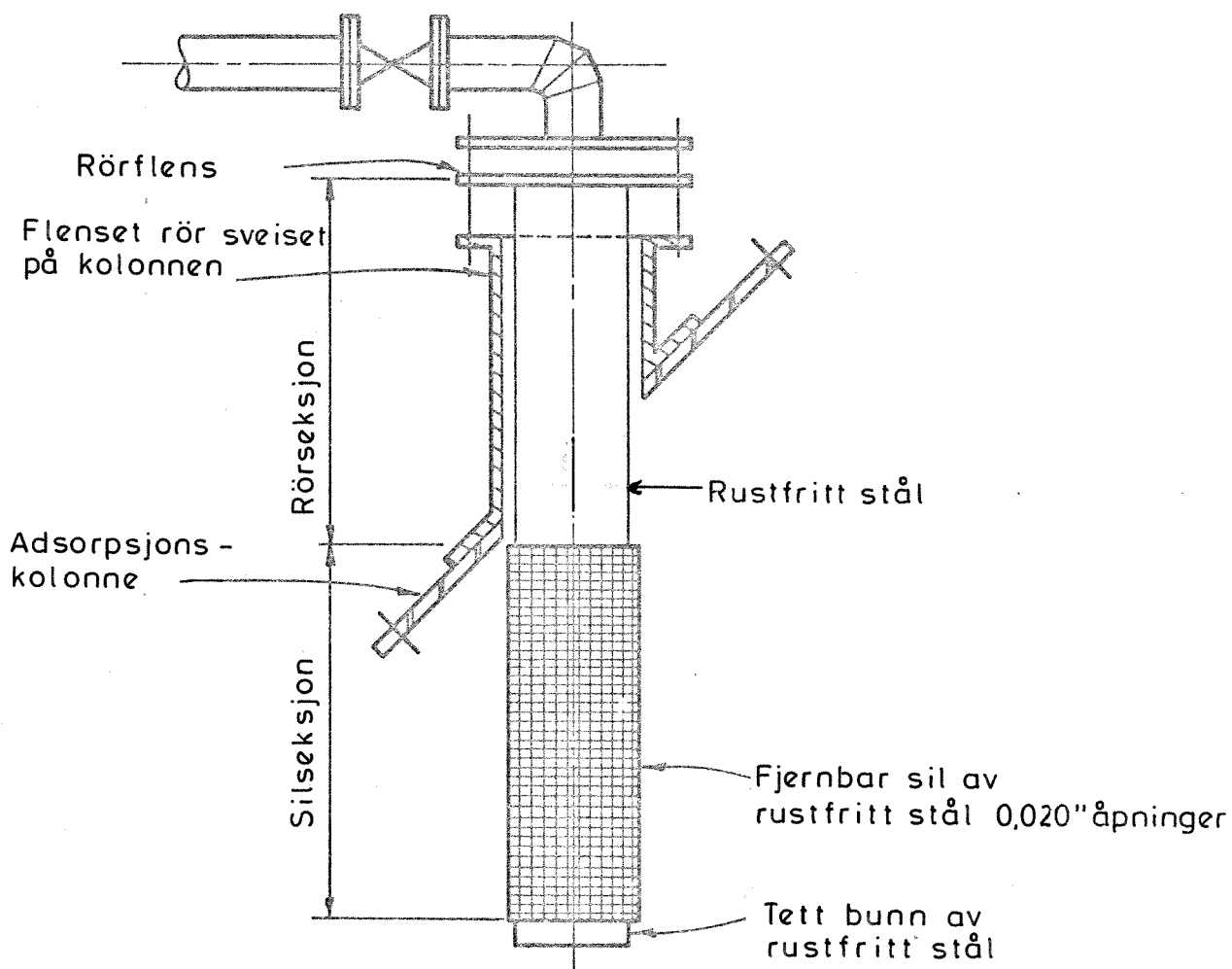


Fig. 10 Avdragsarrangement i topp og bunn i en adsorpsjonskolonne for aktivt kull Orange county, California (EPA's design manual for activated carbon, 1973)

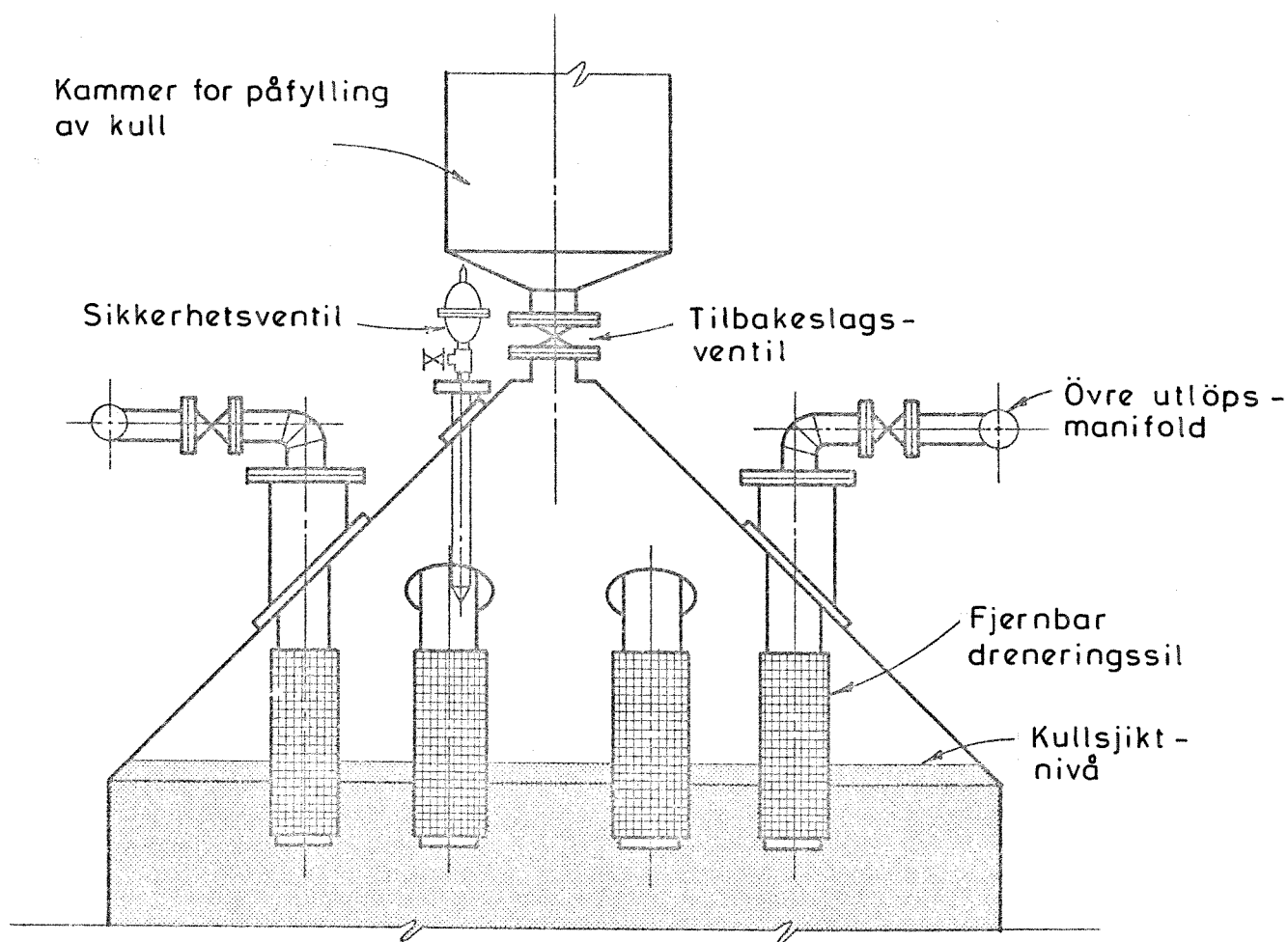


Fig. 11 Vertikalsnitt av utlöpsarrangement i en adsorpsjonskolonne for aktivt kull. Bunnansnittet er utformet på samme måte. Orange county, California (EPA's design manual for activated carbon, 1973)

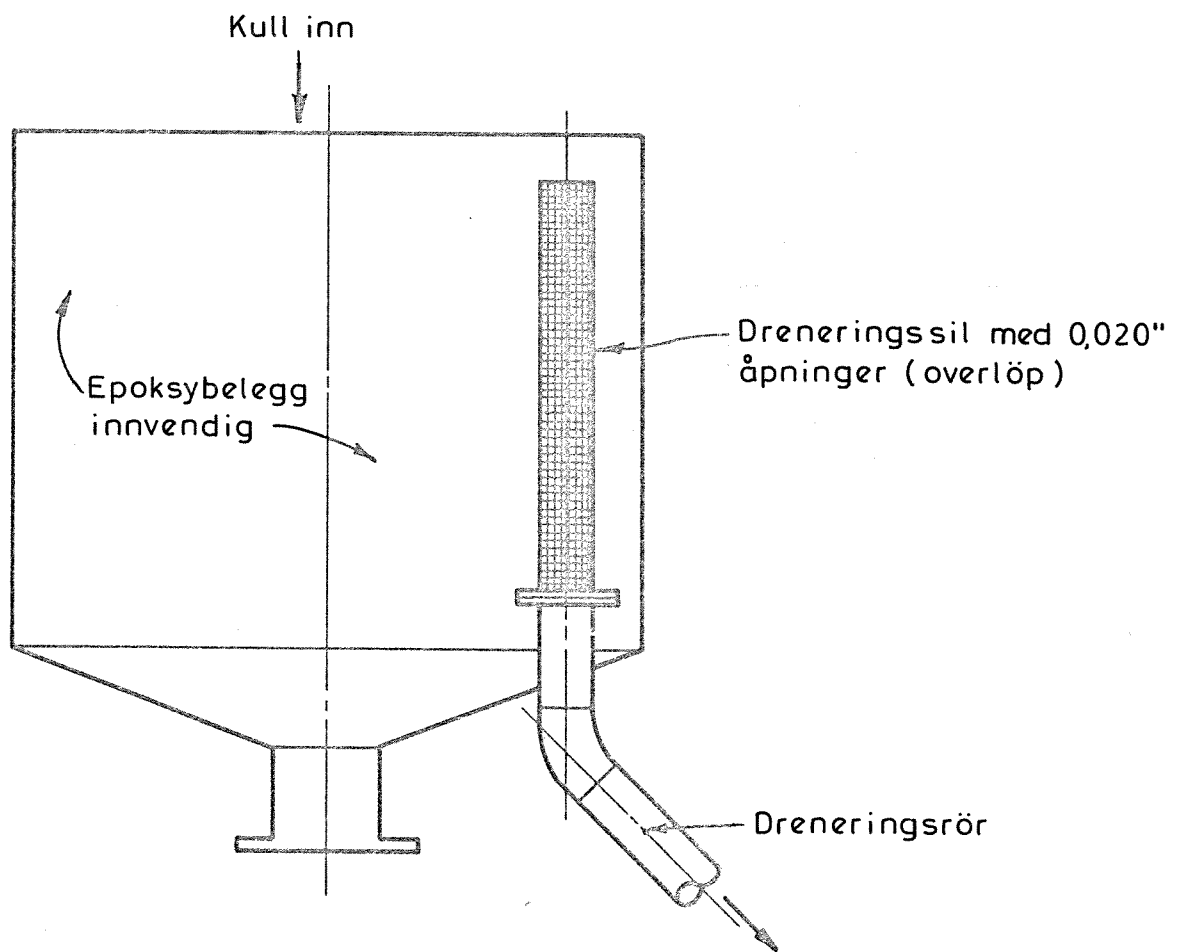


Fig.12 Påfyllingskammer for aktivt kull Orange county, California (EPA's design manual for activated carbon,1973)

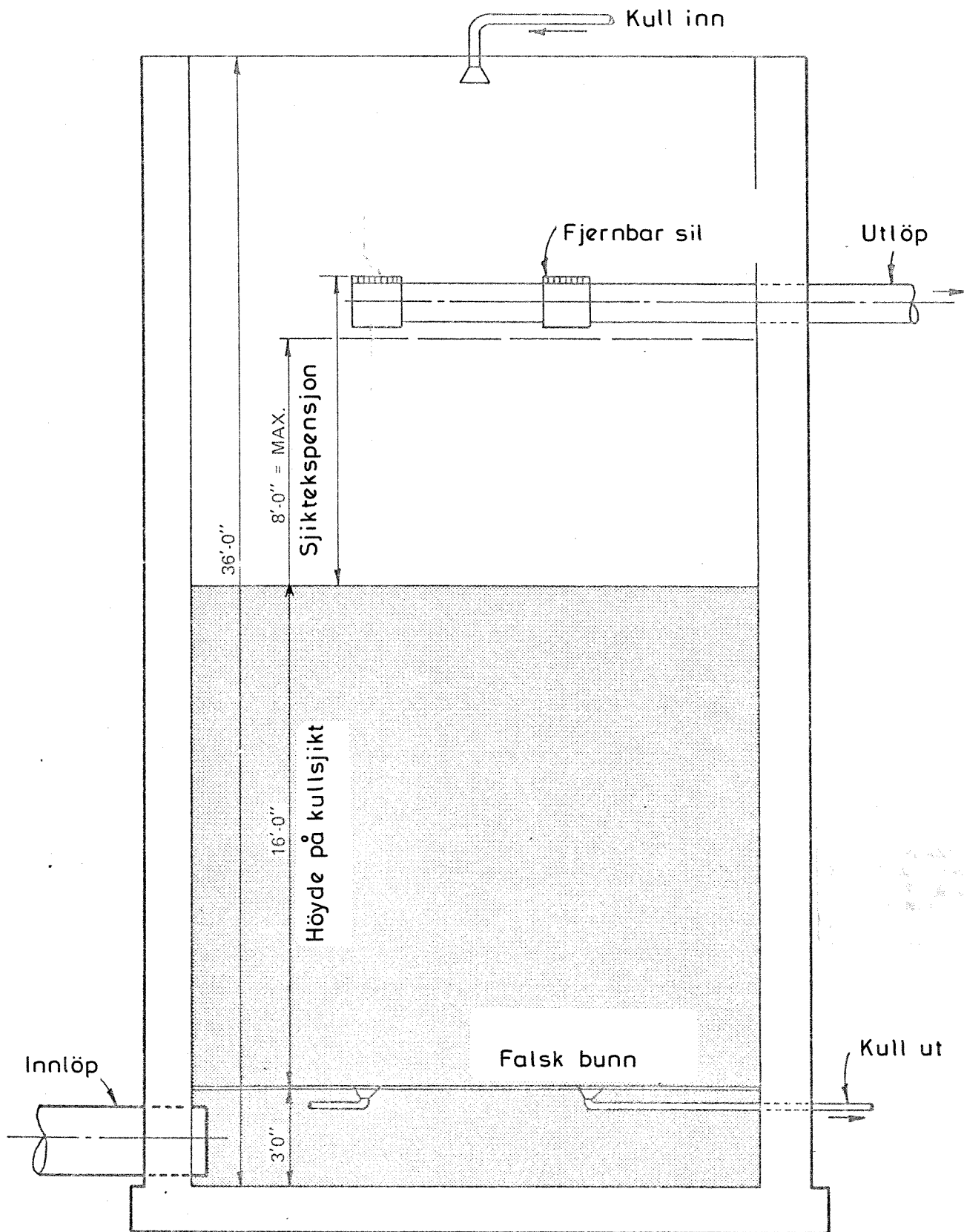


Fig. 13 Åpen oppstrømskolonne med ekspandert sjikt
 Planlagt i Vallejo, California
 (EPA's design manual for activated carbon, 1973)

3.1.3 Adsorpsjonskolonner kan utføres i stål eller betong.

Stål er mest vanlig

Stålkolonner lages runde mens betongkolonner gjerne kan være kvadratiske. Selv om stål er mest vanlig, planlegges det nå et anlegg med betongkolonner i Garland, Texas. Valget mellom stål og betong er økonomisk betinget og må avgjøres i hvert konkret tilfelle. Både betong og stål må korrosjonsbeskyttes. Et epoksybelegg (f.eks. Permacoat) kan brukes. Belegget bør være ca. 0,5 mm tykt (2 strøk). Stål sandblåses før påføring av epoksybelegget.

3.1.4 Satsvis drift gir dårlig utnyttelse av kullet

Hvis man leder avløpsvann gjennom en kolonne med friskt kull og måler konsentrasjonen av organisk materiale som funksjon av tiden, vil det fremkomme en kurve av den type som er vist i fig. 14.

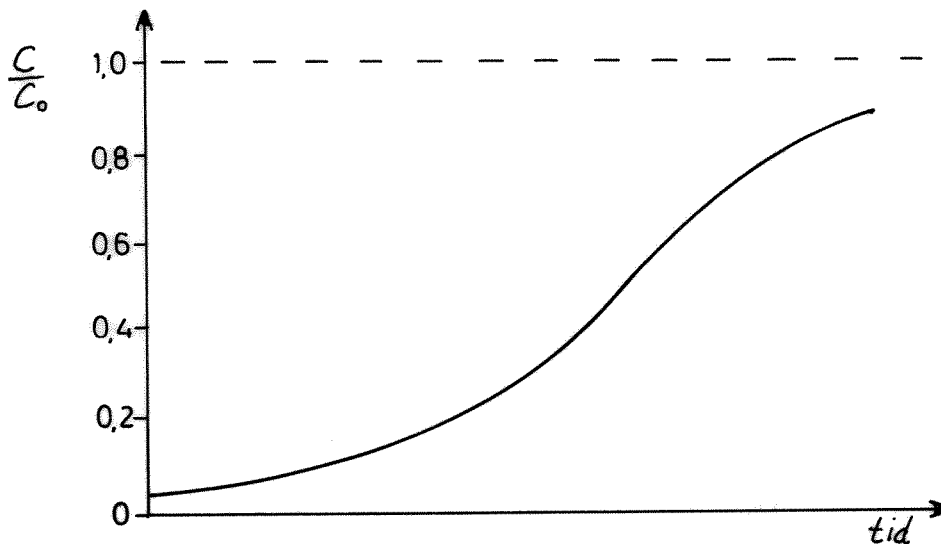


Fig. 14 Skjematisk fremstilling av utløpskonsentrasjonen fra en adsorpsjonskolonne som funksjon av tiden.

En slik kurve kalles en gjennombruddskurve. Når utløpskonsentrasjonen har nådd det høyeste akseptable nivå, tas kolonnen ut av drift, og en ny kolonne settes inn i strømmen. Utløpskonsentrasjonen vil da få et forløp som vist i fig. 15.

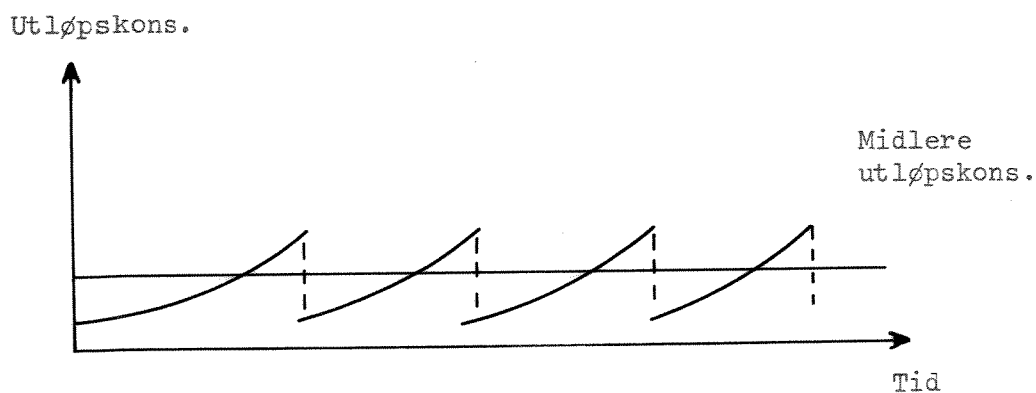


Fig. 15 Typiske variasjoner i utløpskonsentrasjonen fra adsorpsjonsanlegg med satsvis drift av adsorpsjonsenhetene.

Ved satsvis drift utnyttes kulletets kapasitet dårlig (se fig. 16).

Grad av metning

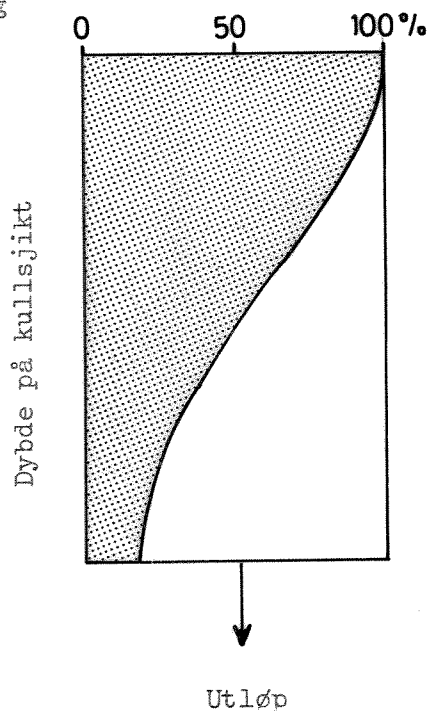


Fig. 16

Skjematisk illustrasjon av konsentrasjonsprofilen gjennom en satsvis drevet kolonne.

Det skraverte arealet viser hvor stor del av kullet som er mettet når en satsvis drevet kolonne må skiftes ut.

3.1.5 Kontinuerlig drift med vann og kull i motstrøm
gir best utnyttelse av kullet adsorpsjonskapasitet

I praksis må dette gjøres ved at vannet går i oppstrøm og kullet i nedstrøm. Forholdene i kolonnen er antydnet i fig.17.

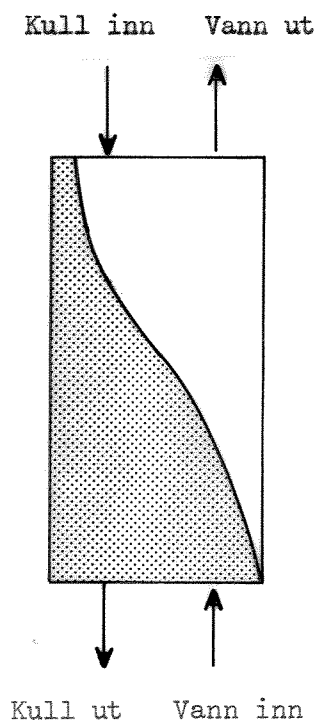


Fig.17 Prinsippskisse av konsentrasjonsprofilen i en kontinuerlig drevet kolonne med vann og kull i motstrøm.

Det kullet som tas ut til regenerering, er maksimalt mettet fordi det står i kontakt med det mest forurensede vannet. Samtidig oppnår en at det vannet som forlater kolonnen, står i kontakt med ferskt kull. Konsentrasjonen i utløpet blir relativt konstant i tiden.

En tilnærmelse til motstrømsprinsippet kan oppnås ved at flere kolonner kobles i serie. Når utløpskonsentrasjonen har nådd den maksimalt tillatte verdi, kjøres den siste kolonnen frem som nest siste kolonne, mens en ny overtar dens plass. Den forreste kolonne (hvor kullet er mest mettet) tas ut til regenerering. En slik prosessutforming blir lett komplisert og kostnader til rør og ventiler store. Mer en tre kolonner i serie brukes nesten aldri (Culp, 1971).

3.2 Valg av prosessutforming

3.2.1 Oppstrømskolonner med vann og kull i motstrøm blir trolig det gunstigste alternativ

Man kan tenke seg en rekke mulige prosessutforminger. Culp (1971) hevder imidlertid at man i praksis stort sett kan regne med to hovedalternativer:

1. Oppstrømskolonner, enten med pakket eller ekspandert sjikt, som blir drevet i parallell.
2. Nedstrømskolonner (2 i serie).

I alternativ 2 kombineres filtrerings- og adsorpsjonsprosessen.

Culp (1971) anser alternativ 1 som det gunstigste bl.a. ut fra den generelle betraktning at det er vanskelig å optimalisere to forskjellige enhetsoperasjoner (filtrering og adsorpsjon) i en og samme kolonne. Oppstrømskolonner kan videre drives kontinuerlig ved at mettet kull tas ut i bunnen og ferskt (regenerert) kull fylles på øverst i kolonnen (se fig. 17).

Nedstrømskolonner må tas ut av drift når kullet skal skiftes ut. Dette vil kreve at man har reservekolonner som kan kobles inn. Oppstrømskolonner som drives med fluidisert eller delvis fluidisert sjikt, trenger normalt ingen tilbakespyling. I tillegg vil kontinuerlig fjerning av kull fra bunnen av kolonnen hindre en oppbygging av suspendert stoff i bunnen. Fluidiserte kolonner kan drives uten filter foran. For kolonner med pakket sjikt er det nødvendig med filter.

Culp (1971) nevner at fullskala oppstrømskolonner med vann og kull i motstrøm har vært i kontinuerlig drift ved South Tahoe fra 1968.

Selv om det kan synes mest riktig å drive en kolonne med vann i oppstrøm, blir likevel ofte nedstrømskolonner brukt. Det er bl.a. muligheten for å gravitere vannet gjennom kolonnen som har gjort nedstrømsalternativet attraktivt. Tabell 5 viser prosessutforming for en del anlegg som er under bygging eller dimensjonering i USA.

Tabell 5 Oversikt over status for kjemisk felling / aktivt kull. EPA's Design Manual for Carbon Adsorption, 1973)

Beliggenhet	Status 1973	Prosjektert av	Midlere kapasitet m^3/d	Kolonnetype	Antall kolonner i serie	Kontakt- tid 1)	Hydraulisk belastn. $m^3/m^2 \cdot h$	Dybde på kullsjikt m	Kull- størrelse	Krav til utløp 2)
1. Cortland, N.Y.	Prosjektering	Stearns & Wheeler	3750	Nedstrøm Trykk	1 eller 2	30	10,5	5,2	8x30	TOF < 35 mg/l
2. Cleveland Ohio	"	Engineering-Science	189000	Nedstrøm Trykk	1	35	9,0	5,2	8x30	BOF < 15 mg/l
3. Fitchburg, Mass.	BYGGING	Camp Dresser & McKee	57000	Nedstrøm Trykk	1	35	8,1	4,7	8x30	BOF < 10 mg/l
4. Garland, Texas	Prosjektering	URS Forest & Cotton	113500 3)	Oppstrøm Nedstrøm	2	30	6,1	3,0	8x30	BOF < 10 mg/l
5. LeRoy, New York	"	Lozier Engineers	3785	Nedstrøm Trykk	2	27	17,8	8,2	12x40	BOF < 10 mg/l
6. Niagara Falls, N.Y.	"	Camp Dresser & McKee	181500	Nedstrøm Gravit.	1	20	8,1	2,7	8x30	KOF < 112 mg/l
7. Owosso, Michigan	"	Ayres, Lewis, Norris & May	22700	Oppstrøm Pakket	2	36	15,1	9,1	12x40	BOF < 7 mg/l
8. Rosemount, Minn.	BYGGING	Banister, Short, Elliot, Hendrickson and Associates	2270	Oppstrøm Nedstrøm	3 (maks)	66 (maks)	10,2	11 (maks)	12x40	BOF < 10 mg/l
9. Rocky River, Ohio	"	Willard Schade & Assoc.	37850	Nedstrøm Trykk	1	26	10,5	4,6	8x30	BOF < 15 mg/l
10. Vallejo, Calif.	Prosjektering	Kaiser Engineers	41000	Oppstrøm Ekspond.	1	26	11,2	4,9	12x40	BOF < 45 mg/l (90% av tiden)

1) Min. basert på tom kolonne.

2) BOF: Biokjemisk oksygenforbruk

KOF: Kjemisk

TOF Totalt

(bestemmes ved forbrenning).

3) 340000 m^3/d er maks. kapasitet.

Tabell 5. Oversikt over status for kjemisk felling / aktivt kull. EPA's Design Manual for Carbon Adsorption, 1973

Beliggighet	Status 1973	Prosjektert av	Midlere kapasitet m ³ /d	Kolonnetype	Antall kolonner i serie	Kontakt-tid l)	Hydraulisk belastn. m ³ /m ² .h	Dybde på kullsjikt m	Kull-støpreeise	Krav til utløp 2)
1. Cortland, N.Y.	Prosjektering	Stearns & Wheeler	37850	Nedstrøm Trykk	1 eller 2	30	10,5	5,2	8x30	TOF < 35 mg/l
2. Cleveland Westerly, Ohio	"	Engineering-Science	189000	Nedstrøm Trykk	1	35	9,0	5,2	8x30	BOF < 15 mg/l
3. Fitchburg, Mass.	Bygging	Camp Dresser & McKee	57000	Nedstrøm Trykk	1	35	8,1	4,7	8x30	BOF < 10 mg/l
4. Garland, Texas	Prosjektering	URS Forest & Cotton	113500 3)	Oppstrøm Nedstrøm	2	30	6,1	3,0	8x30	BOF < 10 mg/l
5. LeRoy, New York	"	Lozier Engineers	3785	Nedstrøm Trykk	2	27	17,8	8,2	12x40	BOF < 10 mg/l
6. Niagara Falls, N.Y.	"	Camp Dresser & McKee	181500	Nedstrøm gravit.	1	20	8,1	2,7	8x30	KOF < 112 mg/l
7. Owosso, Michigan	"	Ayres, Lewis, Norris & May	22700	Oppstrøm Pakket	2	36	15,1	9,1	12x40	BOF < 7 mg/l
8. Rosemount, Minn.	Bygging	Banister, Short, Elliot, Hendrickson and Associates	2270	Oppstrøm Nedstrøm	3 (maks)	66 (maks)	10,2	11 (maks)	12x40	BOF < 10 mg/l
9. Rocky River, Ohio	"	Willard Schade & Assoc.	37850	Nedstrøm Trykk	1	26	10,5	4,6	8x30	BOF < 15 mg/l
10. Vallejo, Calif.	Prosjektering	Kaiser Engineers	41000	Oppstrøm Ekspand.	1	26	11,2	4,9	12x40	BOF < 45 mg/l (90% av tiden)

1) Min. basert på tom kolonne.

2) BOF: Biokjemisk oksygenforbruk

KOF: Kjemisk

TOF: Totalt

(bestemmes ved forbrenning).

3) 340000 m³/d/år er maks. kapasitet.

Man ser at oppstrøm og nedstrøm er tenkt benyttet i omtrent samme utstrekning. Johansson og Neretnieks (1974) påstår at motstrømskolonner er billigere enn periodiske på grunn av bedre utnyttelse av kullet. Burley og Short (1973) har gjort beregninger som viser at kolonner med fluidisert kullsjikt blir det billigste alternativ til rensing av forurenset elvevann til vannforsyning.

3.3 Dimensjoneringsparametre og betydningen av disse

For å kunne beregne størrelsen på adsorpsjonsanlegget må man velge verdier for følgende parametre:

- a) Oppholdstid m.h.p. tom kolonne
- b) Organisk belastning (g KOF fjernet/g aktivt kull)
- c) Strømningshastighet (m/h).

3.3.1 Oppholdstiden bestemmer volumet på adsorpsjonsanlegget

Oppholdstiden er derfor den viktigste dimensjoneringsparameter. I litteraturen kan angitte oppholdstider i pilotforsøk variere fra 10-60 min. I tabell 5 s.39 ser man at oppholdstiden for fullskalaanlegg ligger i området 26-66 min. med ca. 30 min. som middelveidi. Oppholdstiden er avhengig av adsorpsjonshastigheten i karbonsjiktet (se s.19).

3.3.2 Organisk belastning er bestemmende for kapasiteten på regenereringsanlegget

Den organiske belastningen er et mål for hvor mye organisk materiale som kan adsorberes pr. vektenhet kull. Mengde adsorbent er igjen avhengig av konsentrasjonen av løst organisk materiale (se s.17).

For en motstrømskolonne vil den maksimale organiske belastning være den mengde organisk stoff kullet kan adsorbere når det står i likevekt med inngående vann. Svært ofte ligger den organiske belastningen i området 0,3-0,5 g KOF adsorbent/g aktivt kull (Johansson & Neretnieks, 1974).

Men det finnes også eksempler på så vel lavere som høyere belastninger. Valg av organisk belastning er avgjørende for dimensjonering av regenereringsdelen idet den bestemmer hvor mye kull som må skiftes ut pr. tidsenhet. Hvis den organiske belastningen velges for høy, vil konsentrasjonen i utløpet bli for høy. Det vil ofte være slik at den organiske belastningen må justeres etter at anlegget er kommet i drift. Derfor vil det lønne seg å innkalkulere en viss fleksibilitet i regenereringsanlegget.

3.3.3 Strømningshastigheten avgjør lengde:høyde-forholdet på adsorpsjonskolonnen

For strømningshastigheter i området 5-25 m/h vil ikke adsorpsjonshastigheten påvirkes (EPA's manual). Ved lave strømningshastigheter vil imidlertid adsorpsjonshastigheten kunne nedsettes, noe som vil kreve lengre oppholdstid. Man kan altså si at valg av strømningshastighet normalt ikke bestemmes ut fra hensynet til adsorpsjonshastigheten. For oppstrømskolonner vil valg av hastighet bestemmes ut fra

- 1) Ønsket grad av fluidisering (se fig. 6).
- 2) Muligheten for adsorpsjonshastigheten til å tåle hydrauliske belastninger over den dimensjonerende (f.eks. $2 \times Q_{dim}$).

3.3.4 Matematiske modeller gir verdifull forståelse av adsorpsjonsprosessen, men kan ennå ikke brukes til praktisk dimensjonering

Det er gjort noen forsøk på å beregne adsorpsjonsprosessen ved hjelp av matematiske modeller (Keinath et al., 1968, Johansson & Neretnieks, 1974). Disse arbeider må betraktes som verdifulle bidrag til en bedre forståelse av hvordan de ulike faktorer influerer på adsorpsjonen av organisk materiale fra løsninger. Imidlertid er man fortsatt henvist til valg av oppholdstid og organisk belastning ut fra praktiske erfaringer. Disse erfaringer bør man skaffe seg ved pilotforsøk med det aktuelle kull og avløpsvann (hvis man da ikke har relevante data fra fullskala anlegg).

3.4 Regenerering og transport av granulert kull

3.4.1 Regenereringssystem for granulert kull

Mettet kull dras med jevne mellomrom (f.eks. en gang pr. dag) ut fra bunnen av adsorpsjonskolonnene. Kullslurry'en (kan inneholde ca. 25 vektprosent kull) pumpes til regenereringsanlegget for avvanning. Avvanningen starter i en kombinert lagrings- og avvanningstank og avsluttes i en transportskrue. Etter avvanningen mates kullet inn på toppen av en etasjeovn, se skisse i fig. 18. s. 44. Det avvannede kullet inneholder ca. 50% fuktighet. Etter hvert som kullet gradvis beveger seg nedover i etasjene, vil temperaturen stige til 800-930 °C. Regenereringen skjer i en kontrollert atmosfære av damp, karbondioksyd og luft. Organiske forurensninger blir oksydert og avdrevet. Reaksjonene som skjer, er de samme som ved fremstilling (se s. 11-12). Total oppholdstid i ovnen er ca. 30. min. Det varme regenererte kullet avkjøles med rent vann før det vaskes for å fjerne finpartikulært kull. Deretter pumpes kullet tilbake til adsorpsjonsanlegget eller til lagring. Avgassene fra regenereringsovnen inneholder illeluktende komponenter samt en del partikulært materiale. Gassen passerer derfor en venturivasker før den slippes ut i atmosfæren. Vaskevannet returneres til renseanlegget. Fig. 20 viser prinsippet for en venturivasker. En skjematisk oversikt over et typisk regenereringssystem er vist i fig. 19.

3.4.2 Mulige leveringsformer for granulert kull

Granulert kull leveres i USA som bulkvare eller i sekker. Det er vanskelig å si hvilken leveringsform som vil passe best her i landet. Generelt kan sies at leveranse i bulkkvanta forutsetter ekstra lagerplass for kullet. Leveranse i sekker vil nok bli noe dyrere. Avveilingen mellom de to mulighetene må gjøres i hvert konkrete tilfelle.

Granulert kull er lettere å arbeide med enn pulverkull hvor støvning er et problem.

Før kullet transporteres til adsorpsjonskolonnene, blir det vasket i spesielle tanker på samme måte som regenerert kull (se s. 45).

3.4.3 Innen renseanlegget transporteres granulert kull som en vandig suspensjon

Det anbefales 0,25 kg kull pr. liter vann, med 1,5 kg kull pr. liter vann som det maksimale. Det er tilstrekkelig med 2"-rør, og hastigheten i rørene bør ligge i området 1-3 m/s. Pumpene kan være av forskjellige typer; - f.eks. kan sentrifugal- eller membranpumper brukes. Ventiler og rørbend vil bli utsatt for mekanisk slitasje. Man kan velge å lage disse delene med et ekstra slitebelegg, eller man kan bruke vanlig stål og heller lage røropplegget slik at deler lett kan skiftes ut.

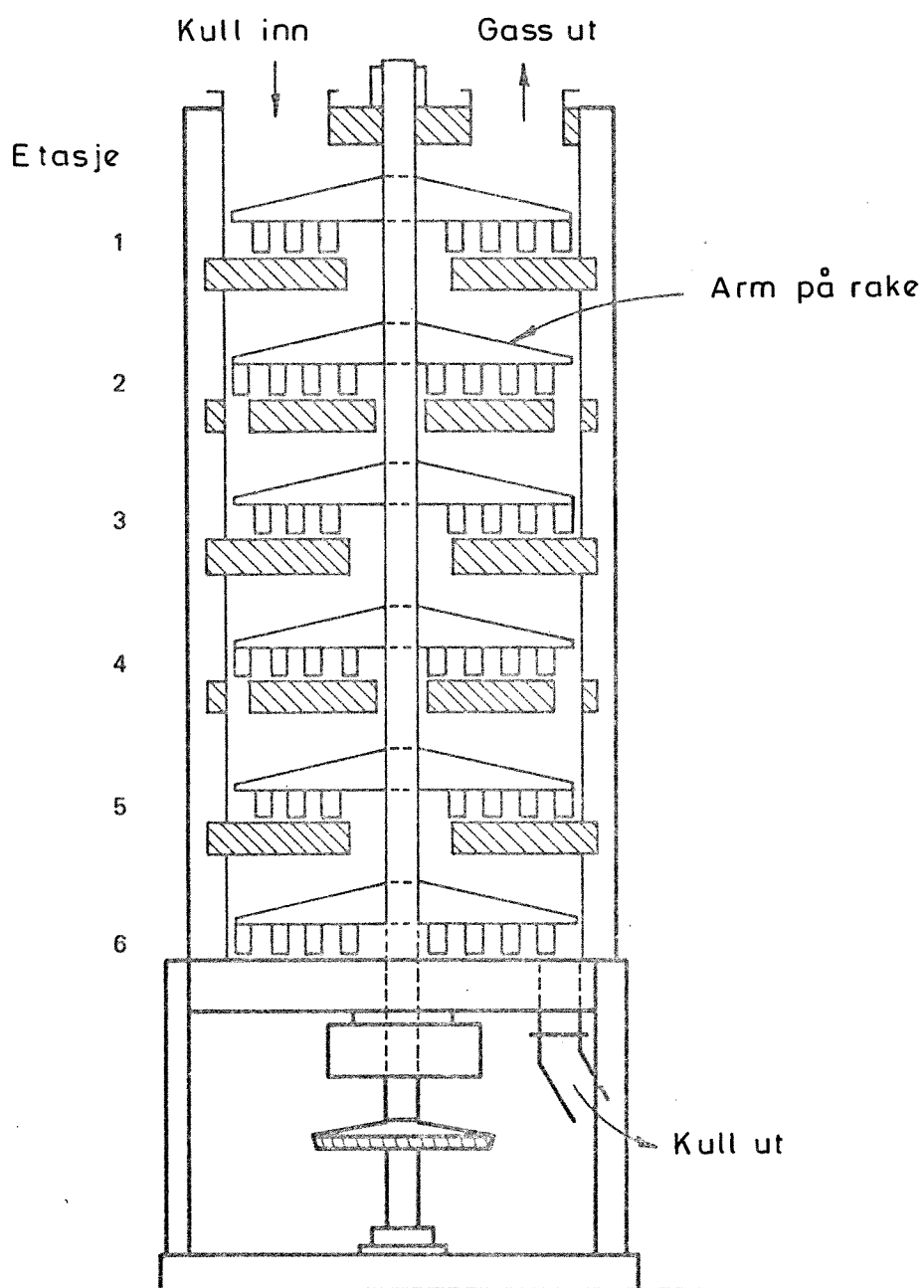


Fig. /8 Vertikalsnitt av en etasjeovn for regenerering av kull
(EPA's design manual for activated carbon, 1973)

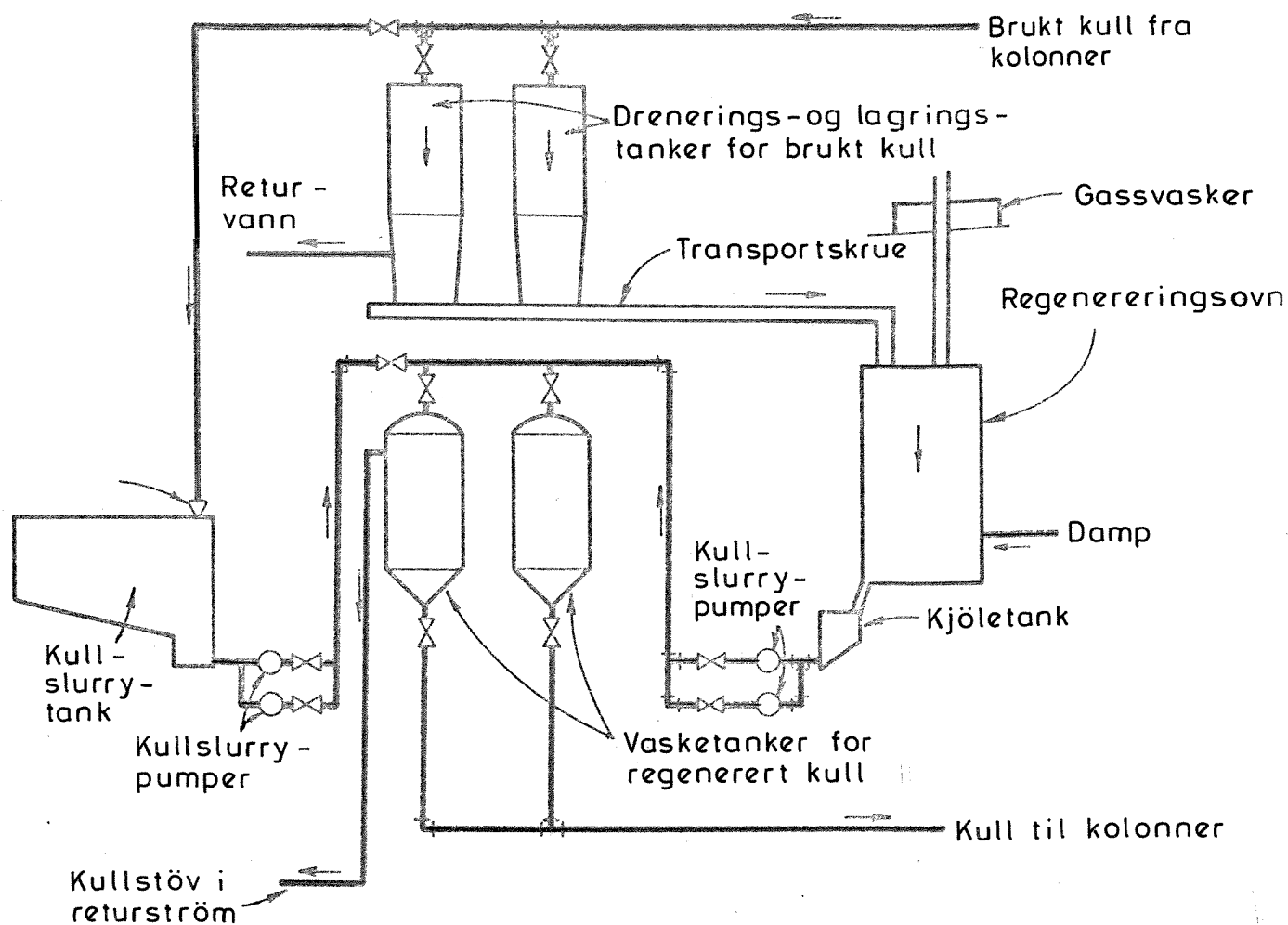


Fig. 19 Flyteskjema for et typisk regenereringsanlegg (EPA's design manual for activated carbon, 1973)

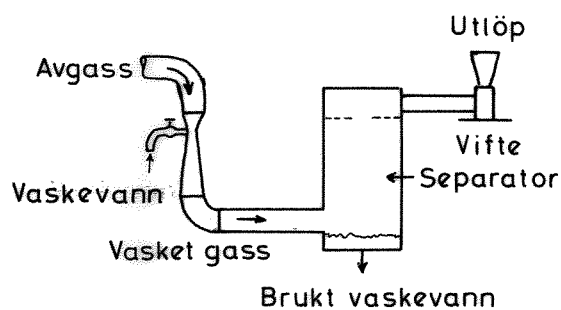


Fig. 20 Skisse av venturivasker.

4. PULVERKULL TIL VANNRENSING

4.1 Prosessteknikk

Pulverisert kull egner seg ikke til bruk i adsorpsjonskolonner. Kullet tilsettes avløpsvannet på samme måte som et vanlig fellingskjemikalie. Etter en innblandings- og flokkuleringsfase skilles kullet fra ved sedimentering og/eller filtrering. Det kan tilsettes koagulanter (f.eks. polyelektrolytter) for å gi en effektiv sedimentering. Ofte brukes et filter som avsluttende trinn i renseprosessen, men det kan sløyfes hvis litt suspendert stoff i utløpet kan aksepteres.

Kombinasjonen kjemisk felling/aktivt kull kan gjøres på to hovedmåter:

1. Kjemisk felling og adsorpsjon på kull i samme trinn (se fig. 21).
2. Kjemisk felling etterfulgt av eget adsorpsjonstrinn (se fig. 22).

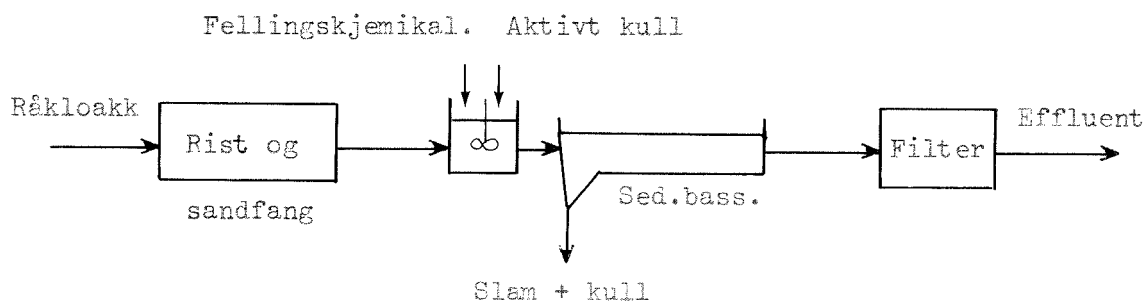


Fig. 21 Skjematisk fremstilling av en kombinasjon av kjemisk felling og adsorpsjon på pulverisert kull. Den kjemiske felling og adsorpsjon skjer i ett og samme trinn.

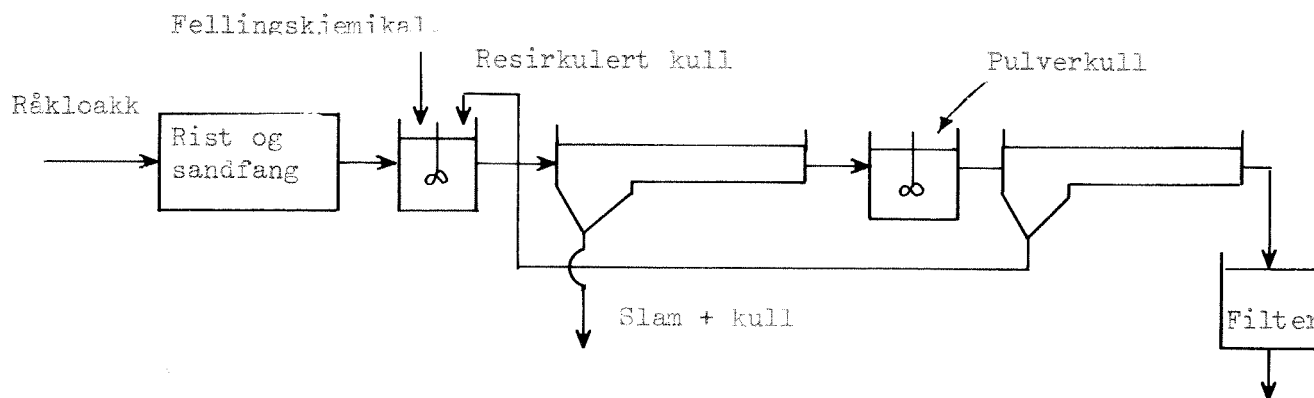


Fig. 22 Skjematisk fremstilling av et alternativ med primærfelling etterfulgt av eget trinn for adsorpsjon på pulverisert kull.

Den kjemiske fellingen skjer ved hjelp av ett av de konvensjonelle fellingsmidler, - jernklorid, aluminiumsulfat eller kalk. Burns og Shell (1973) har ikke funnet at noen av kjemikaliene skiller seg ut som spesielt gunstige. Doseringen av kull må tilpasses mengde organisk stoff i vannet. Vanligvis ligger den i området 200-500 mg kull/l. Nødvendig kontakttid mellom vann og kull oppgis av forskjellige forfattere å være 5 - 30 min. (Olesen, 1972).

4.1.1 Kommersielle anlegg for regenerering av pulverkull er ennå ikke utviklet

Selv om det er demonstrert at regenerering av pulverisert kull er teknisk mulig (Shuckrow et al. (1973), Berg et al. (1970)), kan man nok fremdeles si at det er regenereringen som er flaskehalsen i systemet. Regenereringstapet på 9,7% som rapporteres av Shuckrow et al. (1973), kan synes noe gunstig. Burns & Shell (1973) har fått tap på 17 - 60% under regenerering. De samme forfattere har gitt en oversikt over metoder for regenerering av pulverkull.

4.1.2 Flere trinn i serie reduserer kullforbruket

Hvis man ser bort fra en eventuell regenereringsenhet, vil en kombinasjon av kjemisk felling og pulverisert kull ikke skille seg vesentlig fra et vanlig mekanisk-kjemisk anlegg hva prosessutstyr angår. Imidlertid er det viktig å være klar over det spesielle prosessteoretiske grunnlag for adsorpsjonsprosessen. Mens det med en enkelt motstrøms kolonne er teoretisk mulig å fjerne alle adsorberbare substanser, vil den maksimale adsorpsjon i ett enkelt trinn med innblanding/flokkulering og sedimentering være bestemt av likevektsisotermen for det aktuelle kull og avløpsvann (se s. 16-17). På samme måte som for adsorpsjonskolonner er det viktig å få en motstrømseffekt for en bedre utnyttelse av kullet.

I det følgende illustreres forskjellen mellom ett enkelt kontakttrinn og to trinn i serie med vann og kull i motstrøm. Eksemplet er gjengitt etter Knopp & Gitchel (1970). Et liknende eksempel er vist av Burns og Shell (1973).

Forutsetninger:

Løst KOF i råvann: C_o 138 mg/l
Ønsket utløpskonsentrasjon: C_{ut} 20 "

Adsorpsjonen antas å følge en Freundlichisoterm som er gitt ved

$$X = kC^n \quad (6)$$

hvor

X = mengde adsorbent pr. vektenhet kull, mg KOF/mg kull

k og n er konstanter

C = likevevtskonsentrasjon av organisk stoff (mg KOF/l).

Konstantene k og n ble bestemt eksperimentelt slik at adsorpsjonsisotermen er gitt ved

$$X = 5,9 \times 10^{-4} \times C^{1,47} \quad (7)$$

Problemstilling:

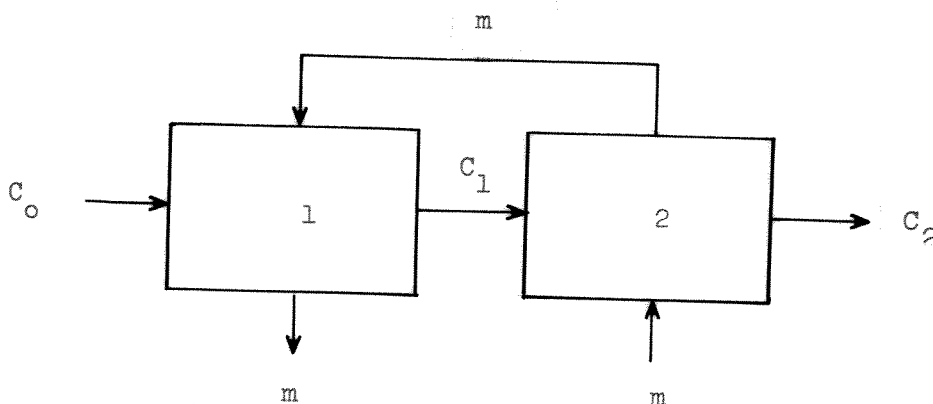
Hvor mye kull må doseres i et ettrinnsystem og et og et totrinnsystem henholdsvis?

a) Ett enkelt blandetrinn

$$X = 5,9 \times 10^{-4} \times 20^{1,47} = 0,048$$

$$\text{Kulldosering: } \frac{138 - 20}{0,048} = \underline{2460 \text{ mg/l}}$$

b) To blandetrinn i serie



Massebalanse for reaktor 1:

$$\frac{C_0 - C_1}{m} = kC_1^n \quad (8)$$

Massebalanse for reaktor 2:

$$\frac{C_1 - C_2}{m} = kC_2^n \quad (9)$$

m = konsentrasjon av kull, mg/l.

Kombinasjon av (8) og (9) gir:

$$C_1^{n+1} - C_2 C_1^n - C_0 C_2^n + C_2^{n+1} = 0 \quad (10)$$

Ved å sette inn i likning (10) følgende verdier

$C_0 = 138$, $C_2 = 20$, kan C_1 beregnes.

$$C_1 = 45 \text{ mg/l.}$$

Verdien for C_1 settes inn i likning (8)

$$m = \underline{590 \text{ mg/l.}}$$

Det viser seg altså at man ved å gå over fra ett enkelt blandetrinn til to blandetrinn i serie har redusert kullforbruket fra 2460 mg/l til 590 mg/l. Ved å koble til enda ett blandetrinn kan karbondoseringen ytterligere reduseres. Imidlertid vil den marginale besparelse avta med økende antall trinn på grunn av økende anleggskostnader.

I et system med "uendelig mange blandetrinn" vil teoretisk kulldosering være som i én kolonne hvor vann og kull går i motstrøm. (Se side 37). Det brukte kullet vil da stå i likevekt med inngående vann:

$$X = 0,00059 \times 138^{1,47} = 0,815$$
$$\text{Kulldosering: } \frac{138 - 20}{0,815} = \underline{145 \text{ mg/l.}}$$

4.1.3 En "virkelig" reaktor har vanligvis større virkningsgrad enn ett teoretisk blandetrinn

Nå viser det seg i praksis at selv om man bare har ett kontakttrinn, så vil rensegraden bli høyere enn for ett teoretisk blandetrinn. Beebe & Stevens (1967) antyder en virkningsgrad tilsvarende to teoretiske blandetrinn med motstrøm for et kontaktsystem som vist i fig.23.

Virkningsgraden vil selvsagt avhenge av utformingen på kontaktenheten. Generelt kan man regne med en virkningsgrad mellom ett og to teoretiske blandetrinn. Biologisk aktivitet kan også influere på virkningsgraden (se s. 24).

- 1 Kloakktilførsel
- 2 Kjemikalietilsats
- 3 Innblandingssone
- 4 Retur av slam
- 5 Flokkuleringssone
- 8 Sedimenteringssone
- 9 Uttak for slam
- 10 Renset vann

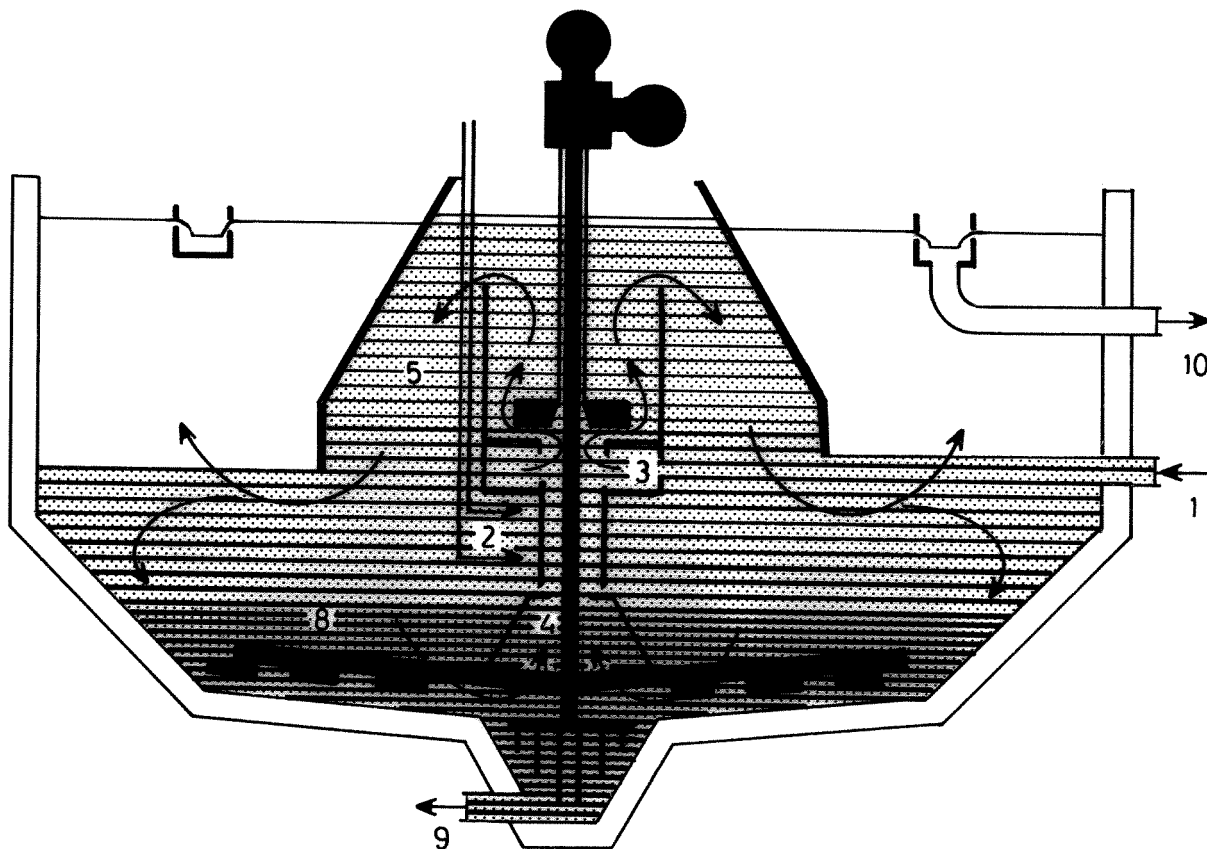


Fig.23 Kontaktenhet for aktivt pulverkull med resirkulering.

4.2 Levering, lagring og dosering av pulverkull

4.2.1 Transport i containere trolig det mest aktuelle

Det finnes tre leveringsformer for pulverkull. Levering i:

1. Sekker
2. Containere
3. Tankbil.

Levering i sekker (25 kg) er kun aktuelt for svært små anlegg. Containere tar vanligvis 0,5 - 1,5 tonn kull og kan brukes på forskjellige anleggsstørrelser. Tankbil brukes på Kontinentet. F.eks. har en produsent i Holland fem tankbiler med kapasitet fra 12,7 til 23 tonn. Vannverk i Holland, Frankrike og Vest-Tyskland er kunder (Aldridge, 1973). Her i landet er kullforbruket beskjedent. Pulverkull leveres derfor i dag i pakker opp til 25 kg. Hvis kull ble brukt på renseanlegg, ville trolig containere være den mest aktuelle leveringsform.

4.2.2 Pulverkull kan lagres på renseanlegget som pulver i silo eller som en 10% suspensjon (vekt/volum)

Lagring i pulverform

Hvis kullet blir transportert til bruker i containere, kan man enten bruke containeren som lagringssilo, eller man kan overføre kullet til egen silo. På Kontinentet kan siloen fylles direkte fra tankbil. Fig. 24 viser et system hvor containeren også er silo. I fig. 25 er vist et system hvor kullet lagres i egen silo.

Lagring som suspensjon

Kullet blir blandet med vann til en 10% suspensjon. Lagringstankene lages av betong. Det er nødvendig med kontinuerlig omrøring for å hindre sedimentering av kullet. Fig. 26 viser et system for lagring av kull som suspensjon. Kullet transporteres i containere på ett tonn. Luften som presses ut av lagringstanken under påfylling av kull, blir sugd gjennom et tekstilfilter for å fjerne kullstøv.

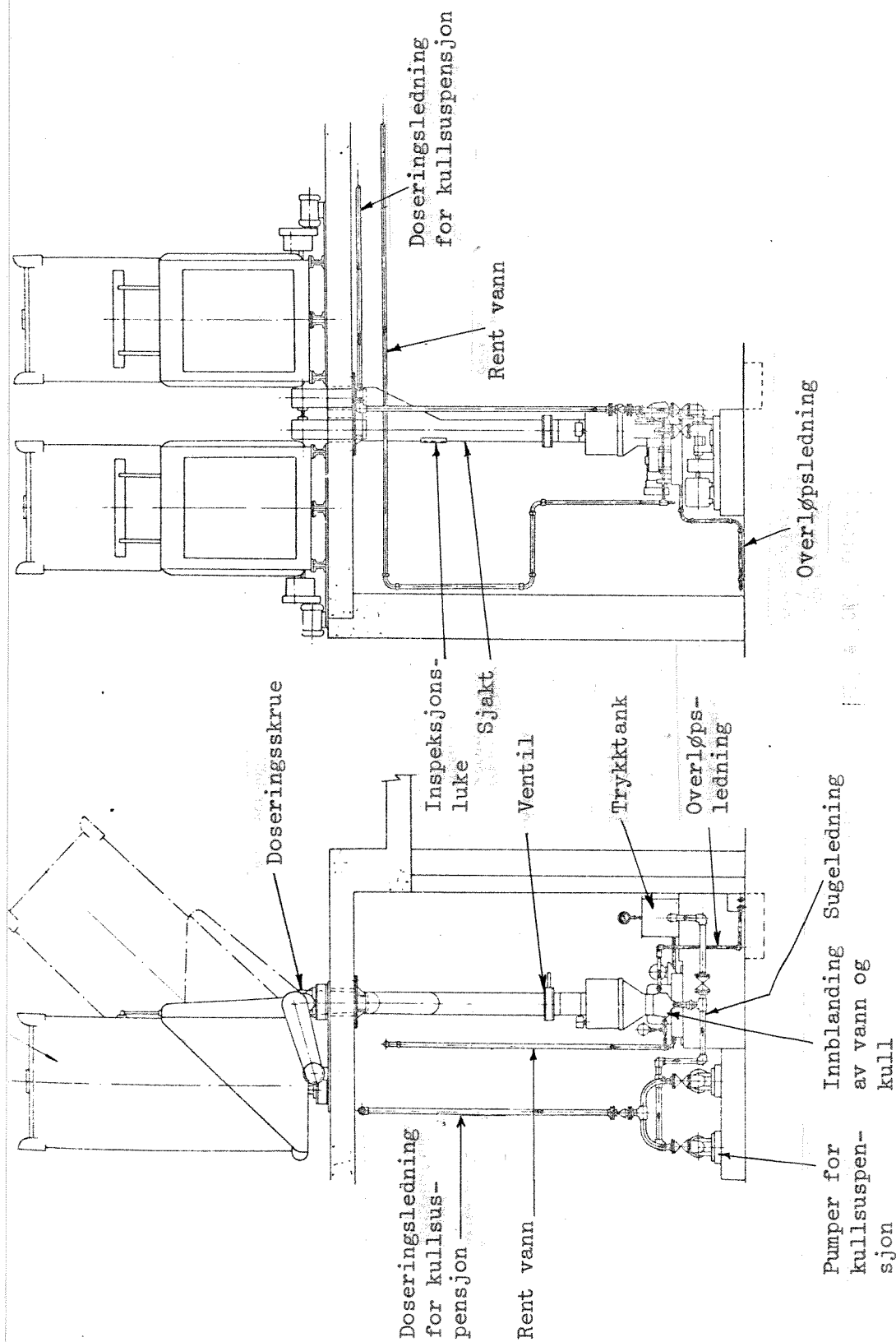


Fig. 24 Skisse av et system med lagring av pulverkull i container og tørrdosering av kullet. (Aldrige, 1973).

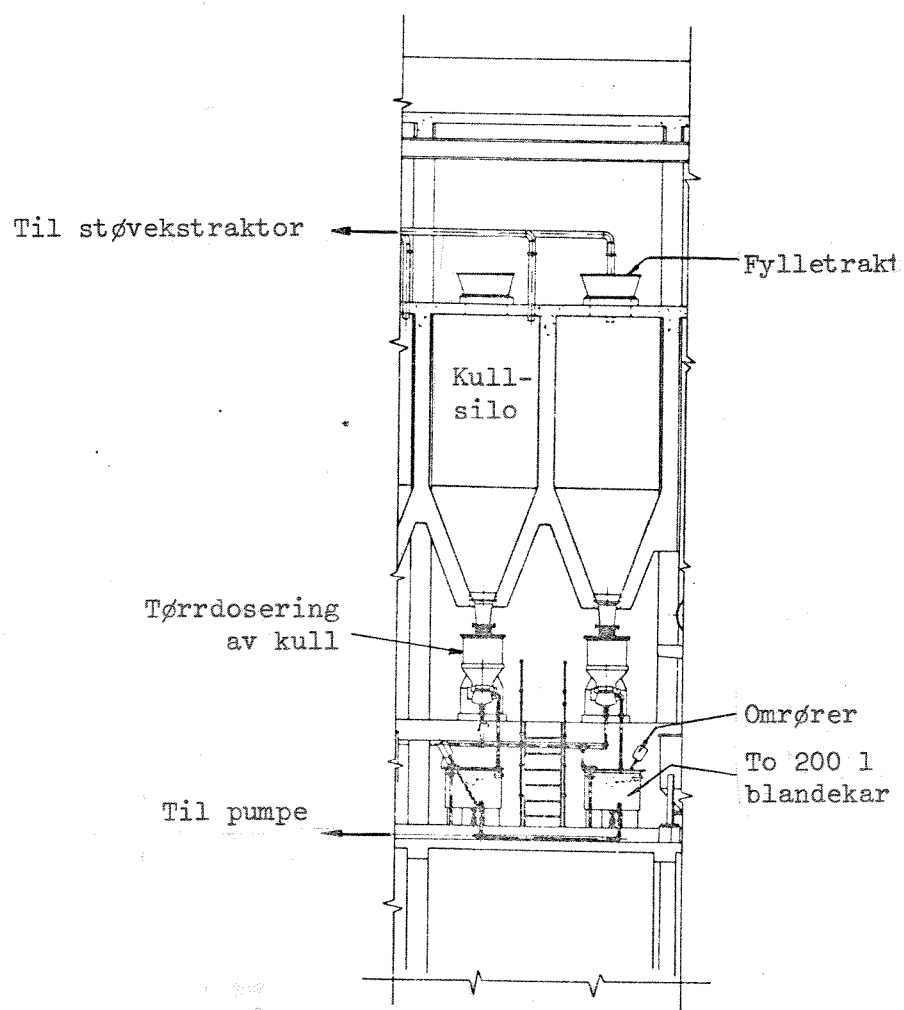


Fig. 25 Skisse av et system hvor pulverkull lagres i siloer og tørrdoseres.
(Aldrigde, 1973)

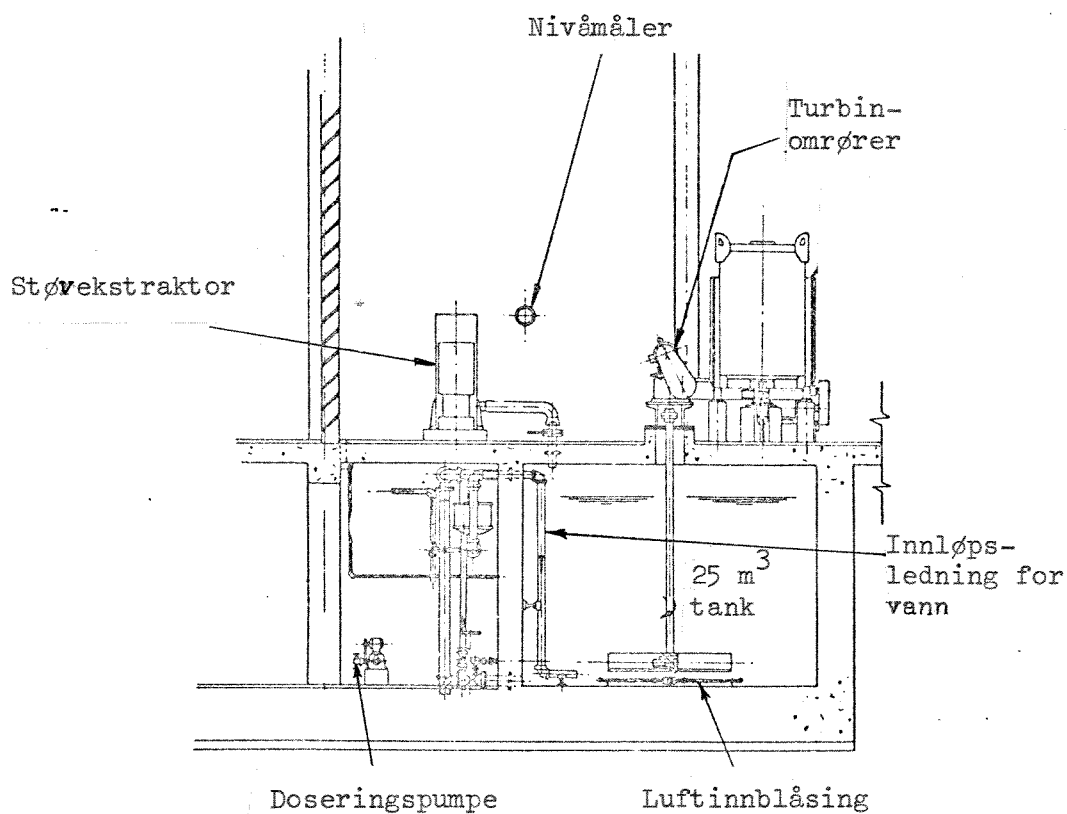


Fig. 26 Skisse av et system hvor pulverkull transporteres i containere og lagres som suspensjon i tanker. (Aldrigde, 1973)

4.2.3 Pulverkull doseres til avløpsvann som en 2-3% suspensjon

Når kullet tørrdoseres fra silo eller container, brukes vanligvis volumetrisk doseringsapparat. Kullet blandes deretter med vann under god omrøring. Vanlige doseringspumper brukes til å pumpe kullsuspensjonen. Sluttkonsentrasjonen i suspensjonen er 2-3% (vekt/volum). Kull som lagres i suspensjon (10%), fortynnes til 2-3% under doseringen. Deler som er i kontakt med suspensjonen, må være korrosjonsbestandige.

5. DIMENSJONERING OG KOSTNADSOVERSLAG FOR HENHOLDSVIS ETTERFELLING OG KJEMISK FELLING - AKTIVT KULL

5.1 Presentasjon av alternativene det blir regnet på

For å kunne vurdere de økonomiske forhold ved bruk av kjemisk felling - aktivt kull i stedet for biologisk-kjemisk rensing, er det i det følgende gjort overslagsberegninger for hvert av alternativene i to størrelser; 2 500 og 25 000 pe. De fire alternativene er presentert nedenfor. Planskisse av anleggene er i bilag 2. 1)

5.1.1 Alternativ Ia. Etterfellingsanlegg for 2 500 pe.

Det biologiske trinnet forutsettes å være lavbelastet uten forsedimentering. Det biologisk-kjemiske slammet fortykkes på anlegget og transporteres bort. Flyteskjema for anlegget er vist i fig. 27 s. 56.

5.1.2 Alternativ Ib. Etterfellingsanlegg for 25 000 pe.

Anlegget består av forsedimentering, normalt belastet biologisk trinn, mellomsedimentering og etterfelling. Slammet fortykkes og avvannes på stedet ved hjelp av sentrifuger.

Flyteskjema for anlegget er vist i fig. 28 s. 57.

5.1.3 Alternativ IIa. Anlegget med primærfelling - pulverkull for 2 500 pe.

Anlegget består av primærfelling, adsorpsjon på pulverkull. Kullslammet fra adsorpsjonsheten resirkuleres til primærfellingen hvor alt slam tas ut. Slammet fortykkes på anlegget og transporteres bort. Det brukte kullet regenereres ikke.

Flyteskjema for anlegget er vist i fig. 29 s. 58.

1) Planskissene er kun å betrakte som hjelpefigurer for overslagsberegningene.

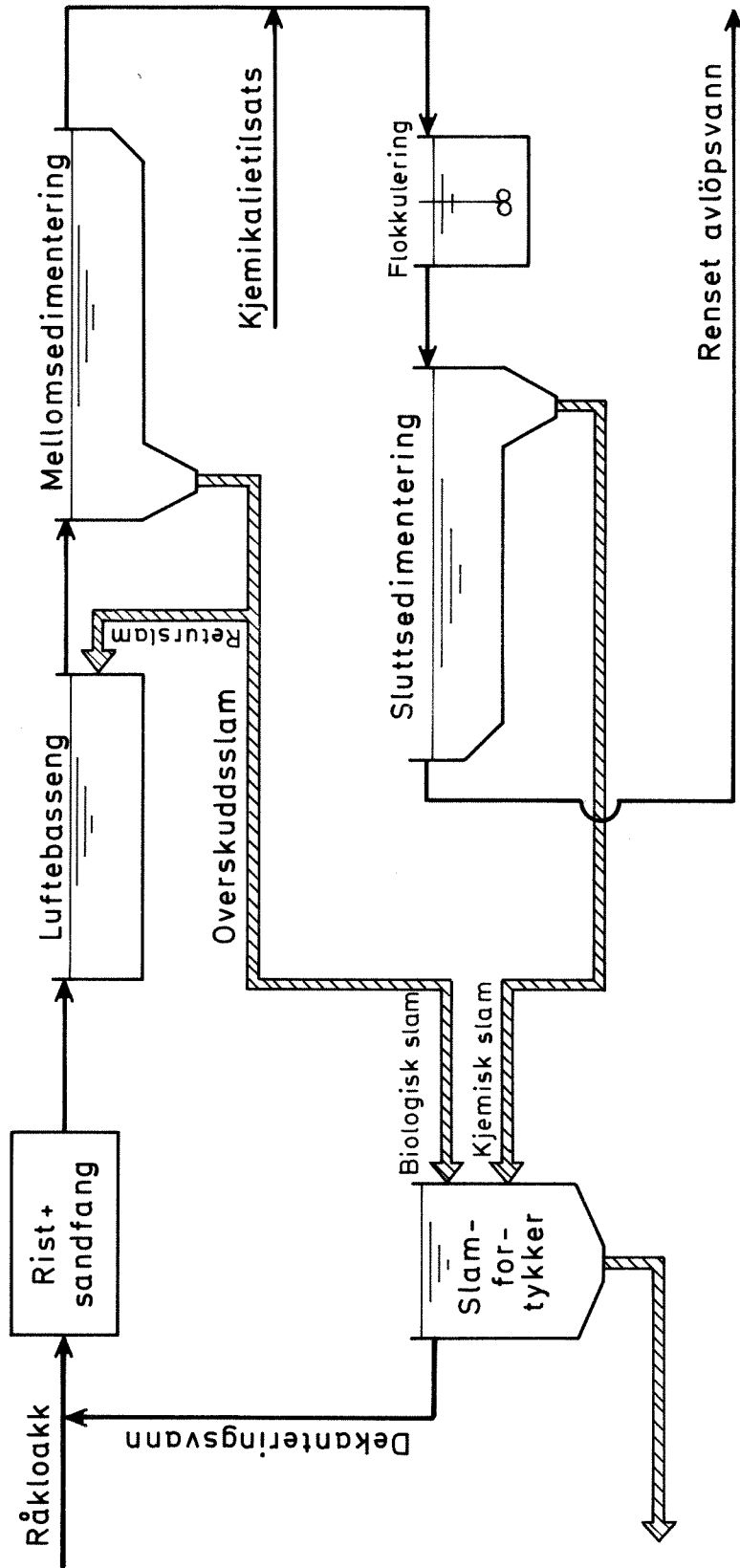


Fig. 27

Alt. I.a. Etterfellingensanlegg for 2500 pe.
Flyteskjema

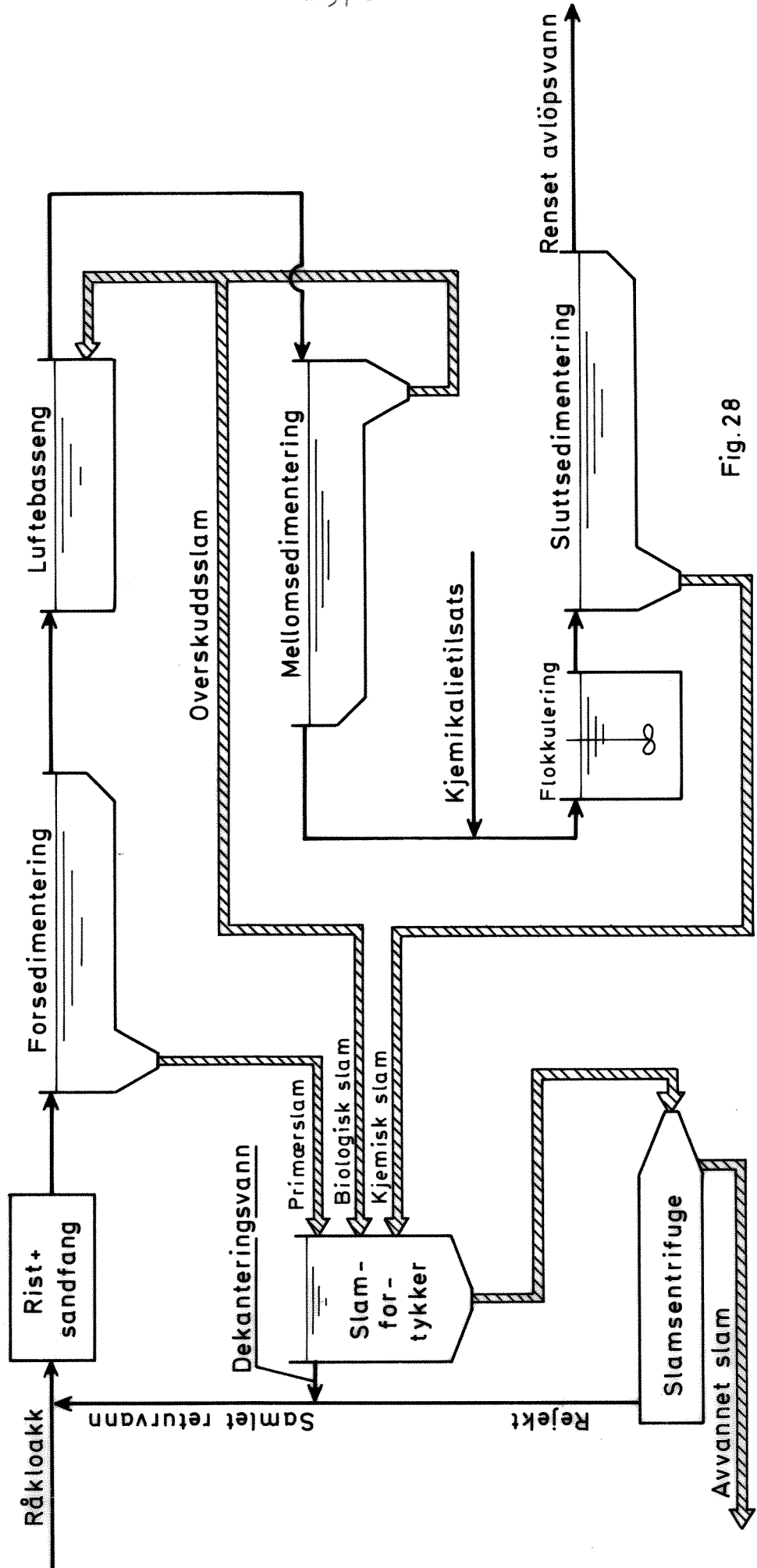


Fig. 28

Alt. I.b. Etterfellingsanlegg
for 25 000pe.
Flyteskjema

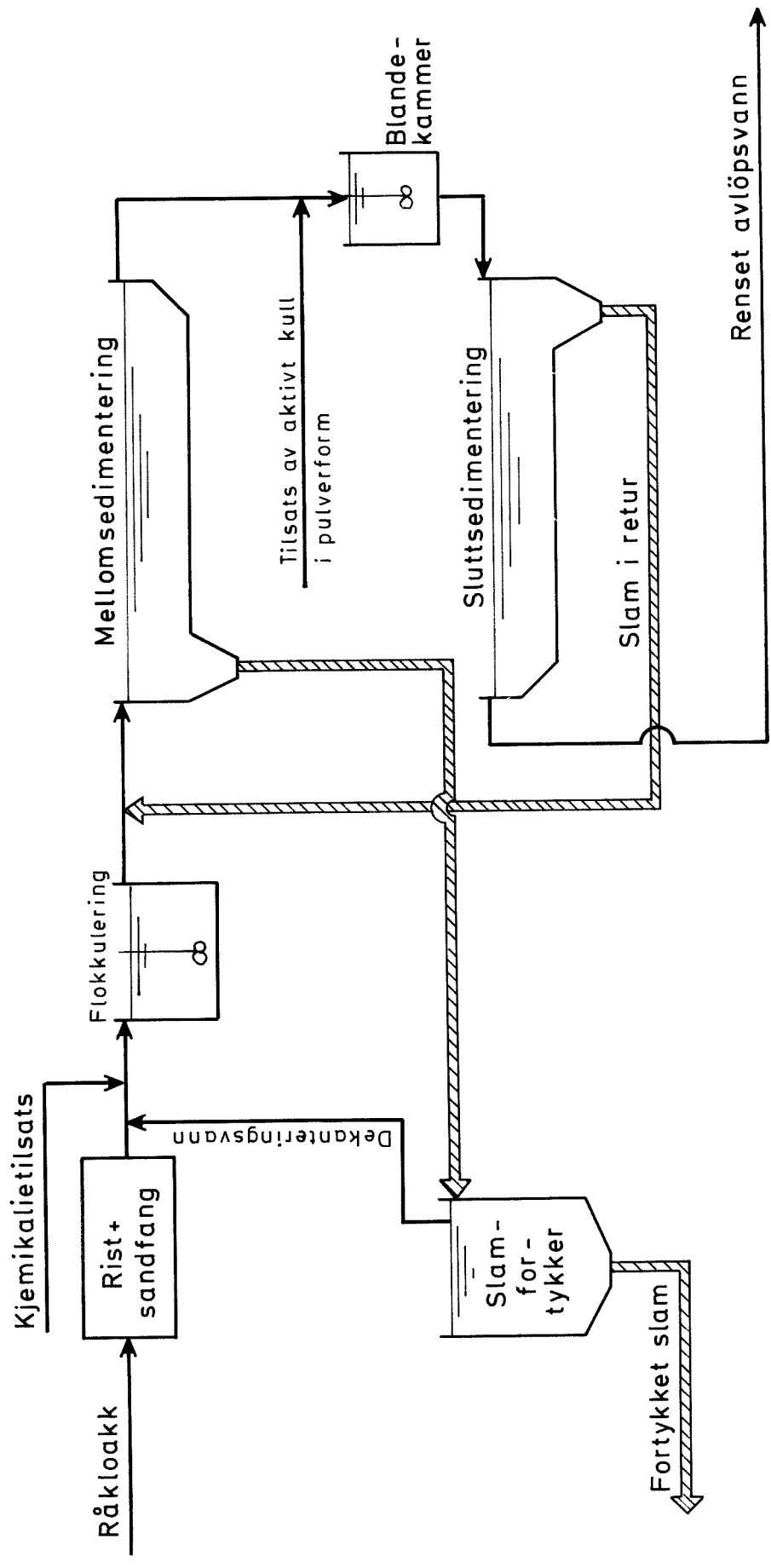


Fig. 29

Alt. II a. Primærfelling/Aktivt kull for 2500pe. Flyteskjema

5.1.4 Alternativ IIb. Anlegg med primærfelling -
granulert kull for 25 000 pe.

Anlegget består av primærfelling, flermediafilter og adsorpsjonsenhet med granulert kull. Slammet fra primærfellingen fortykkes og avvannes på anlegget ved hjelp av sentrifuger. Det granulerte kullet regenereres på stedet. Flyteskjema for anlegget er vist i fig. 30 s. 59.

5.2 Forutsetninger for beregningene

5.2.1 Dimensjoneringsforutsetninger

a. Bassenger.

Samtlige bassenger er dimensjonert i h.t. SNVs¹⁾ retningsgivende tall. Ved beregning av hydraulisk belastning er følgende formel benyttet.

$$Q_{dim} = \left(\frac{q_s \cdot p}{T_s} + \frac{q_d \cdot p}{24} + \frac{q_i}{T_i} \right) m^3/h \quad (//)$$

Hvor q_s = Spesifikt vannforbruk $m^3/p \cdot d$
 q_d = Spesifikk infiltrasjonstilrenning $m^3/p \cdot d$
 q_i = Vannforbruk i industrien m^3/d
 p = Antall personer tilknyttet anlegget
 T_s = Antall timer pr. døgn som Q_s fordeles over
 T_i = Antall timer pr. døgn som Q_i fordeles over.

Følgende verdier er benyttet:

$$\begin{aligned} q_s &= 0.25 \text{ m}^3/p \cdot d \\ q_d &= 0.10 \text{ m}^3/p \cdot d \\ q_i &= 0 \\ T_s &= 16 \text{ timer} \end{aligned}$$

Samtlige sedimenteringsbassenger er tenkt utformet som S2-bassenger. Dette er rektangulære bassenger med dybde 3-4 m. Strømningen i bassengene skjer både horisontalt og vertikalt og utløpsrennene fordeles over en større del av bassengoverflaten.

1) Statens naturvårdsverk, Sverige

Overflatebelastninger og oppholdstider er i følge retningslinjene valgt slik at anlegget skal kunne motta en belastning tilsvarende $2 \times Q_{dim}$ uten at dette forstyrrer de forskjellige behandlingsprosesser i nevneverdig grad. Overflatebelastning og oppholdstider er valgt som følger:

Forsedimentering	: Overflatebelastning	$3.0 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
	Oppholdstid	1.2 h
Luftbasseng	: Oppholdstid 2 500 pe	6.0 h
	25 000 pe	2.0 h
Mellomsedimentering (etter luftbasseng)	: Overflatebelastning	$1.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
	Oppholdstid	2.7 h
Flokkulering	: 4 kamre i hvert basseng	
	Oppholdstid	4 x 10 min.
Sluttsedimentering	: Overflatebelastning	$1.0 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
	Oppholdstid	3.5 h
Primærsedimentering	: Overflatebelastning	$1.0 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
	Oppholdstid	3.5 h.

b. Flermediafilter

Q_{dim}	=	$600 \text{ m}^3/\text{h}$
Hastighet gjennom filter	=	6 m/h
Kapasitet suspendert materiale	=	$4500 \text{ g}/\text{m}^3$
Nødvendig spylevannsmengde	=	$6 \text{ m}^3/\text{m}^2$
Spylingens varighet	=	6 min.
Suspendert stoff inn	=	$60 \text{ g}/\text{m}^3$
Suspendert stoff ut	=	<2 "

c. Adsorpsjonsanlegg

Q_{dim}	=	$500 \text{ m}^3/\text{h}$
Hastighet gjennom kolonnen	=	12.5 m/h
Oppholdstid m.h.p. tom kolonne	=	30 min.
Organisk belastning	=	0.40 kg KOF fjernet/kg kull
KOF inn	=	80 mg O/l
KOF ut	=	20 mg O/l

d. Regenereringsanlegg

Spesifikt ovnsareal = 0.513 m²/100 kg kull, dag.

e. Fortykkere og sentrifuger.

Slamproduksjon.

Ved beregning av den totale slamproduksjon er følgende spesifikke verdier benyttet.

	Tørrstoff	Volum
Alt. Ia	70 g TS/p.d	5.0 l/p.d
Alt. Ib	125 g TS/p.d	7.5 l/p.d
Alt. IIa ¹⁾	200 g TS/p.d	10.0 l/p.d
Alt. IIb	125 g TS/p.d	7.5 l/p.d

Slamfortykkkerne er dimensjonert ut fra en overflatebelastning på 30 kg TS/m².d og et volum (pr. fortykker) tilsvarende minst 1 døgnslamproduksjon. Sentrifugeanlegget er dimensjonert for å kunne avvanne 1 ukens slamproduksjon i løpet av 30 timer.

5.2.2 Forutsetninger for økonomiske beregninger

Følgende forutsetninger er lagt til grunn for kostnadsoverslaget:

1. Masseberegning og enhetspriser gjengitt i bilag 3 og 5.
2. Oversikt over maskinelt utstyr er i bilag 6.
3. Prisnivå: 1974
4. Tillegg for uforutsett : 20%
Tillegg for generalomk.: 10%
Tillegg for prosjekt.
og adm.kost. : 15%
5. Årskostnader = Kapitalkostnader + drift- og vedlikeholdskostnader
6. Anleggets restverdi etter avskrivningstidens utgang settes lik 0

1) Kull + vanlig kloakkslam

7. Rentefot: 7.0% p.a.

8. Avskrivninger:

Anleggsdeler	Avskrivningstid	Annuitet
Bygninger	40 år	7.5%
Mask. + el. utst.	20 år	9.44%

9 Årlig vedlikehold

Anleggsdeler	Vedlikehold
Bygninger	1.5%
Mask. + el. utst.	3.0%

10. Årlige driftsomkostninger

- a. Elektrisk effektbehov er beregnet utfra de nødvendige maskininstallasjonene. (Se bilag 6)
- b. Oppvarming er basert på sentralfyringsanlegg. En har antatt en innvendig temperatur på 15 °C og en luftveksling på 15 g gr. pr. time. Anlegget er forutsatt plassert i østlandsområdet. Ved en utvendig temperatur på under ÷ 5 °C er luftvekslingene satt ned til 10 g gr. pr. time.
- c. Årlige kjemikaliekostnader er beregnet som følger: (Det forutsettes aluminiumsulfat for fellingskjemikalie.)

Kjemikalieforbruk:

Aluminiumsulfat : 150 g/m³
Polyelektrolytt : 2.5 kg/tonn TS

Regenereringstap for granulert kull : 8%

Forbruk av pulverkull : 300 mg/l

Kjemikaliekostnader:

Aluminiumsulfat kr 0,36/kg
Polyelektrolytt " 30,- /kg
Granulert kull " 5,50/kg
Pulverkull " 2,- /kg

d. Lønnsutgifter : kr 70 000,- pr. mann.

5.3 Dimensjonering og økonomiske beregninger

5.3.1 Alt. Ia. Etterfellingsanlegg for 2 500 pe.

Dimensjonering

$$Q_{dim} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$$

Luftbassenger	2 x 150	m ³
Mellomsedimentering	2 x 20	m ²
Flokkulering	2 x 4 x 4,15	m ³
Sluttsedimentering	2 x 25	m ²
Fortykkere	2 x 5.8	m ²
Totalt bygningsareal	510	m ²
Totalt romareal	1800	m ³

Kostnadsoverslag

Investeringskostnader

Bygningsmessige arbeider (bilag 5)	kr 1 261 000,-
Elektriske arbeider	" 160 000,-
Ventilasjoner	" 150 000,-
Maskinelt utstyr	" 740 000,-
	<u>kr 2 311 000,-</u>
20% uforutsett	" 462 000,-
	<u>kr 2 773 000,-</u>
10% generalomkostninger	" 277 000,-
	<u>kr 3 050 000,-</u>
15% prosjektering og administrasjon	" 458 000,-
	<u>kr 3 508 000,-</u>

Totale investeringskostnader eks. MVA kr 3 508 000,-

Spesifikke investeringskostnader eks. MVA kr 1 400/pe

Årskostnader

Kapitaliserte kostnader:

Bygninger	1 261 000 x 1.2 x 1.15 x 0.075	kr 143 600,-	
El.og Mask.	1 050 000 x 1.2 x 1.15 x 0.0944	" 150 500,-	
Sum kapitaliserte kostnader		kr 304 100,-	kr 304 100,-

Vedlikeholdskostnader:

Bygninger	1 261 000 x 1.2 x 1.1 x 0.015	kr 25 000,-	
El.og Mask.	1 050 000 x 1.2 x 1.1 x 0.03	" 41 600,-	
Sum vedlikeholdskostnader		kr 66 600,-	kr 66 600,-

Driftskostnader:

Installert El-effekt fast avgift:

80 kw á	kr 160,-	kr 12 800,-	
Forbruk: 400 000 kwh á	kr 0.033	" 13 200,-	
Ventilasjon og oppvarming		" 40 000,-	

Kjemikaliekostnader:

0.15 x 875 x 365 x 0.36		" 17 200,-	
Bemanning: 1 mann á	kr 70 000	" 70 000,-	
Sum driftskostnader		kr 153 200,-	kr 153 200,-

kr 523 900,-

Totale årskostnader uten slamtransport eks. MVA kr 525 000,-

Spesifikke årskostnader eks. MVA kr 210/pe

5.3.2 Alt. Ib. Etterfellingsanlegg for 25 000 pe.

Dimensjonering

Qdim =	500 m ³ /h	
Forsedimentering	2 x 84	m ²
Luftebassenger	3 x 333	m ³
Mellomsedimentering	3 x 128	m ²
Flokkulering	3 x 4 x 28	m ³
Sluttsedimentering	3 x 167	m ²
Fortykkere	2 x 104	m ²
Sentrifuger	2 x 12.5	m ³ /h
Totalt bygningsareal	2 500	m ²
Totalt romvolum	8750	m ³

Kostnadsoverslag:

Investeringskostnader:

Bygningsmessige arbeider (bilag 5)	kr	4 024 000,-	
Elektriske arbeider	"	350 000,-	
Ventilasjon	"	400 000,-	
Maskinelt utstyr	"	<u>2 150 000,-</u>	
	kr	6 924 000,-	
20% uforutsett	"	<u>1 385 000,-</u>	
	kr	8 309 000,-	
10% generalomkostninger	"	<u>831 000,-</u>	
	kr	9 140 000,-	
15% prosjektering og administrasjon	"	<u>1 371 000,-</u>	
	kr	<u>10 511 000,-</u>	

Totale investeringskostnader eks. MVA kr 10 500 000,-

Spesifikke investeringskostnader eks. MVA kr 420/pe

Årskostnader

Kapitaliserte kostnader:

Bygninger: $4\,024\,000 \times 1.2 \times 1.1 \times 1.15 \times 0.075$	kr	458 100,-	
El. + Mask. $2\,900\,000 \times 1.2 \times 1.1 \times 1.15 \times 0.0944$	"	<u>415 600,-</u>	
Sum kapitaliserte kostnader	kr	873 700,-	kr 873 700,-

Vedlikholdskostnader:

Bygninger $4\,024\,000 \times 1.2 \times 1.1 \times 0.015$	kr	79 700,-	
El. + Mask. $2\,900\,000 \times 1.2 \times 1.1 \times 0.03$	"	<u>114 800,-</u>	
Sum vedlikeholdskostnader	kr	194 500,-	kr 194 500,-

Driftskostnader:

Installert El-effekt fast avgift:

150 kw á kr 160,-	kr	24 000,-	
Forbruk: 800 000 kwh á kr 0.033	"	26 400,-	
Ventilasjon og oppvarming	"	170 000,-	
Kjemikalier:			
Al-sulfat: 0.15 x 8750 x 365 x 0.36	"	172 000,-	
Polyelektrolytt: 2.5 x 3.125 x 365 x 30	"	85 000,-	
Bemanning. 3 mann á kr 70 000,-	"	210 000,-	
Sum driftskostnader	kr	687 900,-	<u>kr 687 900,-</u>
			kr 1 756 000,-

Totale årskostnader eks. MVA kr 1 750 000,-

Spesifikke årskostnader eks. MVA kr 70/pe

5.3.3 Alt. IIa. Anlegg med primærfelling - pulverkull for 2 500 pe.

Dimensjonering

$$Q_{dim} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$$

Flokkulering	2 x 4 x 4.15	m ³
Primærsedimentering	2 x 25	m ²
Fortykkere	2 x 7.1	m ²
Totalt bygningsareal	324	m ²
Totalt romvolum	1140	m ³

Kostnadsoverslag

Investeringskostnader:

Bygningsmessige arbeider (bilag 5)	kr	1 070 000,-
Elektriske arbeider	"	160 000,-
Ventilasjon	"	120 000,-
Maskinelt utstyr	"	800 000,-
	kr	2 150 000,-
20% uforutsett	"	430 000,-
	kr	2 580 000,-
10% generalomkostninger	"	258 000,-
	kr	2 838 000,-
15% prosjektering og administrasjon	"	426 000,-
	kr	3 264 000,-

Totale investeringskostnader eks MVA kr 3 300 000,-

Spesifikke investeringskostnader eks. MVA kr 1 320/pe

Årskostnader

Kapitaliserte kostnader:

Bygninger: $1\ 070\ 000 \times 1.2 \times 1.1 \times 1.15 \cdot 0.075$	kr 121 800,-	
El. + Mask. $1\ 080\ 000 \times 1.2 \times 1.1 \times 1.15 \cdot 0.0944$	" 154 800,-	
Sum kapitaliserte kostnader	kr 276 600,-	kr 276 600,-

Vedlikeholdskostnader:

Bygninger: $1\ 070\ 000 \times 1.2 \times 1.1 \times 0.015$	kr 21 200,-	
El. + Mask. $1\ 080\ 000 \times 1.2 \times 1.1 \times 0.03$	" 42 800,-	
Sum vedlikeholdskostnader	kr 64 000,-	" 64 000,-

Driftskostnader:

Installert EL-effekt fast avgift:

65 kw á kr 160,-	kr 10 400,-	
Forbruk: 300 000 kwh á kr 0.033	" 9 900,-	
Ventilasjon og oppvarming	" 25 000,-	
Kjemikalier:		
Al-sulfat $0.15 \times 875 \times 365 \times 0.36$	" 17 200,-	
Kull $0.30 \times 875 \times 365 \times 2.00$	" 191 600,-	
Bemanning: 1 mann á kr 70 000,-	" 70 000,-	
Sum driftskostnader	kr 324 100,-	" 324 100,-

kr 664 700,-

Totale årskostnader eks. MVA kr 665 000,-

Spesifikke årskostnader eks. MVA kr 266/pe

5.3.4 Alt. IIb. Anlegg med primærfelling - granulert kull for 25 000 pe.

Dimensjonering

Q_{dim} = 600 m³/h (hvorav 100 m³/h utgjør spylevann fra flermediafilter samt vaskevann fra adsorpsjons- og regenereringsdel).

Flokkulering	: 3 x 4 x 33	m ³
Primærsedimentering	: 3 x 200	m ²
Flermediafilter	: 4 x 25	m ²
Adsorpsjonskolonner	: 2 x 174	m ³ , Tv.sn. 20 m ² , høyde: 10.6 m
Regenereringsovn	: Ovnstv. : 9.0	m ²
Fortykker	: 2 x 104	m ²
Sentrifuger	: 2 x 12.5	m ³ /h
Totalt bygningsareal	: 2300	m ²
Totalt bygningsvolum	: 8100	m ³

Kostnadsoverslag

Investeringskostnader:

Bygningsmessige arbeider eks. flermediafilter	kr 2 743 000,-
Bygningsmessig for flermediafilter	" 1 125 000,-
Sum bygningsmessig	kr 3 868 000,-
Maskinelt utstyr eks. filter, adsorp.enhet og reg.enhet	" 1 525 000,-
Maskinelt utstyr filter	" 375 000,-
Adsorpsjonskolonner m/komplett utstyr	" 365 000,-
Komplett regenereringsanlegg	" 2 170 000,-
Elektriske arbeider	" 350 000,-
Ventilasjon	" 400 000,-
Sum bygningsmessig, maskinelt og elektrisk	kr 9 153 000,-
Innkjøp av kull	" 660 000,-
	kr 9 613 000,-
20% uforutsett	" 1 963 000,-
	kr 11 776 000,-
10% generalomkostninger	" 1 178 000,-
	kr 12 954 000,-
15% prosjektering og administrasjon	" 1 943 000,-
	kr 14 897 000,-

Totale investeringskostnader eks. MVA kr 15 000 000,-

Spesifikke investeringskostnader eks. MVA kr 600/pe

Årskostnader

Kapitaliserte kostnader:

Bygninger: 3 868 000 x 1.2 x 1.1 x 1.15 x 0.075	kr	440 400,-	
Kull : 660 000 x 1.2 x 1.1 x 1.15 x 0.075	"	75 000,-	
El. + Mask.			
5 185 000 x 1.2 x 1.1 x 1.15 x 0.0944	"	<u>743 000,-</u>	
Sum kapitaliserte kostnader	kr	1 258 000,-	kr 1 258 000,-

Vedlikeholdskostnader:

Bygninger : 3 868 000 x 1.2 x 1.1 x 0.015	kr	76 600,-	
El. + Mask. : 5 185 000 x 1.2 x 1.1 x 0.03	"	<u>205 300,-</u>	
Sum vedlikeholdskostnader	kr	281 900,-	" 281 900,-

Driftskostnader:

Installert effekt: 280 kw á kr 160,-	kr	44 800,-	
Effektforbruk : 929200 kwh á kr 0.033	"	30 700,-	
Ventilasjon og oppvarming	"	155 000,-	
Kjemikalier:			
Al-sulfat : 0.15 x 8750 x 365 x 0.36	"	172 500,-	
Polyelektrolytt: 2.5 x 3.125 x 365 x 30	"	85 500,-	
Tilskuddskull : 1320 x 0.08 x 365 . 5.5	"	212 000,-	
Fyring av reg.ovn : 9526 kg propan á kr 1.33	"	12 700,-	
Bemannning : 4 mann á kr 70 000,-	"	<u>280 000,-</u>	
Sum driftskostnader	kr	993 200,-	" <u>993 200,-</u> <u>kr 2 533 100,-</u>

Totale årskostnader eks. MVA kr 2 600 000,-

Spesifikke årskostnader eks. MVA kr 104/pe

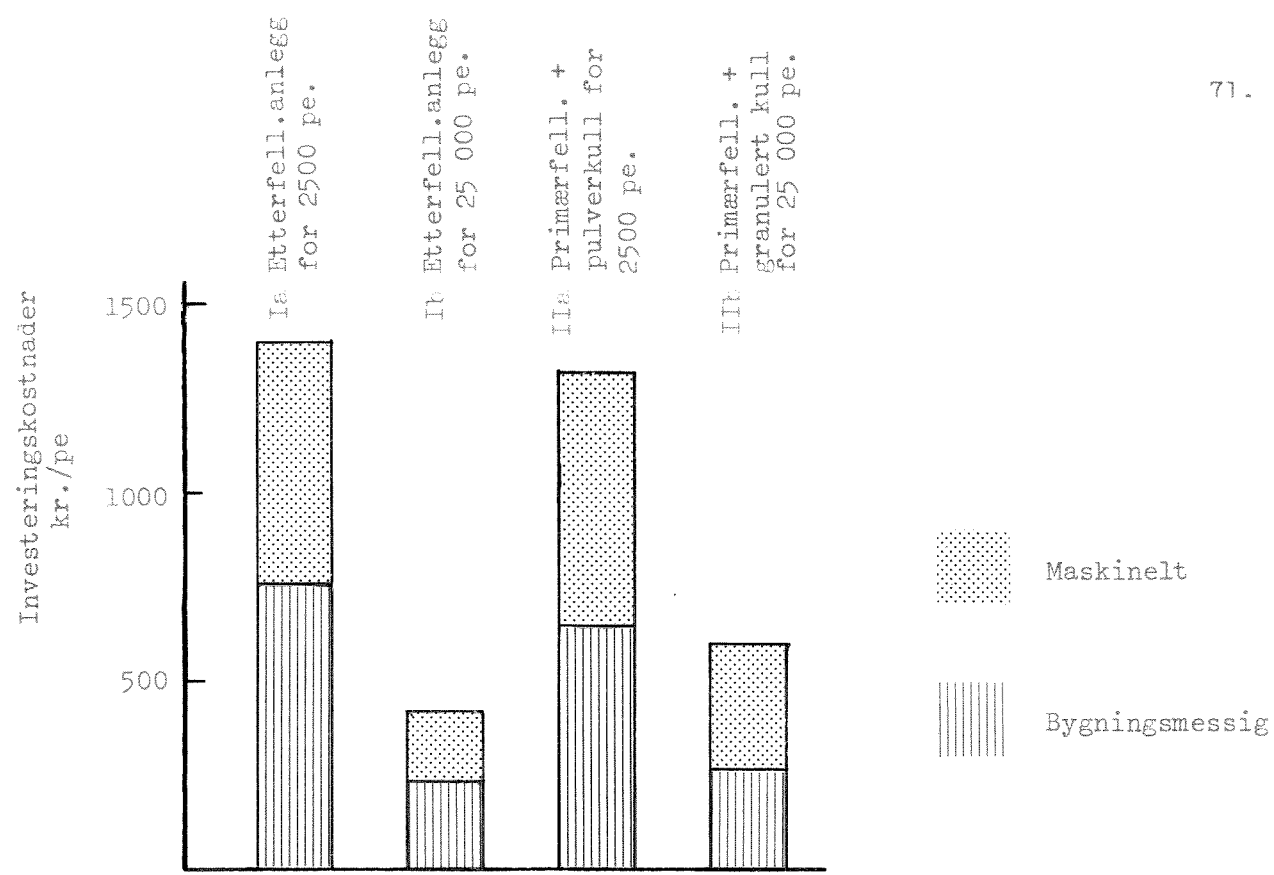


Fig.31 Grafisk fremstilling av spesifikke investeringskostnader (kr./pe) for de fire alternativer.

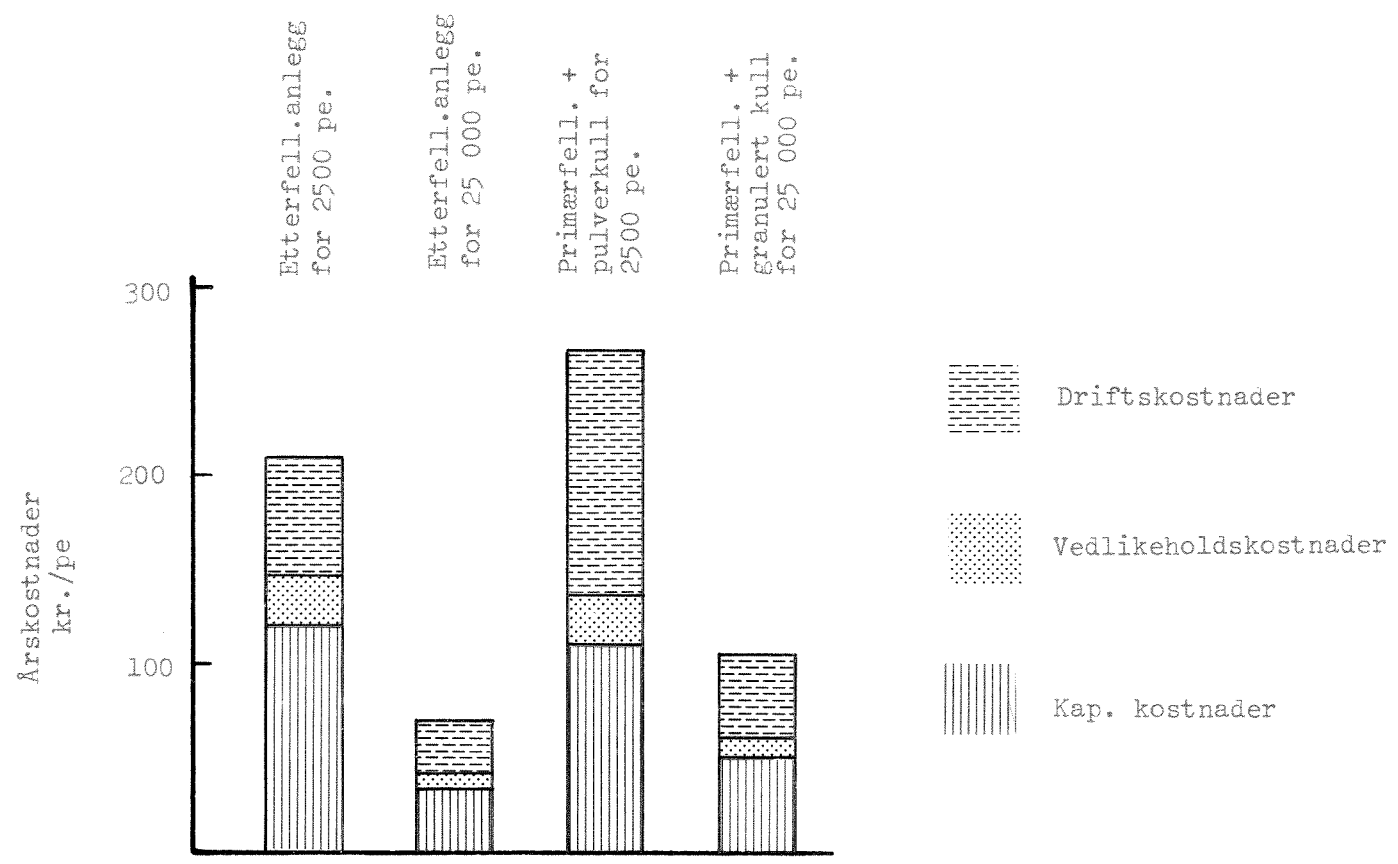


Fig.32 Grafisk fremstilling av spesifikke årskostnader (kr./pe) for de fire alternativer.

6. DISKUSJON

Spesifikke investerings- og årskostnader er fremstilt grafisk i fig.31-32 (kapittel 5).

6.1 Alt. Ia og IIa: Etterfelling og kjemisk felling - pulverkull for 2500 pe.

6.1.1 Investeringskostnader

Overslaget viser at investeringskostnadene for et biologisk-kjemisk anlegg blir litt høyere enn for et anlegg med primærfelling - pulverkull (3,5 mill. mot 3.3 mill.kr.). Differansen skyldes hovedsakelig at etterfellingsanlegget krever større bygningsvolum enn anlegget med primærfelling - adsorpsjon. Investeringskostnadene kan synes noe høyere enn det som ofte fremkommer i generelle kostnadskurver. I våre beregninger er det for etterfellingsanlegget for 2500 pe. forutsatt samme sikkerhet og fleksibilitet (f.eks. ved valg av to separate linjer) som for etterfellingsanlegget for 25 000 pe.

6.1.2 Årskostnader

Årskostnadene på anlegget med adsorpsjon blir noe høyere enn på etterfellingsanlegget (665 000 mot 525 000). Det er kullforbruket som utgjør denne differansen. I beregningene er det forutsatt en dosering på 300 mg/l. En forandring på 50 mg/l vil forandre driftskostnadene med ca. 40 000 kroner pr. år. Prisen på kull er også en usikkerhetsfaktor fordi kull ikke forhandles i så store kvanta her i landet. I årskostnadene er ikke slamtransport inkludert.

Hvis det antas en konsentrasjon på 3% ut fra fortykker for biologisk-kjemisk slam og en transportpris på 30 kr. pr. m³, vil transportkostnadene bli 60 000-70 000 kr. for etterfellingsanlegget. Det er data som tyder på at kullslam har mye bedre sedimenteringsegenskaper enn biologisk-kjemisk slam. Beebe & Stevens (1967) oppgir 2,5-3,0% ut fra sedimenteringsbassenget. Beebe (1973) har funnet at en 0,6-0,8% kullslurry lar seg fortykke til 10% av opprinnelig volum i løpet av 10 min. En kan da trolig regne med en konsentrasjon ut fra fortykker på 5-10%. Med antatt konsentrasjon på 6% vil utgiftene til slamtransport ligge i området 90-100 000 kroner for anlegget med primærfelling - pulverkull.

Medregnet utgifter til slamtransport blir årskostnadene for et etterfellingssanlegg og et anlegg med kjemisk felling - pulverkull ca. 590 000 og 760 000 kroner henholdsvis.

Forholdet mellom årskostnadene for de to alternativer må forventes å bli noenlunde det samme for anlegg ned til ca. 1000 pe.

6.2 Alt. Ib og IIb: Etterfelling og kjemisk felling - granulert kull for 25 000 pe.

6.2.1 Investeringskostnader

Beregningene viser at investeringskostnadene blir betydelig høyere for et anlegg med adsorpsjon på kull enn for et etterfellingssanlegg (15 mill. mot 10,5 mill. kr.). Det er regenereringsanlegg og innkjøp av kull som utgjør differansen. Det antas å være størst usikkerhet i beregning av anleggskostnader for adsorpsjonskolonner med utstyr samt regenereringsanlegg. For regenereringsanlegget har en måttet bruke amerikanske kostnadskurver. (Omregningen til norske kroner har da skjedd etter en kurs på 7 kr. pr. US dollar.) Adsorpsjonskolonner og regenereringsanlegg utgjør bare ca. 25% av totale investeringskostnader slik at en usikkerhet i beregningen av disse anleggsdeler gjør lite utslag i totalkostnadene.

6.2.2 Årskostnader

Det blir høyere årskostnader for et adsorpsjonsanlegg enn for et etterfellingssanlegg (2,6 mill. mot 1,75 mill. kr. ifølge våre beregninger). Av differansen på 0,85 mill. kr. utgjør kapitalkostnader ca. 0,4 mill. kr. mens resten utgjøres hovedsakelig av utgifter til kull og bemanning. Med hensyn til bemanning så er det på anlegget med kulladsorpsjon tenkt å ha to mann på vanlig dagtid og en mann på ettermiddag- og nattskift henholdsvis, slik at det blir en mann mer enn på etterfellingssanlegget. Det er da forutsetningen at regenereringen skal gå kontinuerlig. Bemanningen er bestemt ut fra rent skjønn. Data fra Lake Tahoe (EPA's Design Manual for Carbon Adsorption, 1973) kan tyde på at personalbehovet er større enn det vi har forutsatt.

Av oppsettet på s. 70 ser en at utgiftene til erstatning av kulltap ved regenerering utgjør en stor del av driftskostnadene. Beregningen av

kulltap er basert på 8% av kullforbruk. Muligheter for innsparing ligger her i

- a) lavere kullforbruk
- b) lavere reneringstap
- c) lavere kullpriser.

I våre beregninger er det forutsatt et kullforbruk på 2,5 kg kull pr. kg KOF fjernet. Under praktisk drift kan det selvsagt vise seg at det blir lavere, men det kan også bli høyere.

Regeneringstap oppgis i litteraturen til 5-10% (EPA's DESIGN MANUAL FOR CARBON ADSORPTION, 1973). Med god overvåking av regenereringen og med forbedringer av regenereringsprosessen er det muligheter for å komme ned på f.eks. 5%. På den annen side vil dårlig drift av regenereringsanlegget kunne gi tap som overstiger 10% med tilsvarende økning av driftsutgiftene.

Kullprisen er satt til kr. 5,50 kr. kg. Det er vanskelig å si noe om hvilke muligheter det er for å senke den. For anlegg som er mindre enn 25000 pe., vil kostnadene gå enda mer i favør av et etterfellingsanlegg, mens forskjellen i årskostnader vil bli mindre for anlegg over 25 000 pe. I USA har man i noen tilfeller funnet det mest økonomisk å satse på aktivt kull i stedet for biologisk rensing på store anlegg (se tabell 5 s.39). I Oslofjordkontorets rapport ¹⁾ er årskostnadene for kjemisk felling - aktivt kull anslått å ligge ca. 20% høyere enn for etterfelling.

6.3 Vurdering av rensegrad og driftssikkerhet

Under normale, gunstige forhold (jevn hydraulisk og organisk belastning) kan man regne med at de fire alternativer vil gi omtrent samme fjerning av organisk stoff. En KOF-konsentrasjon i utløpet på 10-40 mg/l er sannsynlig (se s.22). Biologiske anlegg vil imidlertid være ømfintlige for støtbelastninger og giftige stoffer i avløpsvannet. En ren fysiokjemisk prosess (som f.eks. kjemisk felling - aktivt kull) vil kunne tåle organiske støtbelastninger. Eventuelle driftsforstyrrelser vil bli kortvarige, mens det kan ta lengre tid å gjenopprette normale forhold i et biologisk anlegg.

1) Oslofjordkontoret, - Kontor for interkommunalt kloakksamarbeid i indre Oslofjord: "Renere Oslofjord", Oslo 1974.

Selv om mengde organisk stoff i utløpsvannet (målt som KOF) vil bli omtrent det samme for de fire alternativer, vil det være forskjell på type organisk stoff som slippes ut. Ved biologisk rensing vil tungt nedbrytbare stoffer dominere, mens det ved adsorpsjon på kull vil bli lett løselige stoffer i effluenten (disse er gjerne lett nedbrytbare).

På anlegget med granulert kull for 25 000 pe. er det forutsatt filter fordi mengde suspendert stoff ut fra primærfellingen vil være for høyt. Når kolonnene drives med ekspandert sjikt, vil suspendert stoff normalt ikke fjernes i disse.

I etterfellingsanlegg og anlegg med primærfelling - pulverkull vil innholdet av suspendert stoff i utløpsvannet under normale forhold være så lavt at det ikke er nødvendig med filter.

6.4 Anleggsstørrelse og valg mellom pulverkull og granulert kull

Med den nåværende teknologi kan man si at de to realistiske alternativer er

- a) pulverkull uten regenerering
- b) granulert kull med regenerering.

For at bruk av granulert kull med regenerering på anlegget skal bli mer økonomisk enn engangsbruk av pulverkull, må anlegget ligge over en viss minstestørrelse. Det finnes nemlig en nedre grense for størrelsen på kommersielt regenereringsutstyr. Overslagsberegninger tyder på at grensen ligger et sted mellom 2500 og 5000 pe. Beregningene er basert på at merkostnadene ved overgang fra pulverkull til granulert kull hovedsakelig skyldes filter- og renereringsanlegg samt at bemanningen økes med en person. Hvis det blir utviklet regenereringsutstyr for mindre anlegg, eller hvis man får sentrale regenereringsanlegg (f.eks. i tilknytning til slamavvanningsstasjoner), kan det tenkes at granulert kull vil bli det rimeligste alternativ for anlegg mindre enn 2500 - 5000 pe.

6.5 Regenerering på renseanlegget eller på sentralt regenereringsanlegg

Ved bruk av granulert kull må man forutsette at det brukte kullet kan regenereres. Det er vanskelig å fastsette den minste anleggsstørrelse

hvor regenerering på anlegget blir like gunstig som sentral regenerering og transport av kullet. Amerikanske data (EPA's DESIGN MANUAL FOR CARBON ADSORPTION, 1973) tyder imidlertid på at grensen kan ligge i området 15 000 - 25 000 pe. For anlegg som er mindre enn dette, vil regenereringskostnadene bli høye på grunn av dårlig utnyttelse av regenereringskapasiteten.

7. KONKLUSJON

1. Primærfelling - aktivt kull vil gi omtrent samme rensegrad som et etterfellingsanlegg.
 2. Giftstoffer og stoffer som er tungt biologisk nedbrytbare, fjernes best ved adsorpsjon på kull.
 3. Et adsorpsjonsanlegg vil gi muligheter for større driftssikkerhet enn et etterfellingsanlegg.
 4. Årskostnadene for anlegg med aktivt kull vil bli høyere enn for etterfellingsanlegg (25-50%) når anleggene er for 25 000 pe. eller mindre.
 5. For anlegg mindre enn 2500 - 5000 pe. vil bruk av pulverkull være billigere enn bruk av granulert kull og regenerering på renseanlegget.
 6. For anlegg mindre enn 15 000 - 25 000 pe. vil regenerering på sentrale regenereringsanlegg og transport av kull lønne seg.
 7. Med utgangspunkt i dagens teknologi finnes det ingen økonomisk begrunnelse for bruk av kjemisk felling - aktivt kull til rensing av kommunalt avløpsvann. En fortsatt teknisk utvikling på området kan imidlertid føre til at det blir nødvendig å revurdere den nåværende konklusjon.
- B. En bør derfor ta sikte på å følge med i utviklingen på området.

----oOo----

8. LITTERATUR

- ABRAM, J.C.: The Characteristics of Activated Carbon.
Papers and Proceedings of a Water Research Association conference
held at the University of Reading 3-5 April 1973. Paper 1, pp 1-30.
- ALDRIDGE, J.L.: Design of Systems for applying Powdered Activated Carbon.
Papers and Proceedings of a Water Research Association conference
held at the University of Reading 3-5 April 1973. Paper 7,
pp. 148-158.
- BAILLEUL, G., BRATZLER, K., HERBERT, W. und VOLLMER, W.:
Aktive Kohle und ihre industrielle Verwendung. Ferdinand Enke
Verlag, Stuttgart, 1962.
- BEEBE, R.L.: Activated Carbon Treatment of Raw Sewage in Solids-
contact Clarifiers. Office of Research and Monitoring, U.S.
Environmental Protection Agency, Washington D.C., 1973.
- BEEBE, R.L. and STEVENS, J.I.: Activated Carbon Systems for Wastewater
Renovation. Water and Waste Eng. Jan. 1967, pp.43-45.
- BERG, E.L., VILLIERS, R.V., MASSE, A.N. and WINSLOW, L.A.:
Thermal Regeneration of Spent Powdered Carbon using Fluidized-bed
and Transport Reactors. Water, 107, (67), pp. 154-164, 1970.
- BURLEY, M.J. and SHORT, C.S.: Economics of Activated Carbon Treatment.
Papers and Proceedings of a Water Research Association conference
held at the University of Reading 3-5 April 1973. Paper 10,
pp. 203-241.
- BURNS, D.E. and SHELL, G.L.: Physical-Chemical Treatment of a Municipal
Wastewater using Powdered Carbon. U.S. Environmental Protection
Agency, Washington D.C., 1973.
- BURNS, D.E. and SHELL, G.L.: Carbon Treatment of a Municipal Wastewater.
J. Water Pollut. Control Fed., 46, (1), pp. 148-164, 1974.
- COOPER, P.F. and BAILEY, D.A.: Physico-Chemical Treatment Prospects
and Problems in the U.K. Effl. and Water Treat. Jour., Dec. 1973,
pp. 754-761.
- CULP, R.L. and CULP, G.L.: Advanced Wastewater Treatment. van Nostrand
Reinhold Company, New York, 1971.
- FORD, D.L.: The Applicability of Carbon Adsorption in the Treatment
of Petrochemical Waste-waters. Progress in the Water Technology,
Vol. I. Pergamon Press Inc., New York, 1972.
- JOHANSSON, R. and NERETNIEKS, I.: Purification of Municipal Waste Water
by Adsorption on Granular Activated Carbon - An Economic Study.
Vatten, 1, pp. 54-69, 1974.

- KEINATH, T.M. and WEBER Jr., W.J.: A Model for the Design of Fluid-bed Adsorbers. J. Water Pollut. Control Fed., 40, pp. 741-765, 1968.
- KNOPP, P.V. and GITCHEL, W.B.: Wastewater Treatment with Powdered Activated Carbon regenerated by Wet Air Oxidation. Proceedings of the 25th Industrial Waste Conference. Purdue University, May 1970, pp. 687-698.
- MATTSON, J.S. and MARK Jr., H.B.: Activated Carbon. Marcel Dekker, Inc., New York, 1971.
- OLESEN, D.E.: Powdered Carbon Treatment of Municipal Wastewater. University of Washington, 1972, pp. 44-62.
- REBHUN, M. and STREIT, S.: Physico-Chemical Treatment of Strong Municipal Wastewater. Water Res., 8, pp. 195-201, 1974.
- SHELL, G.L. and BURNS, D.E.: Advanced Wastewater Treatment Methods. Effl. and Wat. Treat. Jour., April 1973, pp. 203-208.
- SHUCKROW, A.J., DAWSON, G.W. and BONNER, W.F.: Physical-Chemical Treatment of Combined and Municipal Sewage. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., 1973.
- SIGWORTH, E.A. and SMITH, S.B.: Adsorption of Inorganic Compounds by Activated Carbon. J. AWWA, June 1972, pp. 386-391.
- TOFFLEMIRE, J., HETTLING, L.J. and SHUSTER, W.W.: Activated Carbon Adsorption and Polishing of Strong Wastewater. J. Water Pollut. Control Fed., 45, (10) p. 2166, 1973.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY: Process Design Manual for Carbon Adsorption. October 1973.
- WEBER, W., HOPKINS, C.B. and BLOOM, R.: Physico-Chemical Treatment of Wastewater. J. Water Pollut. Control Fed., 42, p. 83, 1970.
- WESTERMARK, M. a): Avancerad rening av kommunalt avloppsvatten med adsorptions metoder. Statens naturvårdsverk, Forskningssekretariatet, Stockholm 1973.
- WESTERMARK, M. b): Adsorption of Organic Compounds from Municipal Wastewater on Activated Carbon - a Kinetic Study. Royal Institute of Technology, Dep Chem Eng Stockholm 1973.

-99-

Target

ark

OVERSIKT OVER NOEN AV DE VANLIGSTE KARAKTERISERINGS-
PARAMETRE FOR AKTIVT KULL

Metylenblått-tallet (Methylene blue number)

Metylenblått-tallet er antall milligram metylenblått som adsorberes pr. gram kull i en løsning med en metylenblått-konsentrasjon på 1,0 mg/l.

Mikropore (Micropore)

Porer i aktivt kull som har en diameter mindre enn 1000 Å.

Melassetall (Molasses number)

Melassetallet beregnes som forholdet mellom optisk tetthet i en melasse-løsning behandlet med et referansekull og optisk tetthet i en løsning behandlet med det aktuelle kullet. Metoden brukes av Pittsburgh Activated Carbon Company. Melassetallet er et uttrykk for kulletts evne til å adsorbere substanser med høy molekylvekt.

Partikkeltetthet, fuktet i vann (Particle density, wetted in water)

Tettheten av kull i vann når det antas at alle porer er fylt med vann. Beregningen skjer ved å bruke faktisk tetthet og porevolum.

Partikkelstørrelse (Particle size)

Vanligvis refererer dette uttrykket til to siktstørrelser (enten i U.S. Sieve Series eller Tyler Series) som mesteparten av kullet faller mellom. F.eks., 8 x 30 betyr at mesteparten av kullet passerer en Nr. 8 sikt, men holdes tilbake på en Nr. 30 sikt.

Tilsynelatende tetthet (Apparent density)

Vekt pr. volumenhet av et homogent aktivt kull. For å oppnå jevn pakking av granulert kull under målingen, brukes en vibrerende beholder som måleinnretning.

Midlere partikkeldiameter (Average particle diameter)

Dette er en veid midlere diameter på granulert kull. Det kjøres en siktanalyse, og midlere partikkeldiameter beregnes ved å multiplisere vekten av hver siktfraksjon med dets midlere diameter. Produktene adderes og divideres med prøvens totale vekt. Den midlere diameteren på hver fraksjon er beregnet som middelveiden av siktåpningen på den sikt hvor fraksjonen ligger og den over.

Sjikt-tetthet, etter tilbakespyling og drenering

(Bed density, backwashed and drained)

Vekt pr. volumenhet (på tørr basis) i et kullsjikt som er blitt tilbakespylt og drenert. Denne verdi er vanligvis lavere enn tilsvarende verdi for tilsynelatende tetthet på grunn av klassifisering etter størrelse ved tilbakespyling.

Effektiv størrelse (Effective size)

Den siktstørrelsen som slipper gjennom 10 prosent av kullprøven og holder tilbake de resterende 90 prosent. Effektiv størrelse bestemmes vanligvis ved interpolering av en kumulativ partikkelstørrelses-fordeling.

Hårdhetstall (Hardness number)

Hårdhetstallet er et mål for kulletts evne til å stå imot knusing når det utsettes for mekanisk påkjenning av stålkuler i en beholder (en såkalt Ro-Top machine). Beregningen skjer ved å bruke vekten av kull som holdes tilbake på en bestemt siktstørrelse etter at kullet er blitt utsatt for den mekaniske påkjenningen.

Jodtallet (Iodine number)

Jodtallet er milligram jod adsorbent av ett gram kull som står i likevekt med en løsning av 0,02 N jod. Målingen skjer ved å sette en kullprøve til en jodløsning og ekstrapolere til 0,02 N ved å anta helningen på adsorpsjonsisotermen. Jodtallet kan sees på som et mål for kulletts evne til å adsorbere små molekyler.

Makropore (Macropore)

Porer i det aktive kullet som har en diameter større enn 1000 Å (10^{-7} m).

Siktstørrelse (Mesh size)

Partikkelstørrelsen på granulert kull som den blir bestemt ved "the U.S. Sieve Series" (en amerikansk standard). Partikkelstørrelses-fordelingen innen en siktserie blir oppgitt i spesifikasjonen for kullet.

Partikkelstørrelses-fordeling (Particle size distribution)

Fordelingen bestemmes ved å ryste en kullprøve gjennom en serie av sikter. Deretter beregnes vektfraksjonen på hver sikt.

Porestørrelses-fordeling (Pore size distribution)

Det er et mål for porestrukturen i aktivt kull. Kumulative fordelinger gir sammenhengen mellom porestørrelse (diameter eller radius) og volumet av porer. Den deriverte av den kumulative fordelingen angir den brøkdel av porevolumet som ligger mellom to porestørrelser. Fordelingen i mikroporer beregnes fra nitrogens adsorpsjonsisotermer mens fordelingen i makroporer måles med et kvikksølv penetrometer. Fordelingen av mikroporer kan brukes til å forutsi adsorpsjonskapasiteten for forskjellige molekylstørrelser. Makroporefordelingen influerer på adsorpsjonshastigheten.

Porevolum (Pore volume)

Summen av makro- og mikroporer i kullet, med andre ord det totale volum. Det uttrykkes som volum pr. vektenhet.

Virkelig tetthet (Real density)

Det er tettheten av skjelettet i en kullpartikkel. Tallet ligger vanligvis nær tettheten for grafitt.

Overflateareal (Surface area)

Uttrykkes som overflate pr. vektenhet kull ($m^2/gram$). Overflaten i aktivt kull bestemmes vanligvis ved nitrogen-adsorpsjon etter Brunauer, Emmett og Teller (BET-metoden).

Jevnhetskoeffisient (Uniformity coefficient)

Koeffisienten bestemmes ved å dividere siktåpningen (i mm) på en sikt som slipper gjennom 60 prosent av prøven med den siktåpningen som slipper gjennom 10 prosent.

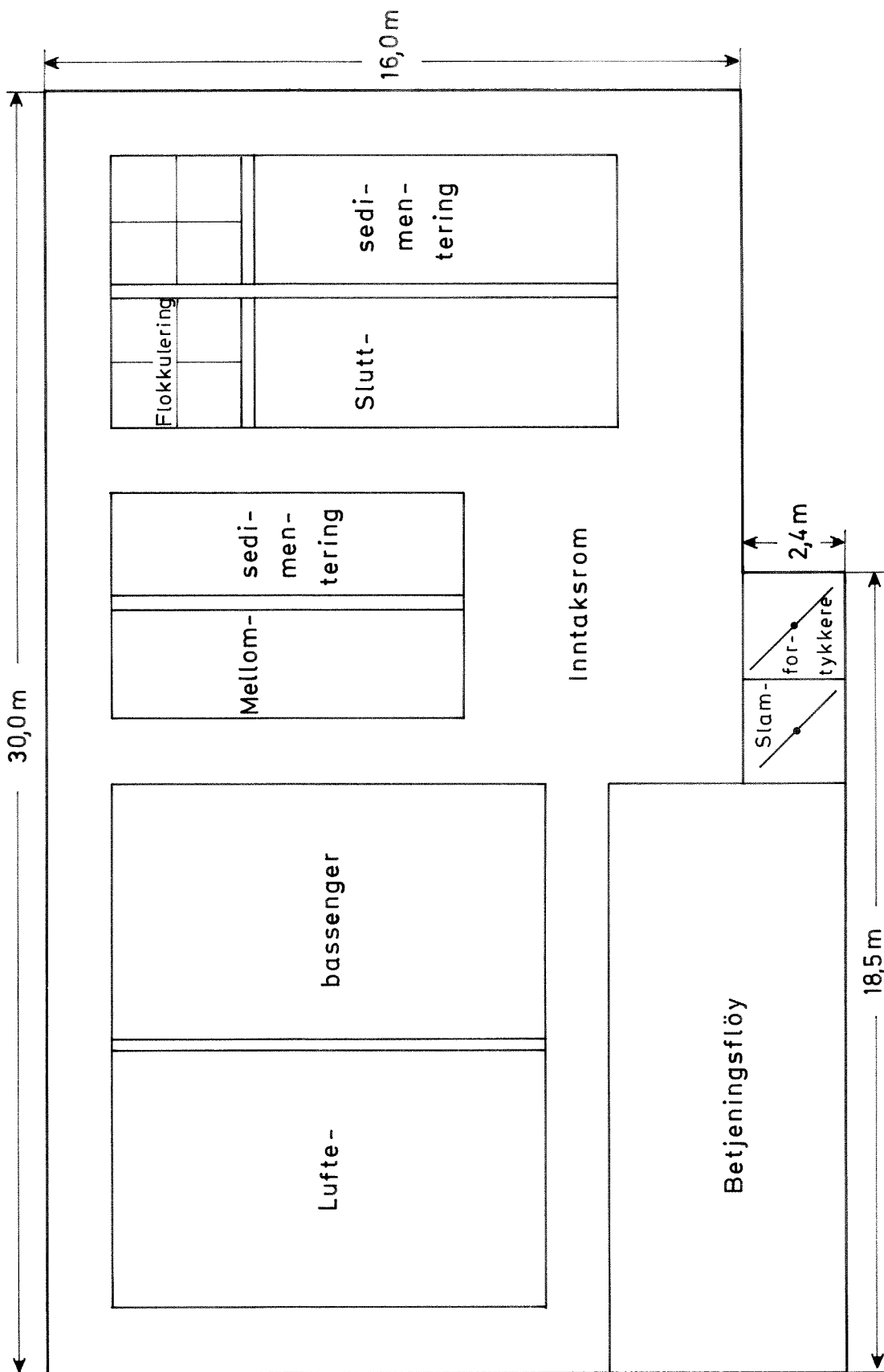
Porøsitet i pakket sjikt (Voids in packed beds)

Volumet mellom kullpartiklene i en pakket kolonne uttrykt som prosent av det totale sjiktvolumet.

- 83 -

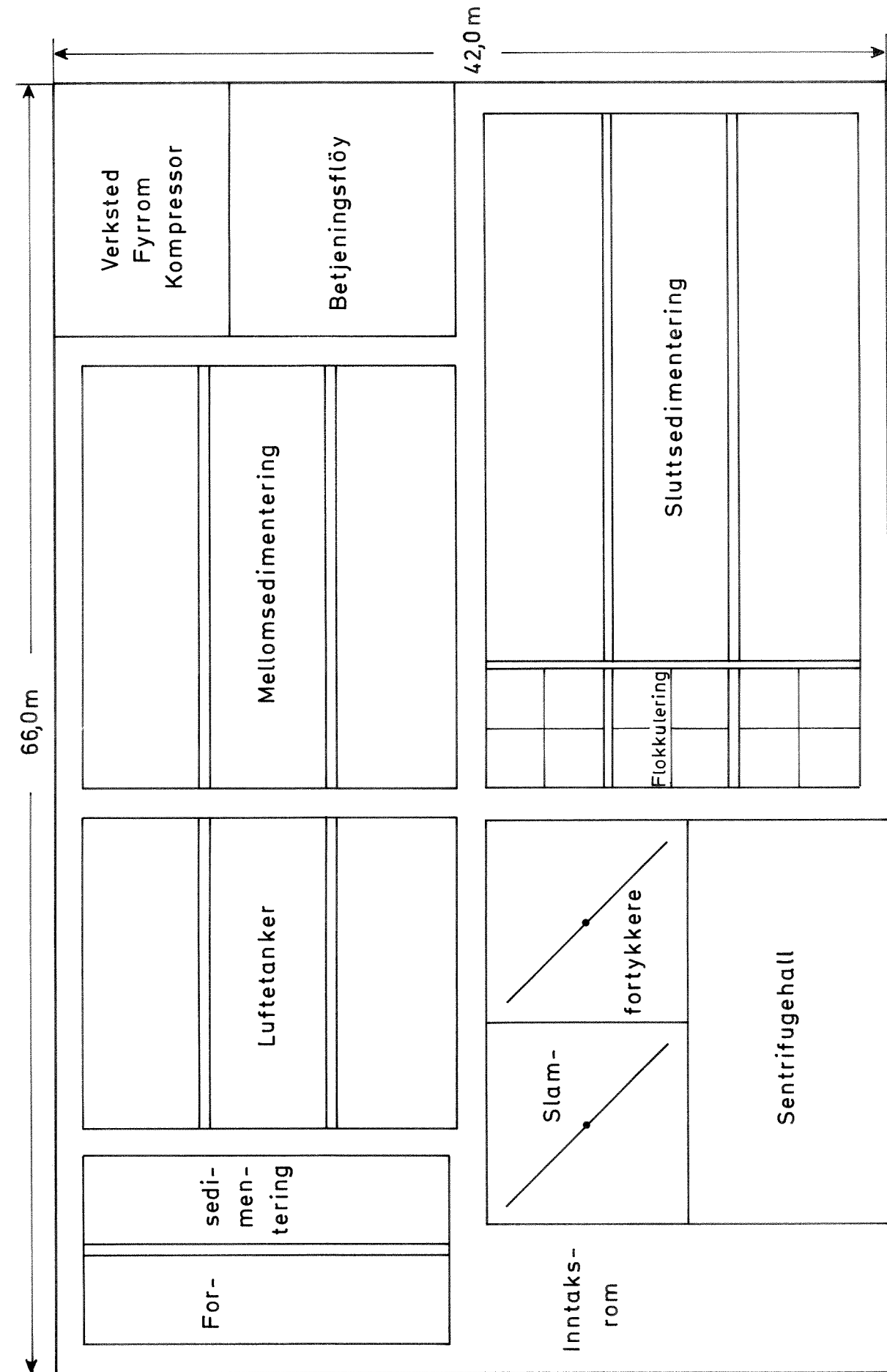
Garrett

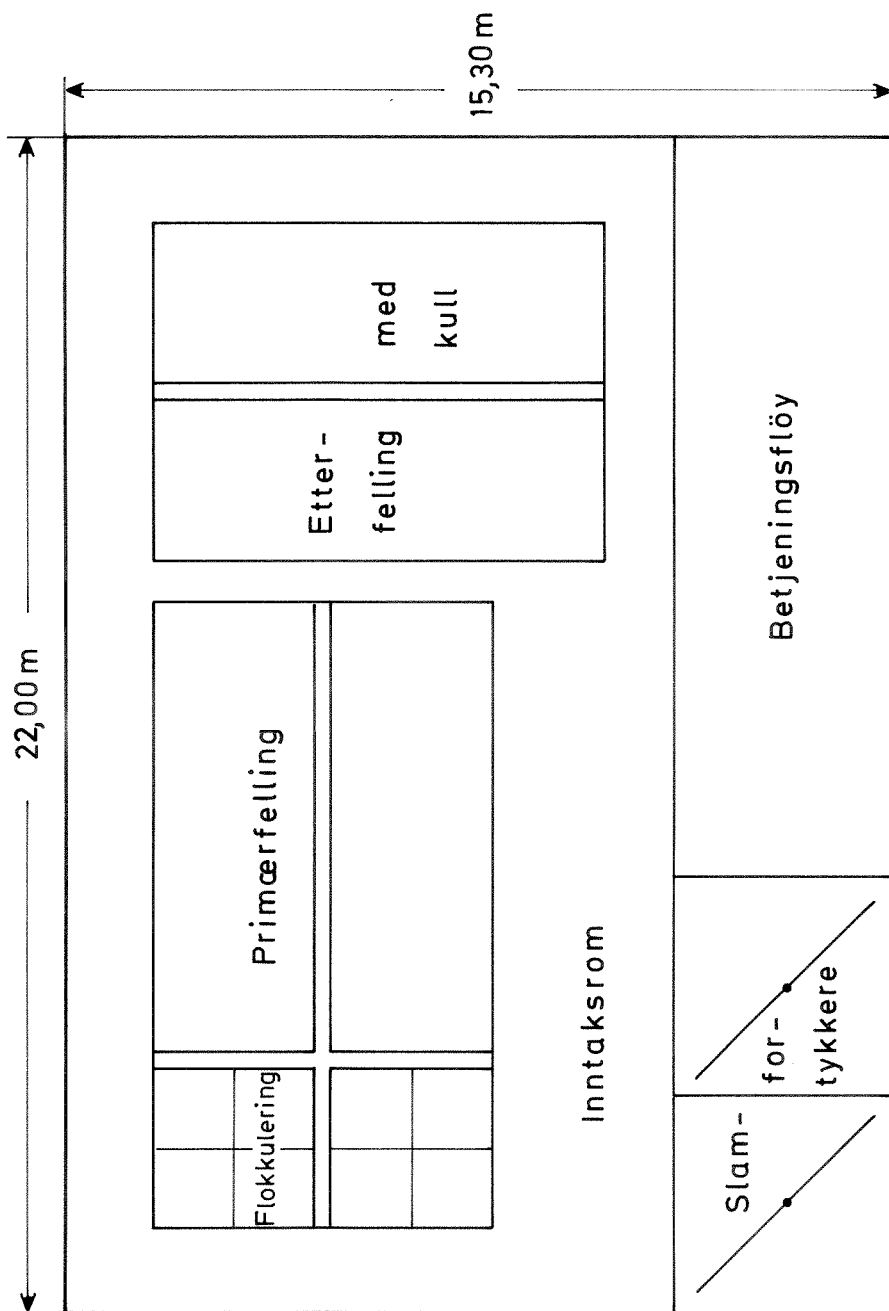
Bilag 2 Planskisse av de fire alternativer



Alt. Ia. Etterfyllingsanlegg for 2500pe.

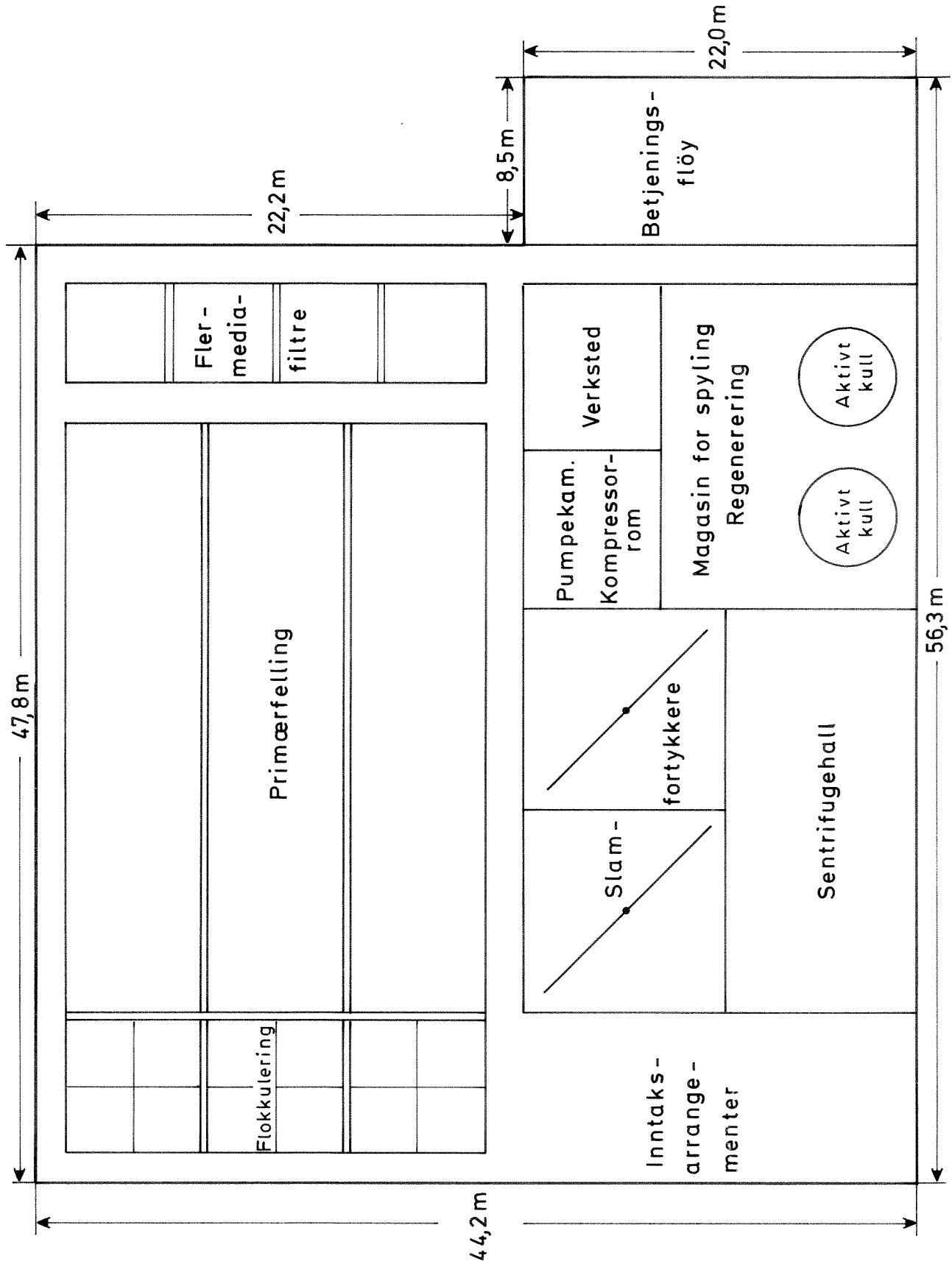
M ≈ 1:200





Alt. II a. Primærfelling/Aktivt kull for 2500pe.

M ≈ 1:200



Alt. II b.
Primærfelling/
Aktivt kull
for 25000 pe.
M ≈ 1 : 400

- 88 -

Bilag 3

Franskt

BILAG 3

MASSEBEREGNING

Alt. Ia. Etterfellingsanlegg for 2 500 pe.

Graving/Sprenging

Antar 50/50 fordeling jord/fjell.

Luftebassenger	300 m ³
Mellomsedimenteringsbassenger	140 "
Flokkuleringsbassenger	35 "
Ettersedimenteringsbassenger	175 "
Slamlommer	40 "
Fortykkere	10 "
Tillegg for vegger	500 "
Kanaler, sandfang, utgraving	
under golv + avrunding	<u>400 "</u>
Total graving/sprenging	<u>1600 m³</u>

Graving : 800 m³

Sprenging: 800 m³

Betong

Grunnmur	18 m ³
Luftebassenger	80 "
Mellomsedimenteringsbassenger	52 "
Flokkulerings- og ettersedimenteringsbassenger	70 "
Slamlommer	44 "
Fortykkere	14 "
Golv	52 "
Kanaler, sandfang	30 "
Diverse tillegg + avrunding	<u>65 "</u>
Totalt	<u>425 m³</u>

Forskaling

Grunnmur	123 m ²
Luftbassenger	363 "
Mellomsedimenteringsbassenger	258 "
Flokkulerings- og ettersedimenteringsbassenger	465 "
Fortykkere	120 "
Slamlommer	150 "
Kanaler + sandfang	200 "
Diverse tillegg + avrunding	<u>821 "</u>
Totalt	<u>2 500 m²</u>

Overbygg

Vegger	<u>340 m²</u>
Tak	<u>510 m²</u>

Alt. Ib. Etterfellingsanlegg 25 000 pe.

Sprenging/Graving

Forsedimenteringsbassenger	588 m ³
Luftbassenger	1 000 "
Mellomsedimenteringsbassenger	1 348 "
Flokkuleringsbassenger	366 "
Ettersedimenteringsbassenger	1 750 "
Slamlommer	540 "
Fortykkere	312 "
Sentrifugehall	360 "
Tillegg for vegger	1 700 "
Kanaler, sandfang, utgraving under gulv + avrunding	<u>2 036 "</u>
Total graving/sprenging	<u>10 000 m³</u>

Graving : 5 000 m³

Sprenging : 5 000 m³

Betong

Grunnmur	39 m ³
Forsedimenteringsbassenger	149 "
Luftebassenger	218 "
Mellomsedimenteringsbassenger	250 "
Flokkulerings- og ettersedimenteringsbassenger	437 "
Slamlommer	200 "
Fortykkere	128 "
Gulv	170 "
Kanaler, sandfang	150 "
Diverse tillegg, avrunding	59 "
Totalt	<u>1 800 m³</u>

Forskaling

Grunnmur	260 m ²
Forsedimenteringsbassenger	650 "
Luftebassenger	830 "
Mellomsedimenteringsbassenger	1 065 "
Flokkulerings- og ettersedimenteringsbassenger	1 655 "
Slamlommer	500 "
Kanaler, sandfang	1 180 "
Fortykkere	580 "
Diverse tillegg + avrunding	280 "
Totalt	<u>7 000 m²</u>

Overbygg

Vegger	<u>750 m²</u>
Tak	<u>2 700 m²</u>

Alt. IIa. Anlegg med primærfelling - pulverkull for 2 500 pe.

Graving/Sprenging

Flokkuleringsbassenger	35 m ³
Primærsedimenteringsbassenger	175 "
Sluttsedimenteringsbassenger	175 "
Fortykkere	50 "
Slamlommer	40 "
Tillegg for vegger	150 "
Kanaler, sandfang, utgraving under gulv + avrunding	<u>375 "</u>
Total graving/sprenging	<u>1 000 m³</u>

Graving : 500 m³

Sprenging : 500 m³

Betong

Grunnmur	15 m ³
Flokkulerings- og primærsedimenteringsbassenger	93 "
Sluttsedimenteringsbassenger	67 "
Slamlommer	35 "
Fortykkere	43 "
Kanaler, sandfang	30 "
Gulv	31 "
Diverse tillegg + avrunding	<u>36 "</u>
Totalt	<u>350 m³</u>

Forskaling

Grunnmur	100 m ²
Flokkulerings- og primærsedimenteringsbasseng	465 "
Sluttsedimenteringsbassenger	333 "
Fortykkere	124 "
Slamlommer	230 "
Kanaler, sandfang	200 "
Diverse tillegg + avrunding	<u>548 "</u>
Totalt	<u>2 000 m²</u>

Overbygg

Vegger	<u>273 m²</u>
Tak	<u>324 m²</u>

Alt. IIb. Anlegg med primærfelling - granulert kull for 25 000 pe.

Totale kostnader for sandfilteranlegget er beregnet separat og massene er således ikke medtatt her.

Graving/sprenging

Flokkulerings- og primærsedimenteringsbassenger	2 734 m ³
Fortykkere	312 "
Sentrifugehall	360 "
Kanaler, sandfang, utgraving under gulv + avrunding	<u>2 094 "</u>
Total graving/sprenging	<u>5 500 m³</u>

Graving : 2 750 m³

Sprenging: 2 750 m³

Betong

Grunnmur	38 m ³
Flokkulerings- og primærsedimenteringsbassenger	494 "
Fortykkere	128 "
Kanaler, sandfang	150 "
Slamlommer	80 "
Gulv	159 "
Diverse tillegg + avrunding	<u>51 "</u>
Totalt	<u>1 100 m³</u>

Forskaling

Grunnmur	255 m ²
Flokkulerings- og primærsedimenteringsbassenger	1 600 "
Fortykkere	480 "
Slamlommer	350 "
Kanaler, sandfang	1 020 "
Diverse tillegg + avrunding	<u>295 "</u>
Totalt	<u>4 000 m²</u>

Overbygg

Vegger	<u>1 000 m²</u>
Tak	<u>2 300 m²</u>

- 94 -

Bilag 4

Förord

Alt. Ib. Etterfellingsanlegg for 25 000 pe.

$$Q_{dim} = \left(\frac{q_s \cdot p}{T_s} + \frac{q_d \cdot p}{24} + \frac{q_i}{T_i} \right) m^3/h$$
$$= \frac{0.25}{16} \frac{25\ 000}{24} + \frac{0.10}{24} \frac{25\ 000}{24} \approx 500 m^3/h$$

Bassenger:

Forsedimentering: Overflatebelastning = $3.0 m^3/m^2 \cdot h$
Oppholdstid = 1.2 h
 $A = 500/3.0 = 167 m^2$
2 bassenger á $84 m^2$ $b \times l \times d = 4.5 \times 18.7 \times 3.5 m$

Luftebassenger: Oppholdstid: = 2.0 h
 $V = 500 \times 2.0 = 1\ 000 m^3$
3 bassenger á $333 m^3$ $b \times l \times d = 6.0 \times 15.8 \times 3.5 m$

Mellomsedimentering: Overflatebelastning = $1.3 m^3/m^2 \cdot h$
Oppholdstid = 2.7 h
 $A = 500/1.3 = 385 m^2$
3 bassenger á $128 m^2$ $b \times l \times d = 6 \times 21.5 \times 3.5 m$

Flokkuleringsbassenger: Oppholdstid = 4 x 10 min.
 $V = 500/3 \times 10/60 = 28 m^3$ pr. kammer
3 x 4 kamre á $28 m^3$ $b \times l \times d = 3.0 \times 3.0 \times 3.1 m$

Sluttsedimentering: Overflatebelastning = $10 m^3/m^2 \cdot h$
Oppholdstid = 3.5 h
 $A = 500/1.0 = 500 m^2$
3 bassenger á $167 m^2$ $b \times l \times d = 6.0 \times 28.0 \times 3.5 m$

Fortykkere:

Slamproduksjon: $125 g TS/p \cdot d \times 2\ 500 pe = 3\ 125 kg TS/d$
 $7.5 l/p \cdot d \times 2\ 500 pe = 188 m^3/d$
Overflatebelastning : $30 kg TS/m^2 \cdot d$
 $A_{min.} = 3\ 125/30 = 104 m^2$
Hver fortykker dimensjoneres for min 1 døgns
slamproduksjon.
2 fortykkere á $104 m^2$, $364 m^3$
 $b \times l \times d = 10.2 \times 10.2 \times 3.5$

Sentrifugeanlegget:

Sentrifugene dimensjoneres for å kunne avvanne 1 ukes slamproduksjon i løpet av 30 timer.

Det er regnet med et TS innhold på 1.7% i ufortykket slam og 3.0% i fortykket slam. Nødvendig sentrifugekapasitet:

$$\frac{188 \times 1.7/3.0 \cdot 7}{30} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$$

Det installeres 2 sentrifuger á 12.5 m³/h

Alt. IIa. Anlegg med primærfelling - pulverkull for 2 500 pe.

Qdim = Som for alt. Ia : 50 m³/h

Bassenger:

Flokkuleringsbassenger: Oppholdstid = 4 x 10 min.

$$V = 50/2 \times 10/60 = 4.15 \text{ m}^3 \text{ pr. kammer}$$

$$2 \times 4 \text{ kamre á } 4.15 \text{ m}^3 \quad \underline{b \times l \times d = 1.5 \times 1.5 \times 1.85 \text{ m}}$$

Primærsedimentering: Overflatebelastning = 1.0 m³/m² · h

$$\text{Oppholdstid} = 3.5 \text{ h}$$

$$A = 50/1.0 = 50 \text{ m}^2$$

$$2 \text{ bassenger á } 25 \text{ m}^2 \quad \underline{b \times l \times d = 3.0 \times 8.4 \times 3.5 \text{ m}}$$

Sluttsedimentering: Overflatebelastning = 1.0 m³/m² · h

$$\text{Oppholdstid} = 3.5 \text{ h}$$

$$A = 50/1.0 = 50 \text{ m}^2$$

$$2 \text{ bassenger á } 25 \text{ m}^2 \quad \underline{b \times l \times d = 3.0 \times 8.4 \times 3.5 \text{ m}}$$

Slamproduksjon:

$$0.200 \text{ kg TS/p} \cdot d \times 2 \text{ 500} = 500 \text{ kg TS/d}$$

$$0.010 \text{ m}^3/\text{p} \cdot d \times 2 \text{ 500} = 25 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{Overflatebelastning:} = 30 \text{ kg TS/m}^2 \text{ d}$$

$$A_{\text{min}} = 500/30 \text{ m}^2 = 16.7 \text{ m}^2$$

Hver fortykker dimensjoneres for min. 1 døgnslamproduksjon.

$$2 \text{ fortykkere á } 16.7 \text{ m}^2, 58 \text{ m}^3$$

$$\underline{b \times l \times d = 4.1 \times 4.1 \times 3.5 \text{ m}}$$

Slammengde ut fra fortykker (forutsetter 3% TS) =

$$\frac{500 \cdot 100}{3 \cdot 1 \text{ 000}} \text{ m}^3/\text{d} = 17 \text{ m}^3/\text{døgn}$$

Alt. IIb. Anlegg med primærfelling - granulert kull for 25 000 pe.

$$Q_{dim} = \left(\frac{q_s \cdot p}{T_s} + \frac{q_d \cdot p}{24} + \frac{q_i}{T_i} \right) m^3/h$$
$$= \frac{0.25 \cdot 25\ 000}{16} + \frac{0.10 \cdot 25\ 000}{24} \approx 500\ m^3/h$$

I tillegg til denne vannmengde kommer spylevannsmengden fra filterene samt vaskevann fra adsorpsjons- og regenereringsenhetene. Dette utgjør til sammen $100\ m^3/h$. Dimensjonerende vannmengde vil da være:

$$Q_{dim} = 500 + 100 = \underline{600\ m^3/h}$$

Bassenger:

Flokkuleringsbassenger: Oppholdstid = $4 \times 10\ \text{min.}$

$$V = 600/3 \times 10/60 = 33\ m^3$$

$$3 \times 4\ \text{kamre á } 33\ m^3 \quad \underline{b \times l \times d = 3.35 \times 3.35 \times 3.0}$$

Primærsedimentering: Overflatebelastning = $1.0\ m^3/m^2 \cdot h$

$$\text{Oppholdstid} = 3.5\ h$$

$$A = 600/1.0 = 600\ m^2$$

$$3\ \text{bassenger á } 200\ m^2 \quad \underline{b \times l \times d = 6.7 \times 30.0 \times 3.5\ m}$$

Fortykkere og sentrifugeanlegg: dimensjoneres som for alt. Ib.

$$2\ \text{fortykkere á } 104\ m^2, 364\ m^3$$

$$\underline{b \times l \times d = 10.2 \times 10.2 \times 3.5}$$

$$\underline{2\ \text{sentrifuger á } 12.5\ m^3/h}$$

Flermediafilter: (Dimensjoneringsparametre 5.61)

$$Q_{dim} = 600\ m^3/h$$

$$\text{Nødvendig filterareal : } 600/6\ m^2 = 100\ m^2$$

$$\text{Areal pr. filter (4 stk.)} = 25\ \text{"}$$

$$\text{Antall timer mellom hver spyling : } \frac{4 \cdot 500 \cdot 100}{600 \cdot 60} = 12.5\ h$$

Hvert filter må spyles to ganger pr. døgn.

$$\text{Vannmengde pr. spyling : } 6 \times 25\ m^3 = 150\ m^3$$

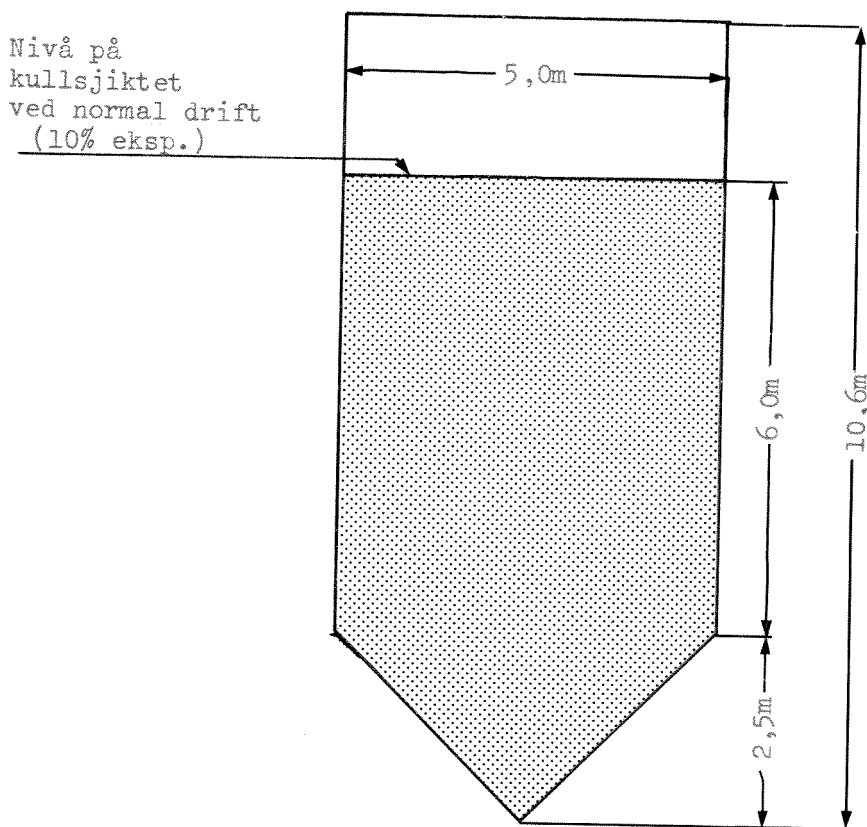
$$\text{Kapasitet på spylevannspumpe : } \frac{150\ 000}{6 \cdot 60} = 415\ l/s$$

$$\text{Nødvendig luftehøyde} = 15\ m\ VS$$

Adsorpsjonsanlegg: (Dimensjoneringsparametre s.61)

Q_{dim} = 500 m³/h
Kolonnefasong : Sylindrisk med kjegleformet bunn (45° helning)
Antall kolonner i parallell : 2
Kulltype : Granulat 12 x 40
Tverrsnitt pr. kolonne : 250/12.5 m² = 20 m²
Diameter 2 · $\sqrt{20/3.14}$ m = 5 m
Volum på kullsjikt uten ekspansjon: 250 · 0.5 m³ = 125 m³
"Effektiv høyde" på kjegleavsnitt : 2.5/3 m = 0.8 m
Høyde på sylindrisk del av sjiktet (uten ekspansjon) : $(\frac{125}{20} - 0.8)$ m = 5.45 m
Kolonnen dimensjoneres for 50% ekspansjon av kullsjiktet.
Total høyde : (2.5 + 5.45 · 1.5) m = 10.6 m
Høyde på kullsjikt under normal drift
(10% ekspansjon) : (2.5 + 5.45 · 1.1) m = 8.5 m
Kullsjiktets tetthet (tabell) = 480 kg/m³
Kullmengde i hver kolonne : 125 x 0.48 tonn = 60 tonn

En skisse av en kolonne er vist nedenfor.



Skisse av en oppstrøms adsorpsjonskolonne for grannlært kull (12 x 40). Kolonnen er dimensjonert med midlere kapasitet 500 m³/h og en strømningshastighet på 12.5 m/h.

Regenereringsanlegg:

Spesifikt ovnsareal = 0.513 m³/100 kg kull, døgn

Tilrenning pr. døgn : (0.25 + 0.1) 2 500 m³/døgn = 8 750 m³/døgn

Kullbruk : $\frac{(80 - 20) \cdot 8\,750}{0.40 \cdot 1\,000}$ kg/døgn = 1 320 kg/døgn

Regenereringsanlegget dimensjoneres med 40% overkapasitet:

Ovnsareal : 0.513 x 1 320/100 · 1.4 = 9.0 m²

- 101 -

Beilage

Zettel

BILAG 5

Kostnader for bygningsmessige arbeider

Følgende enhetspriser er lagt til grunn:

Graving	kr	12,-	/m ³
Sprenging	"	55,-	/m ³
Grus under betonggulv	"	25,-	/m ²
Drenerende grus	"	75,-	/m ³
Betong	"	250,-	/m ³
Betongpåstøp	"	65,-	/m ²
Forskaling	"	100,-	/m ²
Armering	"	2 800,-	/tonn

Stålplatekledning:

Vegger inkl. isolasjon	kr	200,-	/m ²
Tak inkl. isolasjon og tetting	"	200,-	/m ²

I enhetsprisene er inkludert alle nødvendige arbeider såsom opplasting og transport av overskuddsmasse, bearbeiding av betong i formen, utlegging av grus o.l.

Det er regnet med samme enhetspriser uansett anleggsstørrelse.

Alt. Ia. Etterfellingsanlegg for 2 500 pe.

Graving	800 m ³ á kr 12,-	kr 9 600,-	
Sprenging	800 m ³ á kr 55,-	" 44 000,-	
Grus under bet. gulv	345 m ² á kr 25,-	" 8 600,-	
Drenerende grus	73 m ³ á kr 75,-	" 5 500,-	
Tillegg for fjellrensk, komprimering, tilbakefylling o.l.		" 10 000,-	
Sum grunnarbeider		kr 77 700,-	kr 77 700,-
Betong	425 m ³ á kr 250,-	kr 106 250,-	
Betongpåstøp	230 m ² á kr 65,-	" 15 000,-	
Forskaling	2 500 m ² á kr 100,-	" 250 000,-	
Tillegg for vanskelig forskaling		" 50 000,-	
Armering	40 t á kr 2 800,-	" 112 000,-	
Takbjelker		" 30 000,-	
Tillegg for fuger, skjøter, utsparing, Leca		" 50 000,-	
Sum betongarbeider		kr 613 250,-	" 613 250,-
Utvendige vegger	340 m ² á kr 200,-	kr 68 000,-	
Tak	510 m ² á kr 200,-	" 102 000,-	
Sum stålplate kledning		kr 170 000,-	" 170 000,-
Diverse stålarbeider		kr 75 000,-	" 75 000,-
Mur og pussarbeider		" 100 000,-	" 100 000,-
Tømmer og innredningsarbeider		" 150 000,-	" 150 000,-
Sanitær- og dreneringsarbeider		" 75 000,-	" 75 000,-
Sum bygningsmessige arbeider			<u>kr 1 261 000,-</u>

Alt. Ib. Etterfellingssanlegg for 25 000 pe.

Graving	5 000 m ³ á kr 12,-	kr	60 000,-	
Sprenging	5 000 m ³ á kr 55,-	"	275 000,-	
Grus under bet. gulv	1 130 m ² á kr 25,-	"	28 000,-	
Drenerende grus	153 m ³ á kr 75,-	"	11 000,-	
Tillegg for fjellrensk, komprimering, tilbakefylling o.l.		"	50 000,-	
Sum grunnarbeider		kr	424 500,-	kr 424 500,-
Betong	1 800 m ³ á kr 250,-	kr	450 000,-	
Betongpåstøp	1 370 m ² á kr 65,-	"	89 000,-	
Forskaling	7 000 m ² á kr 100,-	"	700 000,-	
Tillegg for vanskelig forskaling		"	150 000,-	
Armering	150 tonn á kr 2 800,-	"	420 000,-	
Tillegg for fuger, skjøter, utsparing, Leca		"	150 000,-	
Takbjelker		"	100 000,-	
Sum betongarbeider		kr	2 059 000,-	" 2 059 000,-
Utvendige vegger	750 m ² á kr 200,-	kr	150 000,-	
Tak	2 750 m ² á kr 200,-	"	540 000,-	
Sum stålplatekledning		kr	690 000,-	" 690 000,-
Diverse stålarbeider		kr	200 000,-	" 200 000,-
Mur og pussarbeider		"	250 000,-	" 250 000,-
Tømmer og innredningsarbeider		"	250 000,-	" 250 000,-
Sanitær og drenering		"	150 000,-	" 150 000,-
Sum bygningsmessige arbeider				<u>kr 4 024 000,-</u>

Alt. IIa. Anlegg med primærfelling - pulverkull for 2 500 pe.

Graving	500 m ³ á kr	12,-	kr	6 000,-	
Sprenging	500 m ³ á kr	55,-	"	27 500,-	
Grus under bet. gulv	200 m ² á kr	25,-	"	5 000,-	
Drenerende grus	60 m ³ á kr	75	"	4 500,-	
Tillegg for fjellrensk, komprimering, tilbakefylling o.l.			"	<u>10 000,-</u>	
Sum grunnarbeider			"	53 000,-	kr 53 000,-
Betong	350 m ³ á kr	250,-	"	87 500,-	
Betongpåstøp	100 m ² á kr	65,-	"	6 500,-	
Forskaling	2 000 m ² á kr	100,-	"	200 000,-	
Tillegg for vanskelig forskaling			"	50 000,-	
Armering	30 t á kr	2 800,-	"	84 000,-	
Tillegg for fuger, skjøter, utsparing, Leca			"	50 000,-	
Takbjelker			"	<u>20 000,-</u>	
Sum betongarbeider			kr	498 000,-	" 498 000,-
Utvendige vegger	273 m ² á kr	200,-	kr	54 600,-	
Tak	324 m ² á kr	200,-	"	<u>65 800,-</u>	
Sum stålplatekledning			kr	119 400,-	" 119 400,-
Diverse stålarbeider			kr	75 000,-	" 75 000,-
Mur og pussarbeider			"	100 000,-	" 100 000,-
Tømmer og innredningsarbeider			"	150 000,-	" 150 000,-
Sanitær og drenering			"	75 000,-	" <u>75 000,-</u>
Sum bygningsmessige arbeider					<u>kr 1 070 400,-</u>

Alt. IIb. Anlegg med primærfelling - granulert kull for 25 000 pe.

Graving	2 750 m ³ á kr	12,-	kr	33 000,-	
Sprenging	2 750 m ³ á kr	55,-	"	151 000,-	
Grus under bet. gulv	1 060 m ² á kr	25,-	"	26 500,-	
Drenerende grus	150 m ³ á kr	75,-	"	10 500,-	
Tillegg for fjellrensk, komprimering, tilbakefylling o.l.			"	<u>30 000,-</u>	
Sum grunnarbeider			kr	251 000,-	kr 251 000,-
Betong	1 100 m ³ á kr	250,-	kr	275 000,-	
Betongpåstøp	850 m ² á kr	65,-	"	55 000,-	
Forskaling	4 000 m ² á kr	100,-	"	400 000,-	
Tillegg for vanskelig forskaling			"	50 000,-	
Armering	90 t á kr	2 800,-	"	252 000,-	
Tillegg for fuger, skjøter, utsparing, Leca			"	50 000,-	
Takbjelker			"	<u>100 000,-</u>	
Sum betongarbeider			kr	1 182 000,-	" 1 182 000,-
Utvendige vegger	1 000 m ² á kr	200,-	kr	200 000,-	
Tak	2 300 m ² á kr	200,-	"	<u>460 000,-</u>	
Sum stålplatekledning			kr	660 000,-	" 660 000,-
Diverse stålarbeider			kr	100 000,-	" 100 000,-
Mur og pussarbeider			"	200 000,-	" 200 000,-
Tømmer og innredningsarbeider			"	250 000,-	" 250 000,-
Sanitær og drenering			"	100 000,-	" 100 000,-
Sum bygningsmessige arbeider ekskl. filteranlegg					<u>kr 2 743 000,-</u>

Flermediafilter

Etter oppgave fra Samfunnsteknikk VBB A/S utgjør de bygningsmessige arbeider 75% av total anleggssum. De resterende 25% utgjøres av elektrisk og maskinelt utstyr.

Bygningsmessige kostnader for flermediafilter: kr 1 125 000,-

Adsorpsjons- og regenereringsanlegg

Disse anleggene blir i sin helhet regnet som maskinelle installasjoner.

- 108 -

Bitaq 6

Fareqet

BILAG 6

Oversikt over maskinelt utstyr

I investeringskostnadene for det maskinelle utstyr er følgende komponenter innkalkulert:

Vannmengde måler inkl. plastfiberarmert venturikanal, diagramskriver, telleverk og fjernoverføring.

Maskinrenset rist.

Transportbånd for ristgoods.

Mammutpumpe for sand.

Sandsilo.

Kjedeskraiper for samtlige bassenger.

Paddelverk i flokkuleringskamrene.

Fortykkermekanisme.

Kompressoragregater komplett.

Monopumper.

Hydrauliske ventiler.

Rørpropplegg i rustfritt stål komplett.

Sluseventiler.

Luker med føringer.

Inn- og utløpsarrangementer for samtlige bassenger.

Diffusoranlegg for sandfang og luftbassenger.

Kjemikaliesiloer.

Doseringsutstyr med rørpropplegg.

For de største anleggene er dessuten sentrifugeanlegg med pumper, doseringsutstyr og rørpropplegg innkalkulert.

---oOo---