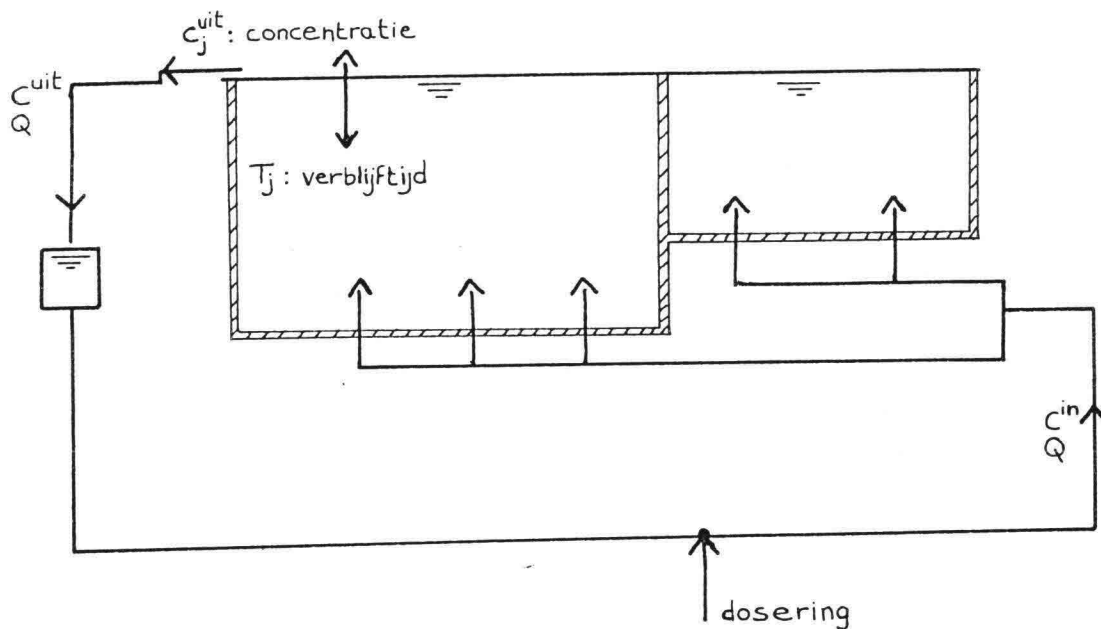


EXPERIMENTEEL ONDERZOEK NAAR VERBLIJFTIJDEN IN EEN ZWEMBAD

Mei 1988

A. Ayar



EXPERIMENTEEL ONDERZOEK NAAR
VERBLIJFTIJDEN IN EEN ZWEMBAD

A. Ayar

Deelontwerp, rapportnummer Vlm\1988\D\2

Afstudeerdocent : prof.dr.ir. J.P.Th Kalkwijk
Begeleiders : dr.ir. C. Kranenburg
dr.ir. Th.J. Nieuwstad

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele techniek
Vakgroep Waterbouwkunde en
Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersi

Mei 1988

Naast aan de begeleiders ook speciale dank aan bedrijfsleider en technisch personeel van het zwembad voor hun medewerking, en aan diegenen die met de uitvoering van het experiment geholpen hebben.

SAMENVATTING

Naar aanleiding van conclusies en aanbevelingen uit voorgaande rapporten over zwembadontwerp en zwemwaterbehandeling, is besloten om de doorstroming in zwembaden nader te bestuderen.

In zwembaden is het water continu 24 uur per etmaal in omloop om behandeld te worden in een zuiveringsinstallatie. Het grootste deel van de omlooptijd wordt ingenomen door de stroming door het bassin. Deze stroming die afhangt van het hydraulisch ontwerp, is van groot belang voor het effect van de zuivering. Gestreefd wordt naar een zodanige stroming dat er niet te lange verblijftijden voorkomen i.v.m. de hygiëne en dat er een homogene toestand heerst met betrekking tot de gedoseerde chemicaliën, i.v.m. sturing van het zuiveringsproces.

Besloten is om in een zwembad met verticale doorstroming de verblijftijden te meten m.b.v. een tracer, en daarbij te letten op de ruimtelijke verdeling van de verblijftijden. Een aantal aspecten maken traceronderzoek bij een zwembad ingewikkelder dan de meeste andere toepassingen:

- 1 De circulatie; afgevoerde tracer voegt zich weer bij de invoer van tracer.
- 2 Een groot volume en lange omlooptijden (3 à 5 uur), zodat veel tracer nodig is en lang gemeten moet worden.
- 3 De behoefte aan een groot aantal meetplaatsen om ruimtelijke verschillen te kunnen waarnemen.
- 4 Het vertalen van de tracermetingen naar de afzonderlijke verblijftijden op de verschillende, onderling verbonden, plaatsen in een bassin.

Punt 2 en 3 zijn problemen van praktische aard, die vooral op de uitvoering betrekking hebben. Door deze punten moesten er een groot aantal metingen verricht worden. In totaal zijn er 279 monsters genomen, waarvan achteraf de tracerconcentratie zeer nauwkeurig bepaald is m.b.v. de emissietechniek. Als tracer is gebruikt Lithiumchloride, die in opgeloste toestand met een constante flux is gedoseerd gedurende 131 minuten.

De punten 1 en 4 zijn theoretisch van aard en zijn door middel van modellering opgelost. Er is een model gebruikt, dat het concentratieverloop in de deelgebieden van het bassin bij een dergelijke dosering beschrijft als uitvoer van een systeem, waarvan de parameters informatie bevatten over de verblijftijden. Hiermee geeft het model een relatie tussen de te meten concentratietoestand en de verblijftijden.

In het model worden op grond van een beschouwing over de stroming aannames gedaan over de stroming die door de metingen bevestigd worden. De juiste systeemp parameters in het model worden dan door aanpassing aan de meetresultaten verkregen.

De gemeten concentratietoestand toont een tamelijk inhomogene verdeling in het bassin, wat ongunstig is voor het zuiveringsproces. Ook de berekende gemiddelde verblijftijden variëren met de plaats (vnl. diepte), op sommige plaatsen komen gemiddelde verblijftijden voor die hoger zijn dan de wettelijke maxima.

Voortzetting van dit werk door vergelijking van deze resultaten met die van soortgelijk onderzoek in andere typen zwembaden of met resultaten van numerieke simulatie of schaalmodellen is aanbevelenswaardig.

SYMBOLENLIJST

a	Helling van gemeten concentratiecurve in de afvoerleiding	$\text{g/m}^3 \text{ min}$
α	Verhouding kortsluitstroom tot totale stroom in een element	
b	Halve breedte van een straal	m
c	Concentratie	g/m^3
c_0	Initiële concentratie in leiding vlak na het doseerpunt	g/m^3
c_s	Concentratie in afvoer van een meetplaats	g/m^3
c_t	Concentratie van traceroplossing in de voorraadtank	g/m^3
c_{∞}	Eindconcentratie (V/G)	g/m^3
$E(t)$	Exit-age functie, kansdichtheid van de verblijftijden	1/min
E_j	Exit-age en impulsresponsiefunctie van een element j	1/min
E_{jn}	Impulsresponsiefunctie van element j t.o.v. een invoer n	1/min
$F(t)$	Fractioncurve, cumulatieve frequentieverdeling	-
ϕ	Grootte van de doseringsflux	g/uur
G	Totale hoeveelheid te gebruiken tracer	g
$h(t)$	Impulsresponsiefunctie algemeen	
M	Molekuulgewicht	g/mol
q_t	Debiet van doseringspomp	m^3/uur
Q	Rondpompdebiet	m^3/uur
Q_j	Grootte van de deelstroom door element j	m^3/uur
s.g.	soortelijk gewicht	g/ml
t	Tijd	min.
	Lopende tijd	min.
T	Theoretische verblijftijd	min.
T_0	Verblijftijd buiten het bassin	min.
T_e	Eindtijdstip van dosering	min.

T_m	Theoretische verblijftijd in menggedeelte van een element	min.
T_p	Theoretische verblijftijd in gedeelte van een element met propstrooming	min.
T_t	Tijdsduur van dosering	min.
u_0	Uittreesnelheid vanuit de inlaten	m/s
u_m	Stroomsnelheid in midden van de straal	m/s
V	Totale volume van het zwemwater	m^3
V_t	Volume traceroplossing in de voorraadtank	m^3

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING

SYMBOLENLIJST

1	INLEIDING	1
1.1	Circulatie en zuiveringsproces	3
1.2	Stroming in zwembaden	9
2.0	THEORIE, MODELLERING	13
2.1	Methoden van onderzoek	13
2.2	Signaaltheorie	15
2.3	Verblijftijdsmeting met een tracer	17
2.4	Beschrijving van het model	20
2.4.1	Toelichting systeemaanpak	21
3	UITVOERING VAN HET EXPERIMENT	23
3.1	Keuze van het zwembad	23
3.2	Beschrijving van het zwembad	26
3.3	Meetmethode	28
3.3.1	Tracerkeuze	28
3.3.2	Dosering van de tracer	28
3.3.3	Plaatsen en tijden van meting a priori schattingen	30
3.3.4	Gevolgte werkwijze	34
3.4	Overzicht meetprogramma	35
3.5	Debietmeting	36
3.6	Meetresultaten en interpretatie	38
4	BEREKENINGEN MET HET MODEL	40
4.1	Bepaling van impulsresponsie direct uit de metingen.	40
4.2	Berekeningen concentratieverloop uit het model.	45

4.2.1	Uitgangspunten	45
4.2.2	Afleiding formules	47
4.2.3	Bepaling parameters voor de berekening	51
4.3	Resultaten van de berekening	53
4.3.1	Berekening met alternatieve impulsresponsie voor meetpunt A	54
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	55
5.1	Conclusies	55
5.2	Aanbevelingen	60
BIJLAGEN :		
1a	Verwachting voor tijd waarin tracer de rand bereikt.	B1
1b	Afleiding concentratieverloop bij een stapdosering in een volledig gemengd bekken met vertraging.	B2
2	Meettijden en meetresultaten	B3
3	Grafieken van de gemeten en berekende concentratieverlopen	B9
4	Afleiding formule voor $E_j(t)$ - bepaling uit de metingen	B33
5	Uitwerking integraal uit § 4.2.2	B34
6	Bepaling formule voor T_{mj} uit de meetgegevens, via afgeleide van $c_j(t)$.	B35

1. INLEIDING

Onderwerp.

In vrijwel alle huidige zwembaden wordt het water constant getransporteerd vanuit het zwembad naar een zuiveringsinstallatie en weer terug naar het bekken. Tengevolge van die circulatie wordt het zwembekken continu doorstroomd. De wijze waarop dat gebeurt is bepalend voor de leeftijden van het water in het zwembekken en deze zijn van belang voor het zuiveringsproces (zie § 1.1). Verschijnselen als neer- en kortsluitstroming zijn voorbeelden van een ongunstige stroming; de hierdoor veroorzaakte ongelijkmatige verdeling van de verblijftijden over het zwembad bemoeilijkt het sturen van de kwaliteit en gedeeltes van het zwembadwater worden onvoldoende verversd door een te lange verblijftijd.

Aanleiding.

Het initiatief tot het onderzoeken van de doorstroming in circulatiebaden volgde op de bevindingen van een oriënterend onderzoek, uitgevoerd in 1987, naar de praktijk van zwembadontwerp en bedrijfsvoering (literatuurlijst no.1). Dit onderzoek, uitgevoerd door de vakgroep gezondheidstechniek en waterbeheersing van de T.U. Delft naar aanleiding van negatieve persberichten over het water in zwembaden, signaleerde o.a. :

- Een toenemende belang van de rol van de circulatie in het zwembad, vanwege meer automatische kwaliteitsbeheersing (in § 1.1 zal dit toegelicht worden).
- Een achterstand in onderzoek en kennis over de circulatie t.o.v. de andere aspecten van het zuiveringsproces in zwembaden.

Aan het slot van dat rapport werd aanbevolen, theoretisch en experimenteel stromingen en verblijftijden in zwembaden te onderzoeken.

Hiernaast is ook in het rapport Waterbehandeling circulatiebaden van de gelijknamige commissie aanbevolen tot onderzoek naar de doorstroming in circulatiebaden en de vergelijking van de diverse doorstroomtypes (no. 2). Tot nu toe was daar echter niet op ingegaan.

Doelstelling

Na inventariseren van de mogelijkheden voor onderzoek is gekozen voor experimenteel bepalen van de verblijftijden op praktijkschaal, dus in een bestaand zwembad, met behulp van een tracer. Uitleg

over de methoden van onderzoek en basistheorie over relaties tussen tracerconcentratie en verblijftijden is te vinden in hoofdstuk 2. Eveneens in hoofdstuk 2 staat een modellering van het zwembad, waar een traceronderzoek uitgevoerd is, ten behoeve van de analyse. In 4.2 wordt het model verder uitgewerkt en gebruikt om de relatie tussen concentratietoestand en verblijftijden te beschrijven.

De doelstellingen van het experimentele onderzoek kunnen als volgt worden samengevat :

1 Van een zwembekken in de praktijk, gezien als een systeem voor doorstroming van water, de kenmerkende parameters nl. de verblijftijdsspreiding en de gemiddelde verblijftijd te bepalen. Dit komt neer op dosering van een tracer in de toevoer, meting van de concentratie in de afvoer, en afleiding van de systeemparameters uit de meetresultaten.

2 De ruimtelijke verspreiding van de tracer in het zwembad te onderzoeken. Van belang voor het meten en regelen van bijv. desinfectiemiddelen en zuurregelaars is de gelijkmatigheid van de verspreiding van deze middelen. Dit komt neer op het bepalen van de tracergehaltes op verschillende plaatsen in het zwembad. Hiermee is tevens getracht de ruimtelijke verdeling van de verblijftijden te bepalen.

3 Beoordeling van de verkregen uitkomsten voor verblijftijden aan de hand van normen en uitgangspunten, zoals de wettelijke voorschriften die in de praktijk gebruikt worden.

4 De aard en grootte van de lokale afwijkingen ter plaatse van injectiepunten of wanden nagaan, door metingen van tracerconcentraties in en in de nabijheid van injectiestralen en wanden.

5 Een conceptueel model te vinden die de gemeten concentratieverlopen en de ruimtelijke verschillen beschrijft. Trachten de waarnemingen in verband te brengen met plaatsafhankelijke factoren en hieruit conclusies te trekken. Met name die factoren die door het hydraulisch ontwerp beïnvloed worden, zoals diepte, debiet, aanwezigheid van injectiepunten etc. zijn van belang.

Trachten uit deze conclusies evt. tekortkomingen in de kwaliteitsbeheersing te verklaren.

1.1 Circulatie en zuiveringsproces in zwembaden.

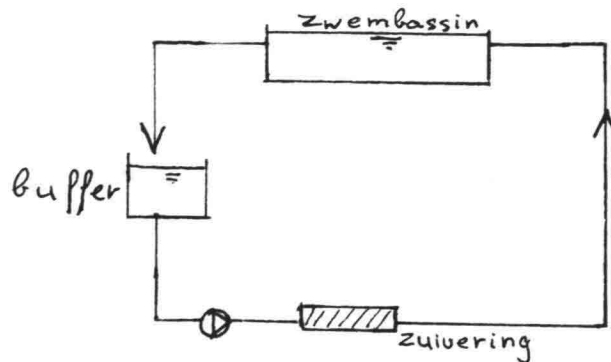


Fig. 1 Circulatie van het zwemwater.

Het doel van de circulatie is om het in het zwembad verontreinigde water te zuiveren, zodat het voldoet aan de kwaliteitseisen, zonder voortdurend vers water toe te voegen, wat te duur zou zijn.

In het eenvoudigste geval bestaat de zuivering in een zwembad uit een filter en desinfectie met chloor. In de meest geavanceerde baden wordt vlokmiddel toegevoegd om kleine deeltjes te kunnen filtreren en wordt ozon en ultravioletstraling gebruikt om verontreinigingen af te breken.

De eisen voor de waterkwaliteit liggen in de meeste Europese landen vast bij de wet. Voor Nederland geldt hiervoor de Wet Hygiëne en Veiligheid van Zweminrichtingen (WHVZ). De kwaliteitseisen hebben betrekking op het aantal potentieel schadelijke bacteriën per ml. water, de troebelheid, verontreiniging door organische stoffen, zuurgraad en verder het gehalte aan vrij beschikbaar chloor, van belang voor het desinfectie- en oxydatievermogen, en het gehalte aan gebonden chloor, dat meestal bestaat uit ongewenste chloorproducten die irritaties aan slijmvliezen veroorzaken.

De zwemwaterkwaliteit verandert voortdurend door de inbreng van verontreinigingen door zwemmers. Tegenwoordig tracht men door automatisering de zuivering zo snel mogelijk te laten reageren op de veranderende situatie in het zwembad. Zo zal het vrij chloor gehalte verminderen t.g.v. belasting van het water, wat gecompenseerd moet worden door dosering. Een groot deel van de zuivering tot de oorspronkelijke toestand gebeurt na sluiting van het zwembad, belangrijk in gevallen waarin de belasting te groot is voor directe zuivering; de circulatie gaat vrijwel altijd continu door.

In dit zuiveringsproces speelt het transport een centrale rol. Een gedeelte hiervan is buiten het bassin door leidingen, filters en vaak een bufferkelder. De omvang van het volume wat zich buiten het bassin bevindt is echter ca. 10 x zo klein als de inhoud van het zwembassin. Het grootste deel van een omlooperperiode in de circulatie (enkele uren) brengt het water daarom door in het zwembassin. Het zuiveringseffect is dus vooral afhankelijk van de doorstroming in het zwembekken. De doorstroming zorgt er nl. voor dat het water na een bepaalde verblijftijd in het bassin vervangen wordt door gezuiverd water met de gewenste desinfectiegraad, pH, helderheid (voor de helderheid is ook het transport van

deeltjes groter dan die op moleculair niveau van belang). In de wet (WHVZ) worden daarom eisen gesteld aan de doorstroming van het bekken in de vorm van een theoretische verblijftijd, zijnde de volume V van het bassin gedeeld door de grootte van het rondpompdebiet Q . Tevens mag het rondpompdebiet niet kleiner zijn dan $2,0 \text{ m}^3/\text{uur}$ per bezoeker. De maximale verblijftijden zijn onderverdeeld naar de diepte van het bassin, waarbij ondiepere plaatsen sneller doorstroomd moeten worden vanwege het grotere aantal zwimmers per m^3 (zie fig. 2).

Bepaling van de minimaal noodzakelijke pompcapaciteit

De minimaal noodzakelijke pompcapaciteit dient te worden vastgesteld met gebruikmaking van de formule $Q = \frac{I}{T}$ met dien verstande dat de hoeveelheid verpompt water gemiddeld over de openingsuren van een dag niet minder mag bedragen dan $2,0 \text{ m}^3/\text{zwemmer}$. Hierin is:

Q = pompcapaciteit in m^3/uur

I = de hoeveelheid water waarvoor het bassin is bestemd in m^3 .

T = maximaal aan te houden gemiddelde verblijftijd van het water in het bassin in uren.

Voor bassins of gedeelten van bassins geldt:

$T < 1$ uur bij een waterdiepte $< 0,3 \text{ m}$

$T < 2$ uur bij een waterdiepte $0,3-1,1 \text{ m}$

$T < 3$ uur bij een waterdiepte $1,1-1,4 \text{ m}$

$T < 4$ uur bij een waterdiepte $1,4-2,0 \text{ m}$

$T < 6$ uur bij een waterdiepte $> 2,0 \text{ m}$

Bij gebruik van ozon als oxydatiemiddel mag zowel de genoemde hoeveelheid van $2,0 \text{ m}^3/\text{zwemmer}$ als de met de formule berekende pompcapaciteit door 1,2 worden gedeeld.

Fig. 2 maximale recirculatietijden (no. 3)

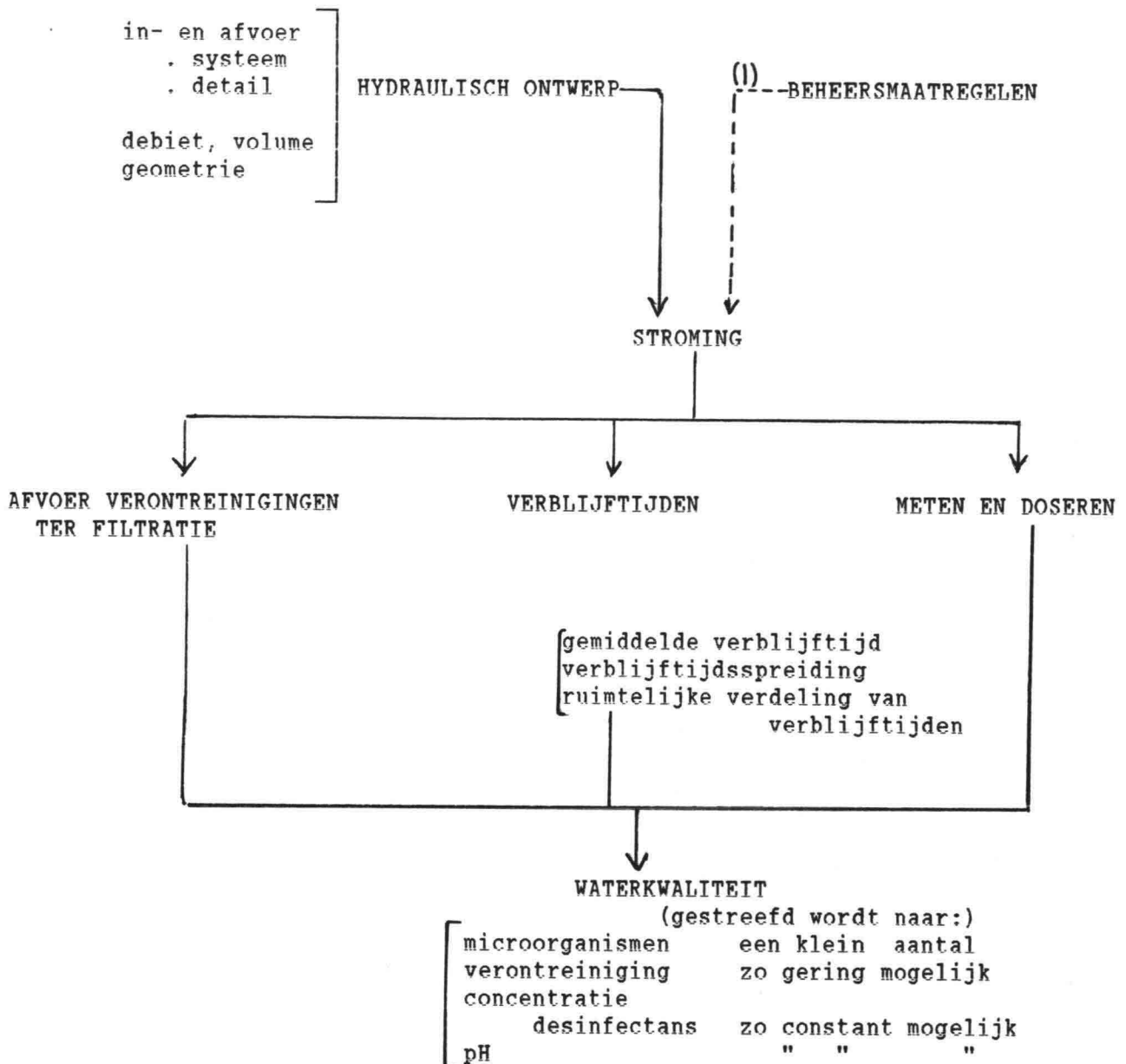
In werkelijkheid kan er echter geen sprake zijn van één verblijftijd maar van een gemiddelde, aangezien de waterdeeltjes onderling verschillende stroombanen afleggen. De grootte van de verschillen wordt gegeven door de verblijftijdsspreiding (§ 2.3).

De ideale situatie waarnaar gestreefd wordt is die waarbij de vereiste waterkwaliteit altijd en overal in het bad aanwezig is, dus een zo constant en homogeen mogelijke kwaliteit. Homogeniteit ontstaat wanneer de doorstroming overal in het bassin gelijkmatig is, dus wanneer ruimtelijk de verblijftijden gelijk verdeeld zijn. Constante kwaliteit wordt bereikt door een goede meting en een snelle sturing van de kwaliteitsverandering, wat ook afhankelijk is van de doorstroming in het bekken. Hieruit blijkt de centrale rol die het transport in het bekken inneemt voor het handhaven van een vereiste waterkwaliteit en voor het optimaliseren van het zuiveringsproces.

Beoordeling van het transport kan plaatsvinden aan de hand van informatie over de stroming zelf of over de verblijftijden; inhomogeniteit blijkt bijvoorbeeld uit de ruimtelijke verdeling van de verblijftijden en kan ook uit de verblijftijdsspreiding afgeleid worden. Bij éénduidige stroming bestaan er zelfs relaties tussen verblijftijdsspreiding en het stroombeeld.

De waterbeweging in het bassin is afhankelijk van bedrijfsvoering en vooral van het hydraulisch ontwerp. Voor optimalisering van het transport is daarom kennis nodig over de relaties tussen

ontwerp en stroming of die tussen ontwerp en verblijftijden. In figuur 3 is een overzicht gegeven van de rol die de stroming in het zuiveringsproces speelt en de factoren die daarop van invloed zijn.



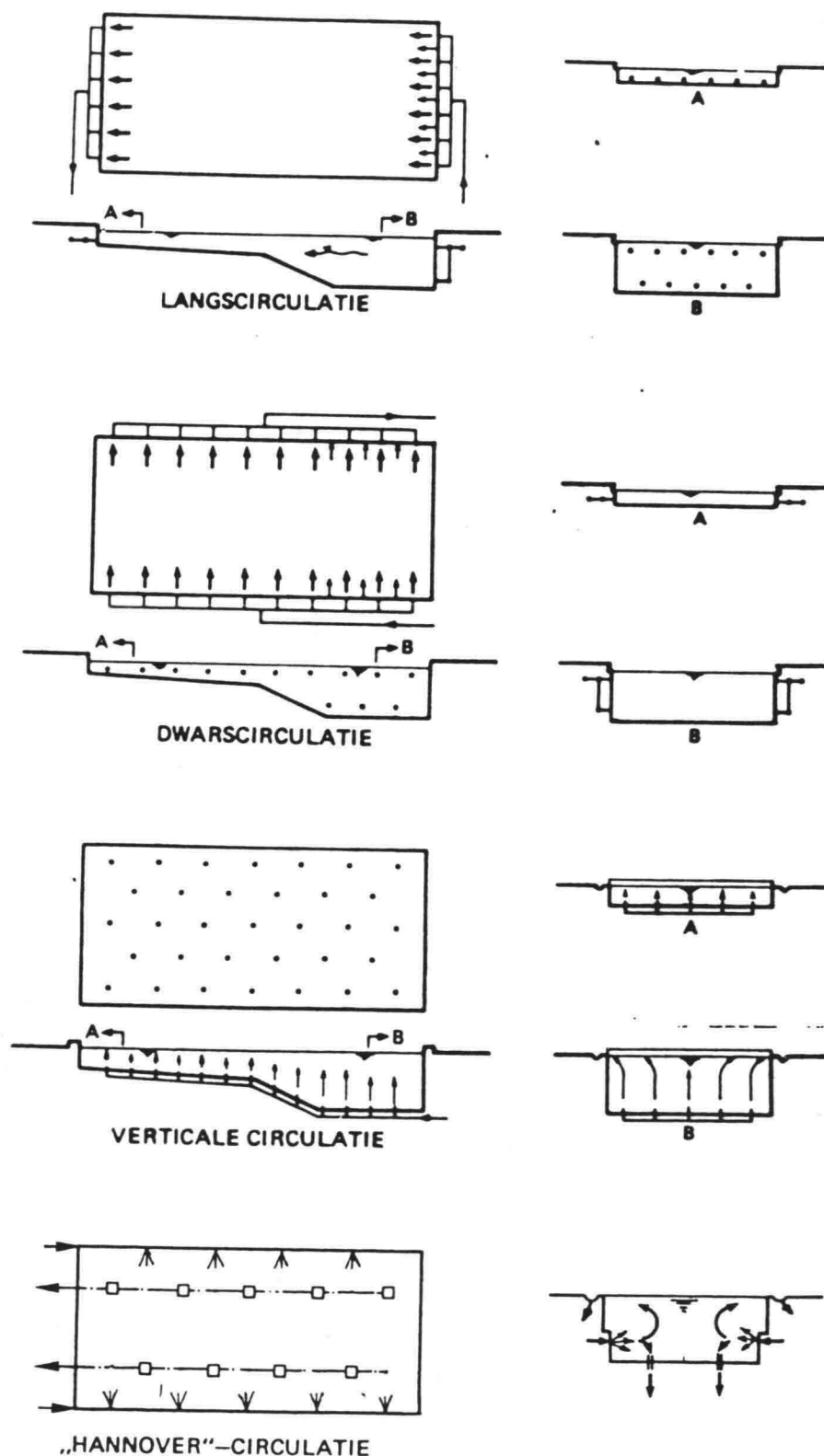
(1) bijv. beïnvloeding van de weerstand door frequentie van filterspoelen of regelen van afsluiters in leidingen.

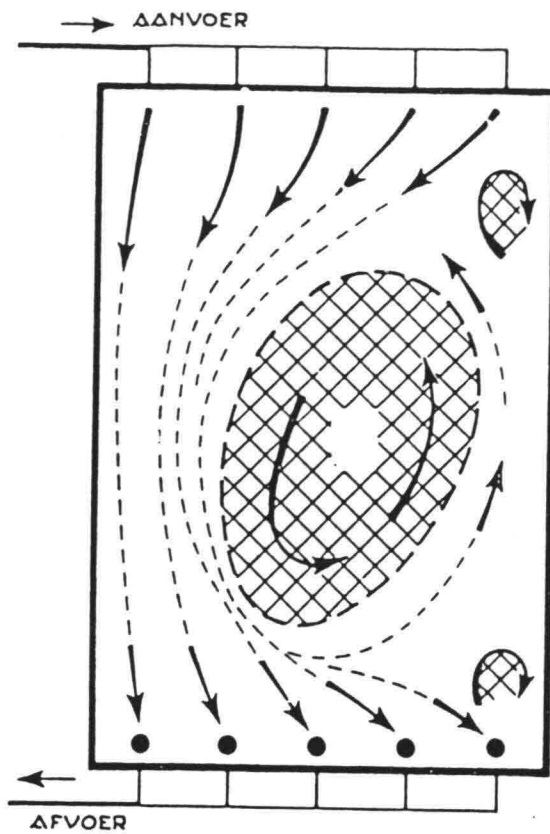
Fig. 3 Invloedsrelaties omtrent zuivering en circulatie

Ten aanzien van het hydraulisch ontwerp valt in de eerste plaats onderscheid te maken tussen de doorstroomsystemen. Deze zijn in de praktijk hoofdzakelijk of horizontaal of verticaal, bij

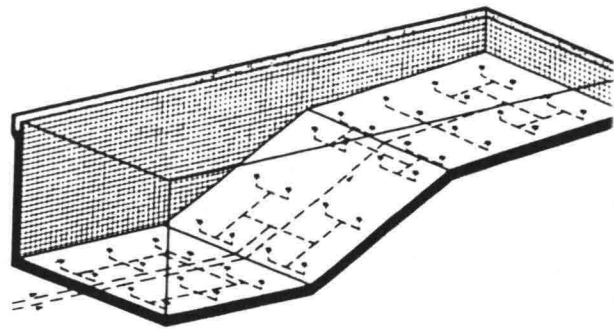
horizontale stroming kan nog onderscheid gemaakt worden tussen langs- en dwarsstroming (zie fig. 4). Ook wat betreft de details oor de plaatsen van in- en afvoer zijn er verschillende alternatieven mogelijk met ieder een eigen effect. Bij de instroming bijvoorbeeld heeft de vertakking van de toevoerleiding invloed op de stroming in het bekken; een kamvormige of harkvormige aanvoer is ongunstiger dan een geweevormige (zie fig. 5). Vermindering van de diameter heeft bijv. tot gevolg dat de debieten uit de openingen nog meer gaan verschillen dus dat het effect die in fig. 5 is getekend versterkt wordt (no.4). Verder is het soort inlaatopening van invloed op richting en grootte van de instroming.

Fig. 4 Circulatietypes (no. 5)

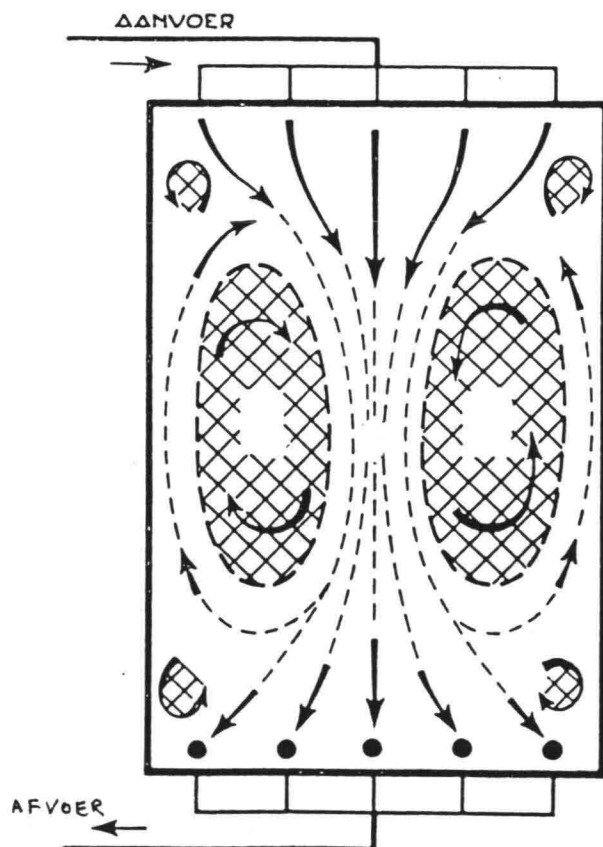




A. KAMVORMIGE AAN-EN AFVOER



GEWELVORMIGE AANVOER



B. HARKVORMIGE AAN-EN AFVOER

fig. 5 Aan- en afvoerprincipes.
De ongelijkmatige aan- en afvoer leidt soms tot de vorming van neren.

De afvoer vindt bij verticale doorstromingsplaats via overstortgoten langs de rand, en via openingen in de wand bij horizontale stroming. Het voordeel van afvoer via de goten is een betere verwijdering van de sterker verontreinigde oppervlaktelaag. De invloed van het ontwerp is vooral belangrijk voor de zuivering die na sluiting plaatsvindt (het grootste deel van een etmaal is er circulatie zonder zwemmers), omdat er dan geen verstoring is door zwemmers. De stroming bij een horizontaal systeem is dan bij benadering een verdringingsstroming terwijl verwacht wordt dat bij verticale stroming een aanzienlijke menging zal plaatsvinden. In werkelijkheid zal de stroming zich altijd ergens tussen deze twee geïdealiseerde toestanden bevinden: volledige menging of ideale verdringing. Een belangrijk verschil is dat bij volledige verdringing na de theoretische verblijftijd de gehele inhoud ververscht is terwijl bij een gemengd bad hiervoor meer dan drie keer zoveel tijd benodigd is (zie fig. 6). Het grote voordeel van volledige menging is echter de homogeniteit (fig. 7). Hierdoor is de kwaliteit beter stuurbaar waardoor de concentraties constant gehouden kunnen worden, zeer belangrijk voor de beheersing van desinfectiegraad en gehalte aan niet gewenste chloorproducten. Hiermee zijn de aspecten genoemd die een rol spelen bij optimalisering van procesvoering en ontwerp.

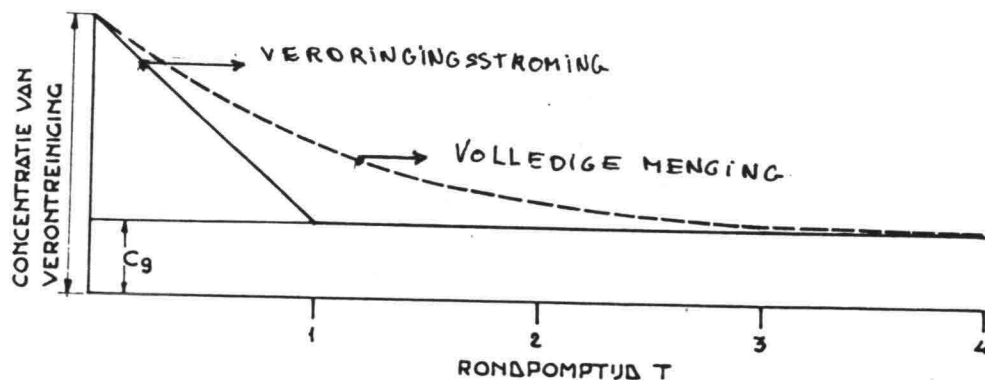


Fig 6 Afname van verontreinigingen na sluiting zwembad

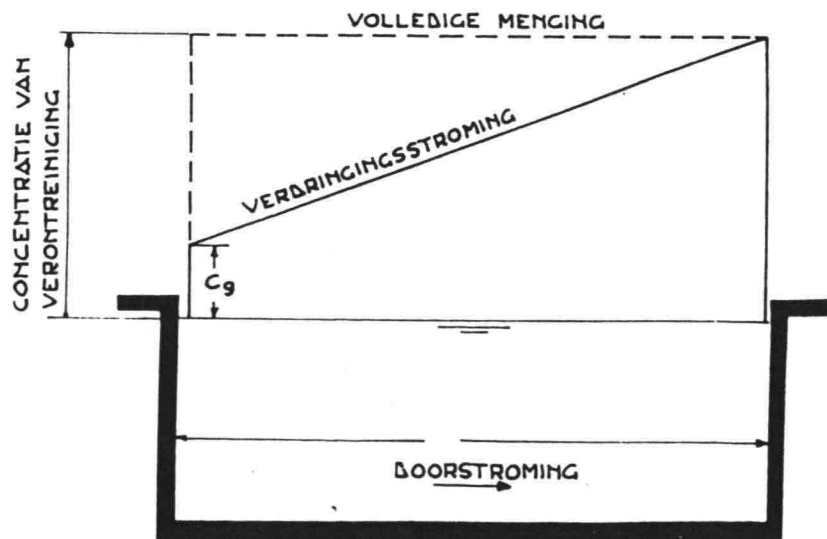
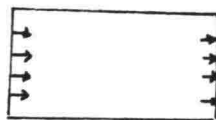


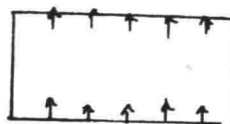
Fig. 7 verdeling van de verontreiniging over het bekken

1.2 Stroming in zwembaden.

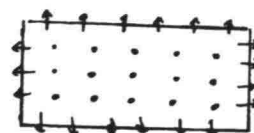
De belangrijkste stromingstypen zijn (bovenaanzicht):



langscirculatie



dwarscirculatie



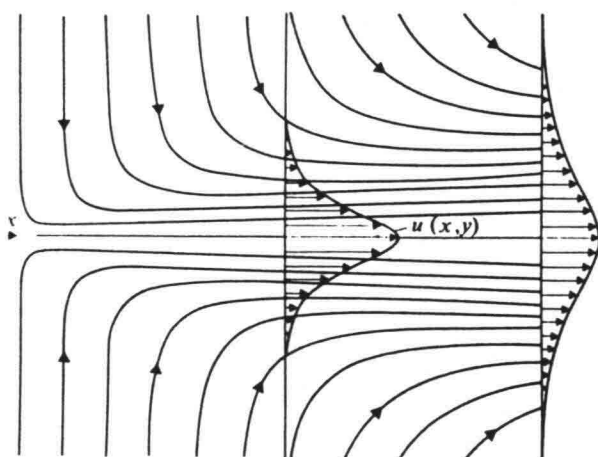
verticale circulatie

Bij al deze types is het feit dat de instroming niet gelijkmatig is, maar geconcentreerd is in de instroompunten, in het hele bekken merkbaar; de afstanden tussen in- en uitstroompunten zijn relatief klein t.o.v. de afstanden tussen de instroompunten onderling. Met name voor het verticaal doorstroomde type is dit het geval, (in een dergelijk type is geëxperimenteerd met een tracer). Daarom zal enige aandacht geschonken worden aan het detail van het instroompunt en de gevolgen voor de stroming in een bassin met verticale circulatie.

Bij stroming uit een opening in stilstaand water zal het instromende water de wand loslaten en een straal vormen. In het ideale geval wanneer de instroming uit een ronde opening volstrekt niet gehinderd wordt, ontstaat een vrije 3-dimensionale straal (fig. 8 en 9).

De breedte van de straal neemt toe door "entrainment" van het omliggende water als gevolg van het meeslepen van omgevingswater door de straal (no. 9).

Fig. 8 schema van stroomlijnen en entrainment.



De toename van de halve breedte (b) langs de as (x) van een turbulente straal blijkt theoretisch, uit de bewegings- en continuïteitsvergelijkingen, en experimenteel bepaald te zijn op ongeveer (fig. 9):

$$b = 0,1 x \quad (\text{varierend van } 0,081 x \text{ tot } 0,11 x \text{ volgens diverse onderzoekers) (no. 8)}$$

In een verticaal doorstroomd bad zijn de afstanden tussen de injectiepunten onderling meestal 2 tot 3 meter. Bij een diepte van 2 m en een instroomopening van 0,20 m is de breedte van de straal vlak onder de waterspiegel dus bij benadering gelijk aan 0,6 meter (fig. 10).

Voor het geval het instromende water een opgeloste stof bevat zal er binnen de straal een concentratieverdeling aanwezig zijn die nagenoeg gelijk is aan de snelheidsverdeling (fig. 9). De spreiding is weliswaar iets groter maar de stof zal in eerste instantie voornamelijk door de straal verplaatst worden.

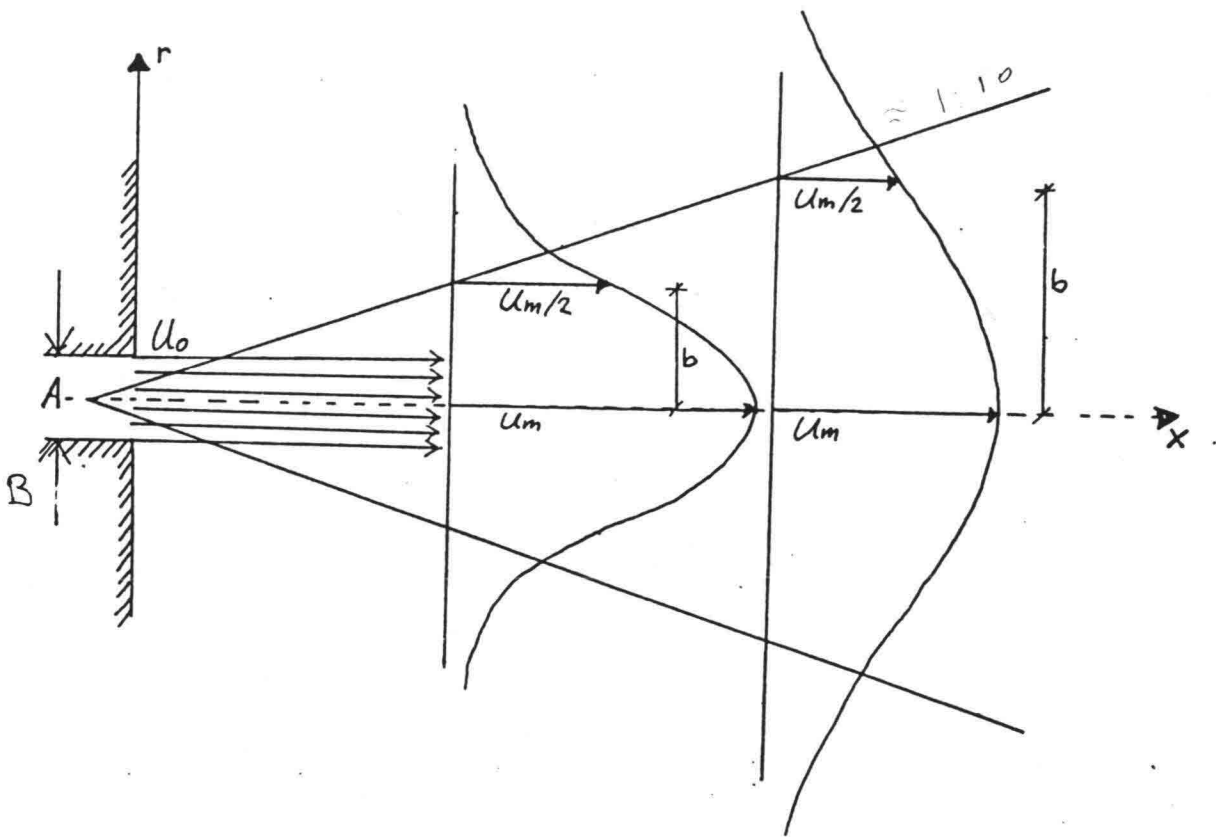
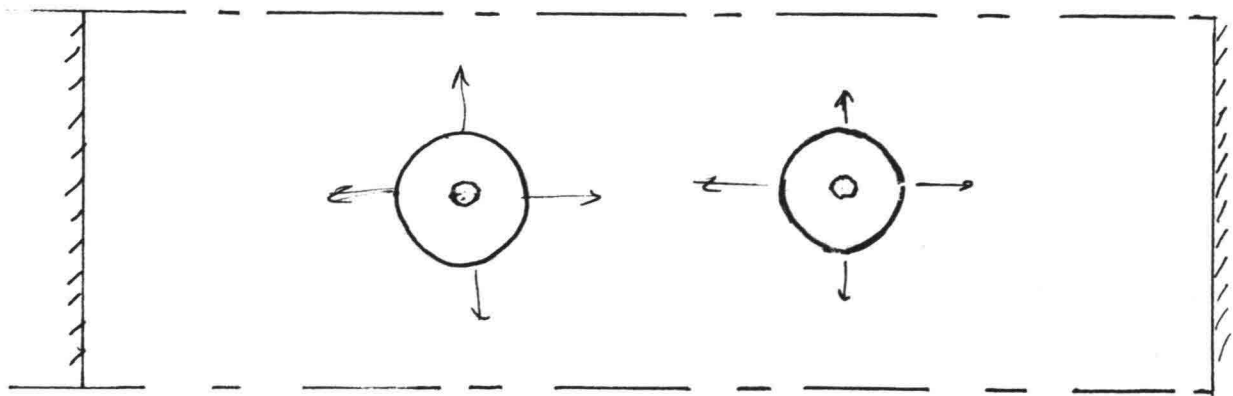
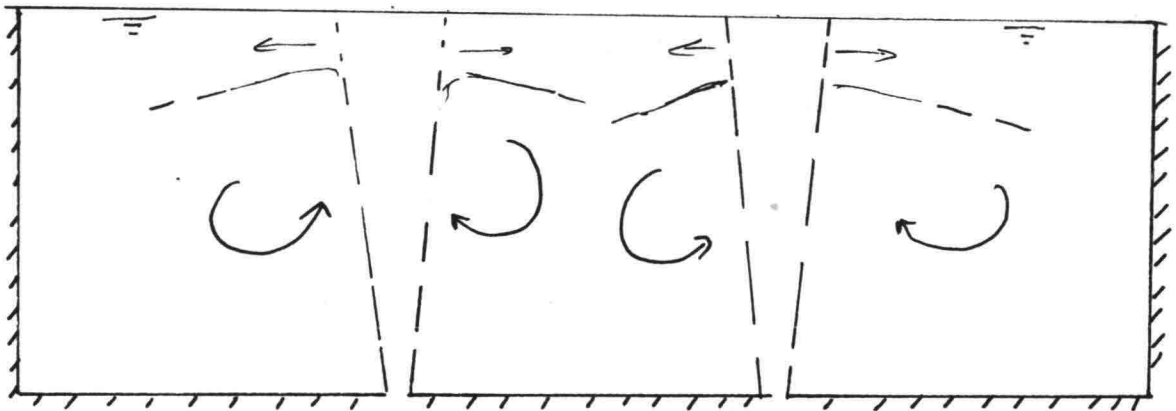


Fig. 9 Vrije 3- dimensionale straal. (r en x niet op zelfde schaal)

Er zal een extra verspreiding plaatsvinden door turbulentie; de snelheids- en concentratieverdeling binnen de straal variëren nl. sterk rond de gegeven gemiddelde situatie, zowel in richting als in grootte.



Bovenaanzicht



Doorsnede

Fig. 10 Strooming rond de injectiepunten.

Vanaf de oppervlakte zal het instromende water zich naar alle richtingen verspreiden (fig. 9), in enige mate lijkt de strooming dan op een radiale straal (fig. 11). De ontwikkeling van de radiale straal wordt waarschijnlijk gehinderd door de andere stralen en de wanden.

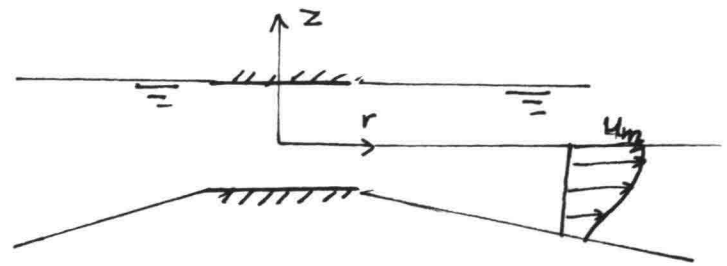
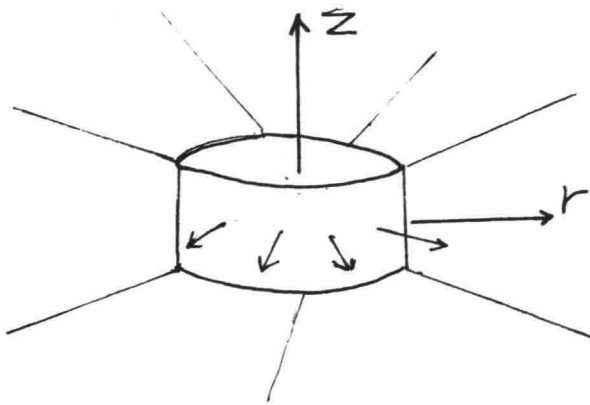


Fig. 11 Vrije radiale straal.

Om de snelheid te bepalen waarmee het instromende water de rand bereikt is gebruik gemaakt van de theorie over de stralen (Bijlage 1a); toepassing van de theorie over de radiale straal hierbij bleek hierbij niet zinvol te zijn omdat

- . de onderlinge invloed van de stralen te groot is om te spreken van een vrije straal.
- . de stroomsnelheid te laag is om met zekerheid de theorie van turbulente stralen toe te passen (dit is nagerekend voor enkele zwemaden met verticale circulatie).

Er kan wel verwacht worden dat bij benadering het stroombeeld na het bereiken van de oppervlak lijkt op dat van een radiale straal, zodat het beeld van de stroming door fig. 10 wordt gegeven. Te zien is dat een interne recirculatie tussen de stralen onderling en tussen wand en stralen ontstaat, dit lijkt door het tracerexperiment te worden bevestigd (zie 3.7 en 4.1).

Uit deze beschouwing blijkt dat voor een 2-dimensionale schematisering de 3-dimensionale invloeden te groot zijn.

2. THEORIE, MODELLERING

2.1 Methoden van onderzoek.

Gekeken is welke mogelijkheden er zijn om het probleem te onderzoeken. De wijze waarop het water met de daarin opgeloste stoffen, waaronder het desinfectiemiddel, getransporteerd wordt kan gezien worden als eigenschap van een transportsysteem. Om de essentiële eigenschappen van een systeem vast te leggen moet een model gebruikt worden, dat het gedrag van de relevante parameters, bijvoorbeeld stroomsnelheid en verblijftijd, beschrijft. In het algemeen kunnen modellen onderverdeeld worden in (no. 6) :

- conceptuele modellen
- fysische modellen (empirisch), ook lab.modellen
- wiskundige modellen

Een ander onderscheid betreft het doel waartoe het model dient :

- research; als aangrijpingspunt voor verder onderzoek.
- ontwerp; voor vergelijking van de effecten van verschillende ontwerpcriteria.
- procesbeheersing

De modelkeuze hangt ook samen met de vraag welke parameters expliciet beschreven moeten worden.

Toepassing van een wiskundig model zou neerkomen op beschrijving van de stroomparameters met hydrodynamische wetten. Overwogen is om dergelijke modellen te gebruiken, gedacht werd aan de programma's Duchess en Cocon voor beschrijving van resp. verblijftijd en concentratie als functie van tijd en plaats. Deze zijn gebruikt voor aquacultuurbassins (no. 7). Echter deze en soortgelijke hydrodynamische modellen gaan uit van een tweedimensionale stroomtoestand, terwijl uit een beschouwing van de stroming in een zwembad (§ 1.2) blijkt dat vereenvoudiging tot een tweedimensionale stroming niet toelaatbaar is. Driedimensionale modellen voor dit probleem zijn niet beschikbaar.

Daarom is gebruik gemaakt van een conceptueel model van de stroming (een opsplitsing van het zwembad in compartimenten die bestaan uit geïdealiseerde stroomruimtes, zie § 2.4), dat zich goed leent voor signaalanalyse. Aan de hand van het model kunnen nl. de vervorming en vertraging van een signaal door het transportsysteem in het bekken beschreven worden. In dit geval is het signaal de concentratie van een tracer.

Zo kan ondanks het minder gedetailleerd zijn dan een fysisch of mathematisch model toch informatie verkregen worden over :

- 1 De structuur van het systeem in de vorm van formules, zoals de impulsresponsie (zie 3.0).
- 2 De grootte van de belangrijke parameters, zoals gemiddelde verblijftijd en -sspreiding.
- 3 De toestand van het systeem in de tijd t.g.v. een dosering, weergegeven als een concentratie.

Punt 3 is vooral zinvol ten behoeve van het genoemde doel no. 3, nl. procesbeheersing; de concentratietoestand in relatie tot de dosering van chloor is belangrijk voor de kwaliteitsbeheersing. Om de gevraagde modelparameters te vinden worden de invoergegevens van het experiment bij het model ingevoerd. De resultaten van meting en model komen overeen wanneer de juiste parameters gevonden zijn.

2.2 Signaaltheorie.

De basistheorie voor onderzoek naar verblijftijdsspreiding zoals die in het zwembad is uitgevoerd is de theorie van de signaalanalyse. Bij signaalanalyse wordt een systeem onderzocht aan de hand van een ingangs- en een uitgangssignaal. De definitie van een systeem is nl. dat een inputsignaal $f(t)$ transformeert tot een specifieke outputsignaal $g(t)$. Derhalve kan een systeem onderzocht worden aan de hand van de transformatie die plaatsheeft van in- naar uitgangssignaal.

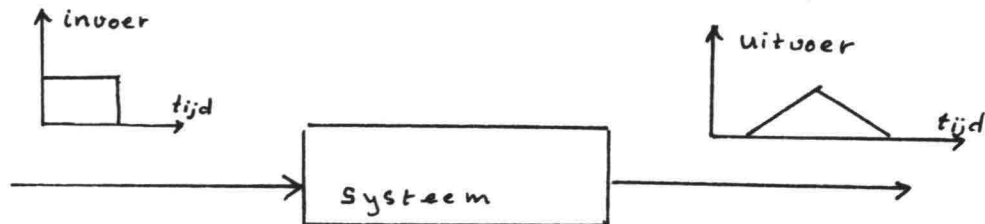


Fig. 12 Signaaltransformatie in een systeem.

Ten aanzien van signalen kan een aantal onderscheiden gemaakt worden; een signaal kan zijn:

- deterministisch of stochastisch, bij een stochastisch signaal is de waarde op een bepaald tijdstip niet met zekerheid te geven.
- continu of bemonsterd.
- periodiek, $f(t) = f(t+T)$ tegenover niet-periodiek.

Vooruitkijkend kan gezegd worden dat in dit geval het ingangssignaal deterministisch, continu en niet-periodiek is, en het uitgangssignaal deterministisch, bemonsterd en niet periodiek is, maar wel periodieke componenten schijnt te bevatten (§ 4.1).

Een continu signaal kan beschreven worden door een functie $f(t)$ die gedefinieerd is voor iedere reële t . Ingewikkelde functies kunnen soms ontbonden worden in deelsignalen om de analyse van de transformatie te vereenvoudigen.

Een veel gebruikte standaardfunctie bij signaalanalyse, die ook in dit geval toegepast zal worden is de functie $\delta(t)$ voor een impuls waarvan de duur naar nul nadert. Hiervoor geldt :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \text{ en } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \tau(t) dt = \tau(0), \text{ voor alle } \tau(t), \text{ continu in } 0. \text{ (no.10).}$$

De responsie op de δ -functie wordt de impulsresponsie $h(t)$ van het systeem genoemd. Als het signaal $f(t)$ een verwaarloosbare tijdsduur heeft t.o.v. de tijdsduur van $h(t)$, dan is de responsie op $f(t)$ voor een lineair systeem gelijk aan $A \cdot h(t)$, waarin

$$A = \int_{-\Delta t}^{\Delta t} f(t) dt \quad (\Delta t \rightarrow 0)$$

Voor de signaaltransformatie L van een lineair systeem geldt immers: $L[a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)] = a_1 L[f_1(t)] + a_2 L[f_2(t)]$.

Het voordeel van het gebruik van de impulsfunctie is dat een willekeurig ingevoerd signaal ontbonden kan worden in deelsignalen van oneindig korte tijdsduur. Op tijdstip t is de responsie van het systeem op een deelsignaal $f(i)$ op tijdstip i gelijk aan:

$$f(i) \Delta \tau h(t - i)$$

De responsie $g(t)$ op tijdstip t , t.g.v. van alle deelsignalen is dan de convolutie van $f(t)$ en de impulsresponsie $h(t)$:

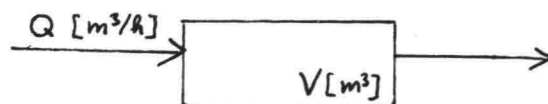
$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau) h(\tau) d\tau$$

De impulsresponsiefunctie geeft informatie over het systeem, deze kan volgens verschillende technieken uit een gemeten signaal bepaald worden.

Bij het verblijftijdsonderzoek wordt er ook naar gestreefd deze functie te leren kennen. De gevonden functie geeft nl. de kansdichtheidsverdeling van de verblijftijden en het zwaartepunt van de functie is de gemiddelde verblijftijd van het water, dit zal uitgelegd worden in § 2.3.

2.3 Verblijftijdsmeting met een tracer.

In het geval van een zwembad bestaat het systeem uit een volume V , waarin een stationaire doorstroming plaatsvindt van een debietstroom Q . De theoretische verblijftijd T van het water in het bekken is gelijk aan V/Q .



Afhankelijk van de stroming in het bekken zal een gedeelte van de stroom een kleinere en een gedeelte een grotere verblijftijd hebben dan T . Hoe groot de afwijkingen t.o.v. t zijn en welke gedeeltes bij de afwijkende verblijftijden horen wordt weergegeven door een kansdichtheidsverdeling van de verblijftijden ofwel de verblijftijdsspreiding (zie fig 13). De verblijftijdsspreiding geeft de mate van de dispersie van de stroming weer. De uiterste gevallen zijn: volledige menging (dispersie = ∞) en volledige verdringingsstroming (dispersie = 0) (zie fig. 14).

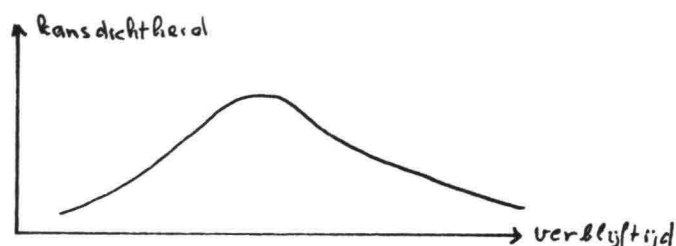


Fig. 13 Frequentieverdeling van de verblijftijden.

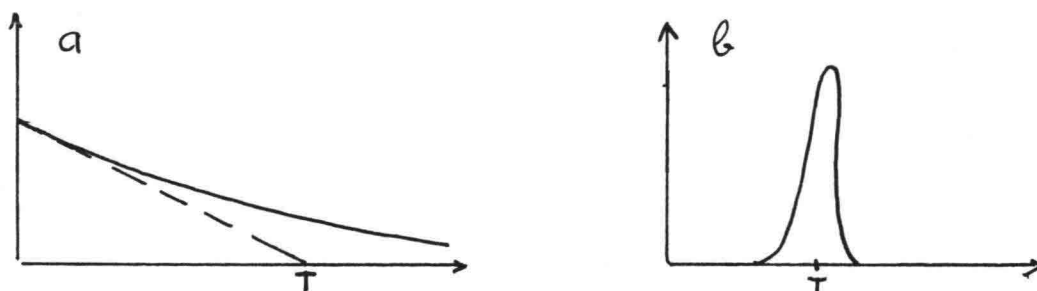


Fig. 14 Verblijftijdsverdeling, bij volledige menging (a) en volledige verdringingsstroming (b)

De verdelingscurve is identiek met de concentratiecurve die bij de afvoer gemeten kan worden wanneer een tracer bij de invoer gedoseerd wordt, mits deze stof dezelfde banen aflegt als de vloeistofdeeltjes.

De cumulatieve verdeling is te vergelijken met de gemeten curve bij stapdosering (een constante dosering in de toevoer) en de gewone frequentieverdeling met de genormaliseerde concentratiecurve bij dosering van een impuls (fig. 15).

De genormaliseerde concentratiecurve is:

$$C(t) = c(t)/A \quad [T^{-1}] \quad , \quad A = \int_{-\infty}^{\infty} c(t) \, dt$$

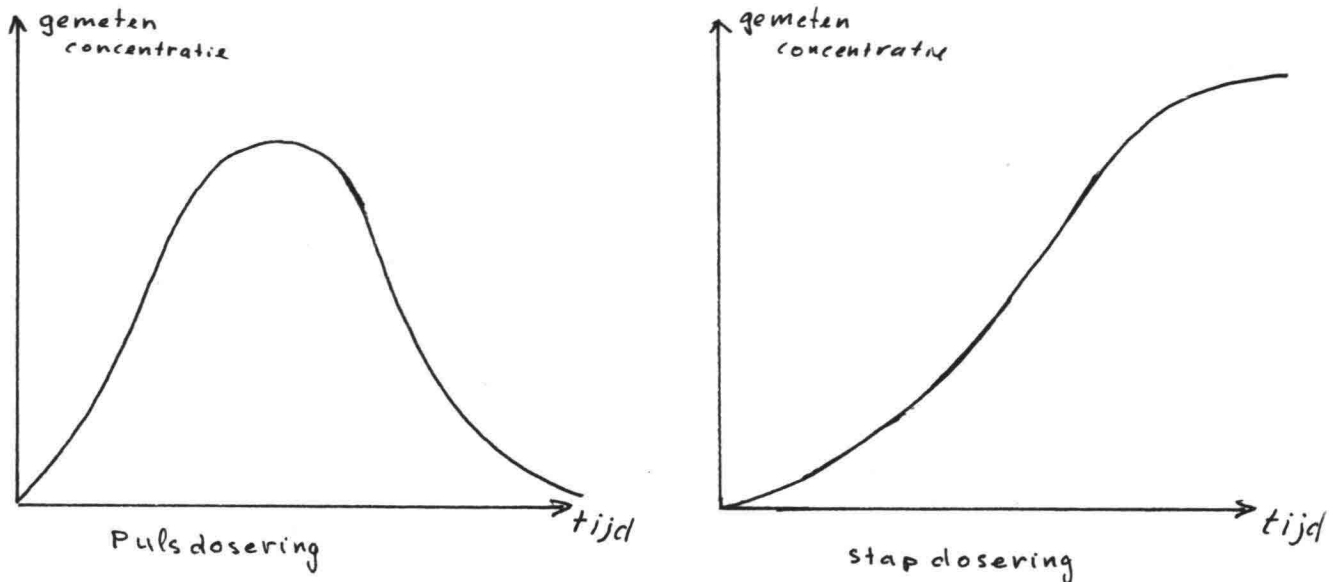


Fig. 15 Concentratiecurve in de afvoer bij puls- of stapdosering in het influent.

De genormaliseerde concentratiecurve, $C(t)$ in de afvoer t.g.v. een impuls is dus gelijk aan de curve voor de verblijftijdsspreiding. Deze wordt aangeduid als (no.11) :

$$\text{Exit-age} \quad E(t) \quad (= C(t)) \quad [T^{-1}]$$

De E functie is tevens de impulsresponsiefunctie $h(t)$ uit § 2.2 voor het systeem; in dit geval is het systeem het doorstroomde bekken.

De E -functie kan behalve voor de indicatie van het soort stroming gebruikt worden om het chemische reactiegedrag van de gedoseerde stoffen in het bassin te berekenen.

De genormaliseerde concentratiecurve in de afvoer, t.g.v. een stapdosering is gelijk aan de cumulatieve frequentieverdeling:

$$\begin{aligned} \text{Fractioncurve} \quad F(t) &= \int_0^t E \, dt, \text{ er moet gelden:} \\ F(\infty) &= \int_0^{\infty} E \, dt = 1 \end{aligned}$$

De E - of F -functie kan direct uit een experiment verkregen worden door dosering van een tracer aan de influentzijde en meting van de hoeveelheid tracer aan de afvoerzijde, mits de tracerdeeltjes vrijwel hetzelfde stroompatroon volgen als de waterdeeltjes.

Daarom wordt van een tracer, wil het voldoen voor de meting, geeist dat :

- 1 de concentratie nauwkeurig meetbaar is
- 2 er geen deeltjes verloren gaan tijdens de proef door chemische reactie met of door adsorptie aan stoffen in de doorstroomde ruimte.
- 3 er geen transport mag plaatsvinden anders dan het transport door de te onderzoeken stroming.
- 4 de waterkwaliteit niet zodanig beïnvloed wordt dat zij niet meer voldoet aan haar functie.

Naast de genoemde puls- en stapdosering kan men ook een willekeurige dosering gebruiken om de eigenschappen van de stroming te onderzoeken. De eigenschappen volgen dan ook uit de responsie die gemeten wordt, nu door middel van de convolutieintegraal van de impulsresponsie en de ingevoerde concentratieverloop (zie ook § 2.2):

$$c^{uit}(t) = \int_0^t c^{in}(\tau) E(t-\tau) d\tau \quad (a)$$

of

$$c^{uit}(t) = \int_0^t c^{in}(\tau) E(t-\tau) d\tau \quad (b)$$

Toelichting convolutieintegraal:

De gemeten concentratie in het effluent op een tijdstip t_1 , $c^{uit}(t)$ is gelijk aan de som van de responsies $c^{in}(\tau) E(t-\tau)$ op alle deelinvoeren $d\tau c^{in}(\tau)$ die voor t_1 liggen dus voor τ lopend van 0 tot t_1 .

Het bepalen van de E-functie en dus de verblijftijdsspreiding kan zo ook bij een andere dosering dan de puls- of stapdosering plaatsvinden m.b.v. de convolutieintegraal en de bekende in- en uitkomende tracerconcentraties. Voor de uitwerking van het model zal deze integraal verschillende malen als uitgangspunt genomen worden (o.a. in § 4.1 en 4.2).

In een zwembad zijn er enkele complicaties bij toepassing van deze theorie. De circulatie zorgt ervoor dat gedoseerde tracer na de afvoer gepasseerd te zijn weer door de invoer stroomt. En gewenst is om plaatselijke verschillen in verblijftijd te weten te komen. Daarom zal aan de hand van schematisering het systeem nader beschouwd worden in § 2.4.

2.4 Beschrijving van het model.

Uit de schema van het zwembad waar de meting gedaan is (fig. 19 en 20 § 3.1) is te zien dat, in de eerste plaats de aanvoerstroom gesplitst wordt in 2 deelstromen naar 2 vrijwel gescheiden bassins (alleen uitwisseling langs het wateroppervlak). Deze 2 gebieden kunnen als 2 afzonderlijke systemen beschouwd worden, waarvan de aanvoeren en de afvoeren met elkaar verbonden zijn:

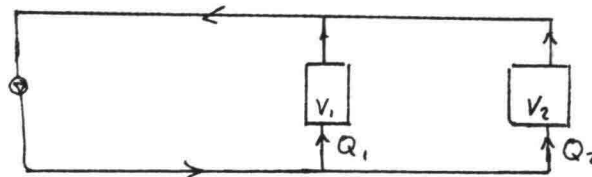


Fig. 16

Hetzelfde idee kan ook opgevat worden voor de deelstromen binnen de twee bassins, op de plattegrond van fig. 17 is als voorbeeld aangegeven hoe beide baden onder te verdelen zijn in gebieden van verschillende diepte met eigen toevoer en afvoer, nl. de inlaatpunten en de dichtstbijzijnde randgoot.

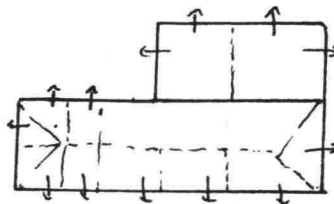


Fig. 17

Deze deelgebieden verschillen in volume, diepte, aan- of -afvoer en debietgrootte.

Het model voor 2 gescheiden systemen (fig.16) kan dan uitgebreid worden tot een n-tal gelijksoortige afzonderlijke systemen met verschillende verschillende waarden van de systeemp parameters (fig.18).

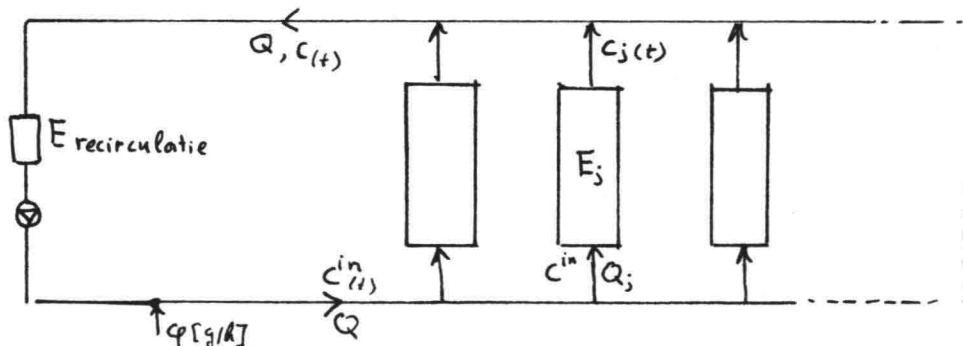


Fig. 18 Verdeling van het bassin in elementen

Deze afzonderlijke deelsystemen zijn niet volledig te vergelijken met de deelgebieden die in diepte verschillen, omdat er in

werkelijkheid sprake is van onderlinge beïnvloeding van de deelgebieden (zie § 2.4.1).

Bij continue dosering van een stof zal bij de afvoer langs de randen de concentratie $c_j(t)$ te meten zijn die bij het bijbehorende element hoort.

Uit de behoudswetten volgt:

$$\sum Q_j = Q$$

$$1/Q \sum c_j(t) Q_j = c(t)$$

Het systeem buiten het bassin, bestaande uit filter, buffer en leidingen, heeft wel een vertragende invloed maar de spreiding is verwaarloosd t.o.v. die van het zwembassin. (E recirculatie)

Aangenomen is dat op ieder tijdstip de concentratie van het water naar het bassin, c^{in} , bekend is, deze is nl. gelijk aan de gemeten concentratie bij meetpunt T (zie 3.3.3 en bijlage 3), $c(t) + \Phi/Q$ (t.g.v. de dosering), dus:

$$c^{in} = c(t) + \Phi/Q \quad [g/m^3]$$

Verder gelden de convolutieintegralen van vergelijking 1, zie ook § 2.4.1.

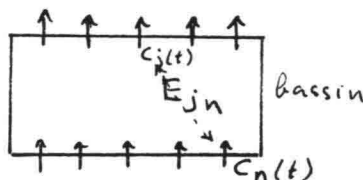
Een berekening van de impulsresponsiefuncties van de diverse deelsystemen via een totaalbalans voor het systeem is niet uitgevoerd. De vergelijkingen waren analytisch niet op te lossen. Vanwege het grillige verloop van de grafieken en het beperkte aantal waarnemingen werden moeilijkheden voorzien bij toepassing van numerieke methoden.

2.4.1 Toelichting systeemaanpak.

De concentratie $c_j(t)$ in de afvoer van het j^e element ($j = 1, 2, \dots, J$) wordt in principe beïnvloed door de concentraties $c_n(t)$ in alle injectiepunten ($n = 1, 2, \dots, N$) dus voor een lineair systeem geldt:

$$c_j(t) = \int_0^t \sum_{n=1}^N c_n(t-\tau) E_{jn}(\tau) d\tau \quad (c_n(t) = 0 \text{ voor } t < 0)$$

$E_{jn}(t)$ is een onbekende impulsresponsiefunctie (er zijn $J \times N$ van deze functies). De functies $E_{jn}(t)$ zouden bepaald kunnen worden door telkens in één van de injectiepunten te doseren en $c_j(t)$ te meten.



$E_{jn}(t)$ zal afhangen van de plaats van de afvoer van j t.o.v. de stromingsrichting. Voor de hand ligt dat de inlaten op kleinere afstand meer invloed zullen hebben en dat de functies E_{jn} van j t.o.v. n voor inlaten op verdere afstand verwaarloosd kunnen worden.

In het beschouwde geval dat de concentraties in alle inlaatpunten nagenoeg dezelfde zijn ($c_n(t) = c^{in}(t)$), kan boven staande

uitdrukking vereenvoudigd worden tot :

$$c_j(t) = \int_0^t c^{in}(t - \tau) E_j(\tau) d\tau ,$$

met

$$E_j(t) = \sum_n E_{jn}(t)$$

Voor een bepaald meetpunt kunnen de impulsresponsies voor de verschillende inlaatpunten nu dus gesuperponeerd worden tot één impulsresponsiefunctie $E_j(t)$. Er moet gelden :

$$\int_0^\infty E_j(t) dt = \sum_n \int_0^\infty E_{jn}(t) dt = 1$$

3. UITVOERING VAN HET EXPERIMENT

In de inleiding zijn de doelstellingen vermeld die betrekking hebben op het experiment. De bedoeling van de proef is de verblijftijden, verblijftijdsspreiding en de ruimtelijke verschillen daarin voor een bestaand zwembad af te leiden aan de hand van metingen van gehalten van een gedoseerde tracer. De theorie hiervan is besproken in hoofdstuk 2.

3.1 Keuze van het zwembad.

Met behulp van reeds bekende gegevens en aanvullend informeren is van een zevental zwembaden nagegaan of deze in aanmerking kwamen voor de verblijftijdsmeting. De criteria hiervoor waren:

- Aanwezigheid van een geschikte doseeraansluiting in de toevoerleiding naar het bassin, op een plaats met voldoende menging in de leiding. Of de mogelijkheid om de tracer in de bufferkelder te storten (fig. 1).
- Monsternamen uit de retourleiding vanuit het bassin moet mogelijk zijn.
- Aanwezigheid van goed functionerende flowmeters in de machinekamer.
- Toestemming van de beheerder om het experiment uit te voeren tijdens uren waarop er niet gezwommen wordt.

De mogelijke zwembaden bevonden zich in Almere, Den Haag, Nieuwegein, Papendrecht, Rijnsburg en Rotterdam (2x).

Vijf van de zwembaden bleken te voldoen aan de technische vereisten, gekozen is voor Oostervant in Rotterdam vanwege de kleinere afstand, het beschikbaar zijn van het zwembad gedurende enkele uren en overige redenen van praktische aard. Het circulatietype speelde ook een rol, het gekozen zwembad had een verticale circulatie. Dit systeem wordt sinds enige tijd het meest toegepast.

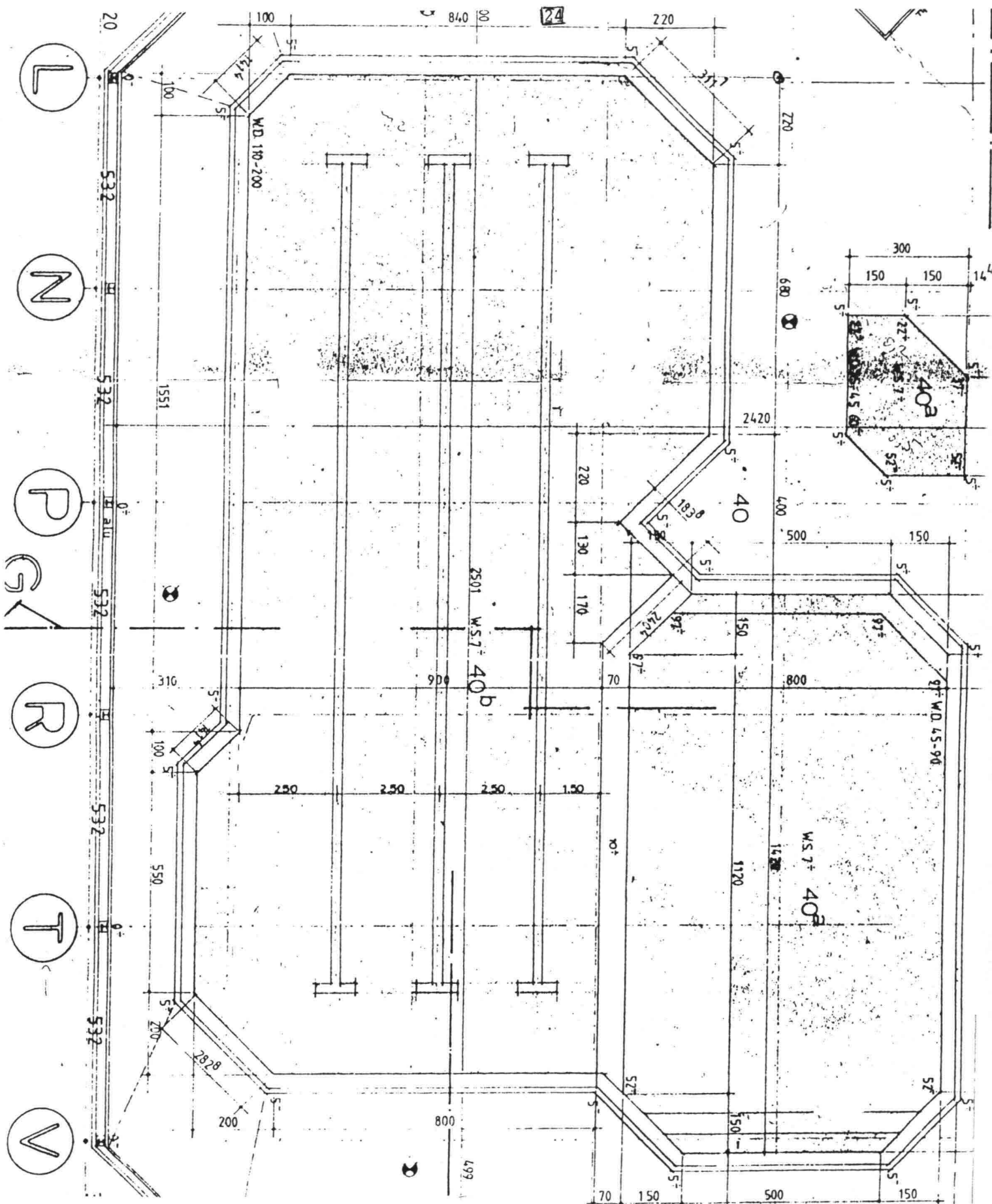


Fig. 19 a Plattegrond zwembad

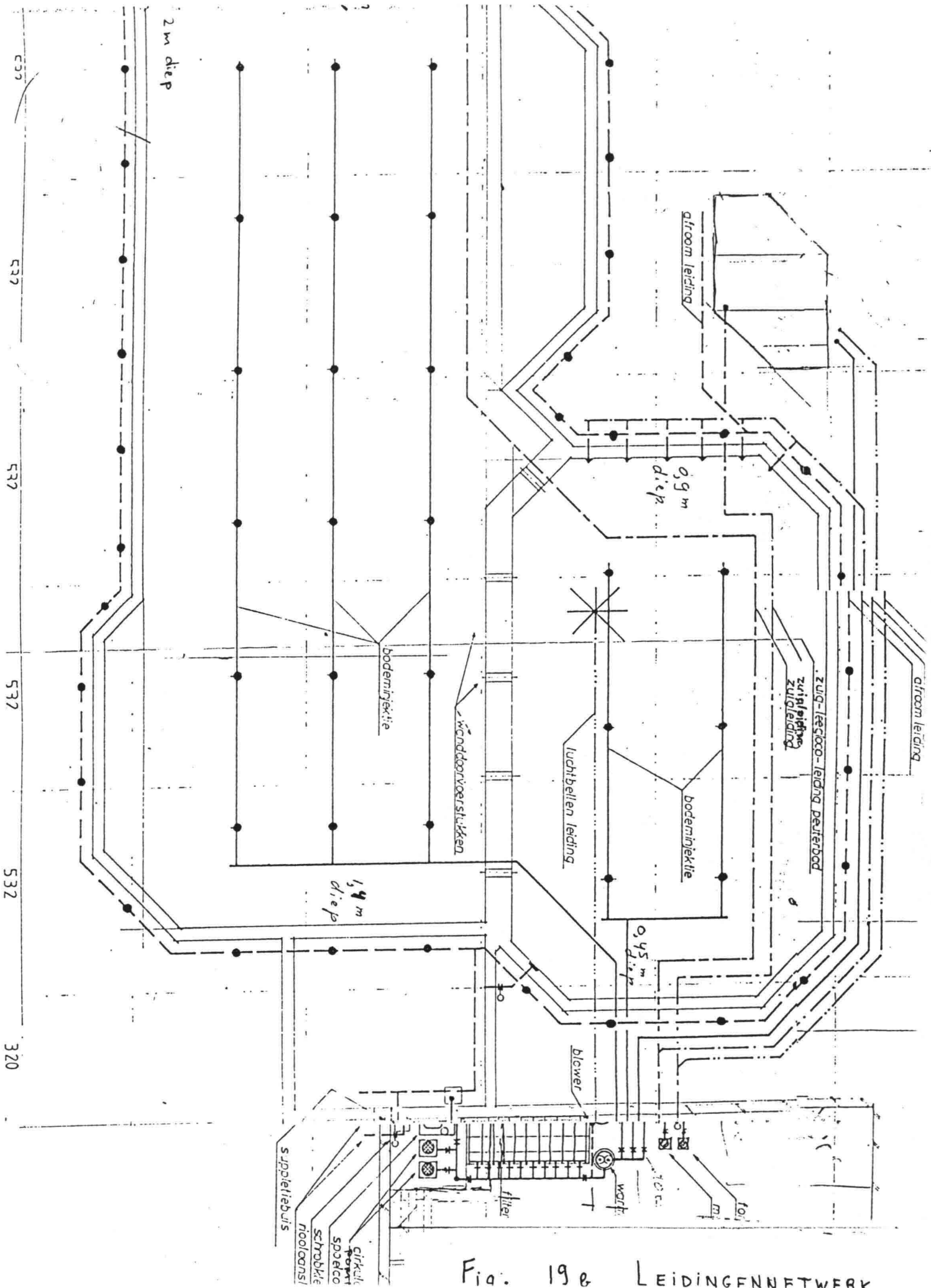


FIG. 196 LEIDINGFNNETWERK

3.2 Beschrijving van het gekozen zwembad.

Het zwembad bestaat uit twee gedeeltes, diep en ondiep, gescheiden door een wand die tot enkele cm onder de waterspiegel reikt (zie fig. 19 en 20). Verder is er nog een peuterbad, dat tijdens de metingen afgesloten was van de circulatie (leiding 3 in fig. 21 was afgesloten).

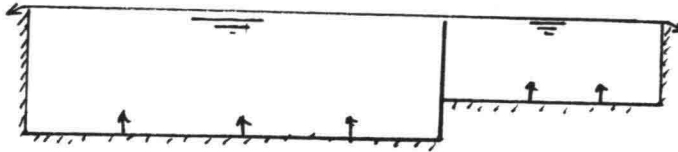


Fig. 20 doorsnede T van fig. 19 a

Het circulatietype van het zwembad is verticale doorstroming; instroming vindt plaats uit de bodem en het water wordt afgevoerd via een overloopgoot waarin zich op regelmatige afstanden afvoeropeningen bevinden. Na de overloopgoot stroomt het water via 2 ringleidingen om het zwembad naar de bufferkelder (fig. 19 b leidingen).

Vanuit de bufferkelder wordt het water opgepompt door 2 pompen en door het filter heen geperst, waarna het weer naar het zwembassin stroomt. Het gedeelte na de filter is weergegeven in fig. 21 Er is besloten hier te doseren, omdat geschikte openingen in de leiding aanwezig zijn. Na dit gedeelte zijn er geen openingen meer in de leiding.

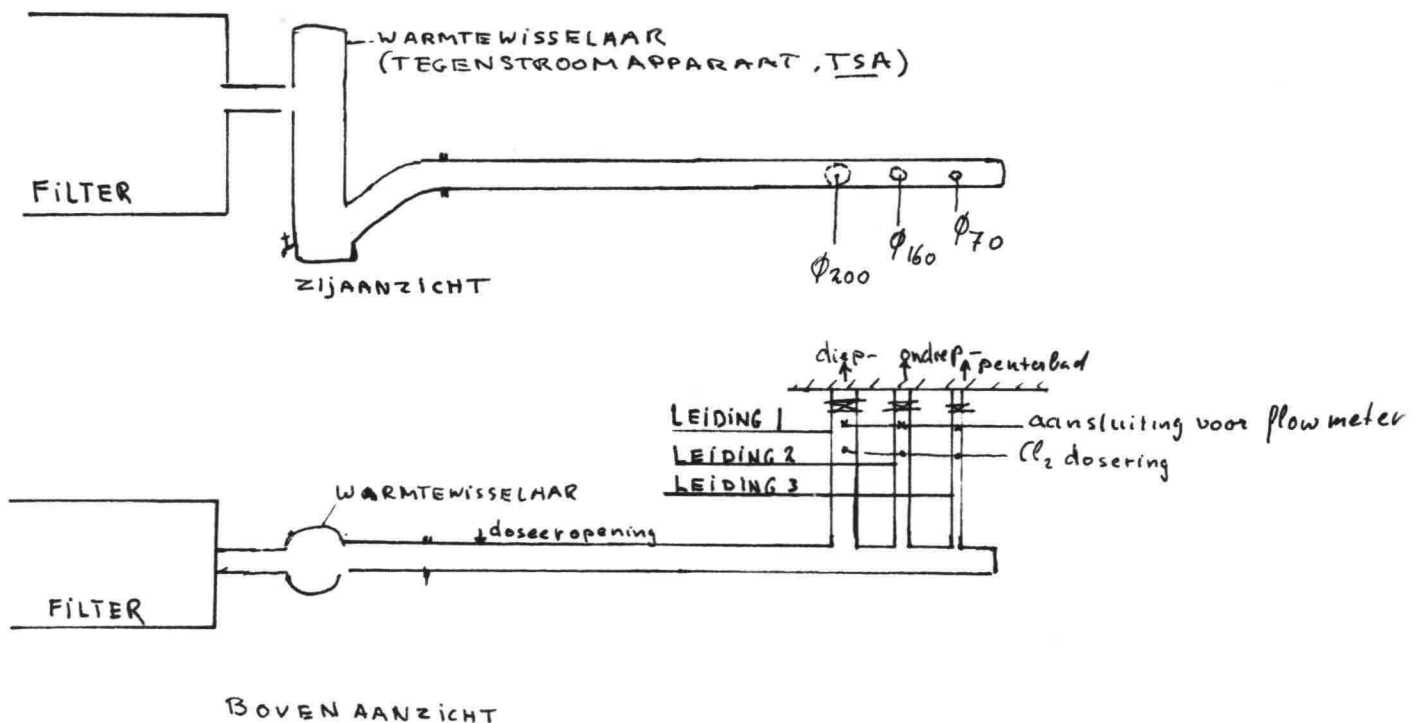


Fig. 21 LEIDINGEN GEDEELTE NA FILTER,
DOSEER AANSLUITINGEN

Het debiet door leiding 1 (naar het diepe deel): $Q1 = 113,1 \text{ m}^3/\text{h}$
 Het debiet door leiding 2 (naar ondiepe deel): $Q2 = 43,4 \text{ m}^3/\text{h}$
 (gemeten met elektronische debietmeters van het zwembad zelf)

Totaal : $Q = 156,5 \text{ m}^3/\text{h}$

Het volume van het zwembad (zonder het peuterbad): $V = 535 \text{ m}^3$

Dit volume is een dag na de meting bepaald uit de concentratie die in het zwembad werd aangetroffen.

Globaal uit de afmeting
 was tevoren bepaald

$V1 = 465 \text{ m}^3$
 $V2 = 70 \text{ m}^3$

Naast de doseeraansluitingen na het TSA zijn de enige verbindingen met het leidingennetwerk 2 tapkranen bij de pompen en 1 kraan onder het TSA gedeelte.
 De bufferkelder is vrijwel onbereikbaar.

3.3 Meetmethode.

Afwegingen moesten gemaakt worden betreffende:

- 1 soort tracer.
- 2 dosering.
 - . puls- of stapdosering.
 - . in geval van stapdosering, de stofflux.
 - . hoeveelheid tracer (bij puls), tijdsduur van dosering (stap).
- 3 waar en wanneer er gemeten (bemonsterd) moet worden.
- 4 werkwijze meting (monsternamen).

3.3.1 Tracerkeuze.

De tracer moet voldoen aan de eisen:

- . nauwkeurig meetbaar.
- . geen reactie met of adsorptie aan andere stoffen.
- . niet schadelijk voor zwemmers of zwembad; de stof blijft vrij lang in het zwembad, het duurt nl. enkele weken voor al het water vervast is.

Vooraf vanwege het nauwkeurig en snel meetbaar zijn van Lithium m.b.v. de atoomspectrofotometer kwam deze stof het meest in aanmerking als tracer. In dit geval moest over de toxiciteit van Lithium nader geïnformeerd worden. Uit gegevens van het Rijksinstituut voor milieuhygiëne (RIVM), waar onderzoek over Lithium is verricht, bleek de toelaatbare dosis 0,1 tot 0,5 mg/dag per persoon te zijn. De detectiegrens voor de proef zou 0,1 mg/l zijn zodat met veilige concentraties de proef kon worden uitgevoerd. De Lithiumzouten die vaak gebruikt worden als tracer zijn Lithiumsulfaatmonohydraat, Lithiumchloride en Lithiumchloridemonohydraat. De laatste was niet snel genoeg beschikbaar, zodat de keuze zich beperkte tot:

Lith.sulf.monohydr., $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$, oplosbaarheid = 349 g/l
 $M = 127,95 \text{ g/mol}$, $s.g. = 8,80 \text{ g/ml}$

of

Lith.chloride, LiCl , oplosbaarheid = 637 g/l
 $M = 42,39 \text{ g/mol}$, $s.g. = 2,068 \text{ g/ml}$

Vergelijking van de kosten toonde een klein voordeel voor Lithiumsulfaat, wat echter niet opwoog tegen de grotere zuiverheid en oplosbaarheid van Lithiumchloride. De oplosbaarheid is hier van groot belang omdat bij grotere hoeveelheden traceroplossing de doseringstijd ook toeneemt (zie § 3.4.2 over tracerflux).

Gekozen is voor toepassing van Lithiumchloride als tracer. In het bassin werden monsters genomen en de meting van de concentratie vond achteraf plaats met de atoomspectrofotometer.

3.3.2 Dosering van de tracer.

Ten gevolge van een relatief grote volume is een grote hoeveelheid tracer nodig om meetbare concentraties aan te treffen. Hieruit

volgt dat pulsdosering vrijwel uitgesloten is. Een voordeel van pulsdosering zou kunnen zijn dat men wellicht geen hinder ondervindt van de invloed van de circulatie, waarbij afgevoerde tracer zich bij de doseringsflux voegt. Maar de bufferkelder is niet bereikbaar, zodat de totale hoeveelheid (enkele kilogrammen) in de leiding gedoseerd zou moeten worden, en dit is niet mogelijk binnen de gemiddelde vertragingstijd in bufferkelder en filter (geschat op 15 minuten).

Dus is er besloten om over ongeveer de theoretische verblijftijd van het zwembad (V/Q) te doseren, zodat een relatie tussen concentratieverloop en tijd goed te zien is, en voldoende tracer gedoseerd is om zekerheid te hebben over de meetbaarheid.

De duur van de dosering is ook afhankelijk van de capaciteit van de beschikbare doseerpomp en de oplosbaarheid van het tracerzout. De oplosbaarheid van het zout en de hoeveelheid benodigd zout bepalen de hoeveelheid oplossing die in een voorraadtank aanwezig moet zijn en het debiet van de doseerpomp bepaalt de benodigde tijdsduur voor dosering van de totale hoeveelheid, en de flux (Φ) van de tracer:

$$\begin{aligned} T_t &= V_t / q_t & [h] \\ \Phi &= c_t * q_t & [g/h] \\ G &= \Phi * T_t & [g] \end{aligned}$$

T_t : doseringstijd.

q_t : debiet van de doseerpomp.

V_t : volume traceroplossing in voorraadtank.

Φ : tracerflux naar de leiding.

c_t : concentratie in voorraadtank.

G : totale hoeveelheid tracer.

Gebruikt is een doseerpomp met een capaciteit van 5 l/h.

De exacte hoeveelheid tracer en de flux kunnen nu bepaald worden met overweging van de volgende factoren:

- Kostenbesparing, dus streven naar een zo klein mogelijke hoeveelheid.
- Gewenste eindconcentratie c_e (V/G) i.v.m. meetgrenzen voor Lithium ($\approx 0,05$ tot $5,00$ g/m³) en de kostenbesparing is hier $0,5$ tot $1,0$ g/m³ aangehouden.
- Totale volume V van het systeem ≈ 600 m³.
- Het molekuulgewicht van Lithiumchloride, $42,39$ g/mol in verhouding tot het atoomgewicht van Lithium, 70 g/mol, waaruit volgt dat voor y gram Lithium $y/7,0 * 42,39$ gram Lithiumchloride nodig is.
- De oplosbaarheid, 637 g/l, en de doseerpompgrenzen, 0 tot 5 l/h.
- De gewenste initiele concentratie (c_0) in de aanvoerleiding naar het zwembad, die gelijk is aan Φ/Q : $\approx 1,0$ g/m³.
- Beschikbare tijd om het experiment uit te voeren.

De theoretische verblijftijd is $\approx 600/156,5 = 3,8$ uur, zodat de eindconcentratie c_e na $3,8$ uur gelijk zal zijn aan c_0 . Gekozen

is voor $c_0 = 1,0 \text{ g/m}^3$ om ook bij een kortere doseerperiode voldoende meetbare concentraties te verkrijgen.

Het volume 600 m^3 is ruim genomen zodat er geen sprake zou zijn van een veel lagere concentratie dan verwacht. Indien er een gedeelte van het zwembad niet meedoet aan de stroming zullen de concentraties hoger zijn, (hoogstens 10 tot 20 %).

Berekend is dat bij oplossing van een hoeveelheid van ongeveer 2000 g Lithiumchloride in 10 liter water de gewenste resultaten bereikt worden.

Achteraf bepaalde volume V :	535	m^3
Totaal opgelost in 10 liter water :	2278	g
Doseerpomp ingesteld op (q_t) :	0,0043	m^3/h
Concentratie in voorraadtank (c_t) :	37,3	g/l
Constante tracerflux (Φ) :	160,39	g/h
Initiele concentratie (c_0) :	1,02	g/m^3
Eindconcentratie (c_∞) :	$\approx 0,7$	g/m^3
Rondpompdebiet (Q) :	156,5	m^3/h
Theor. verblijftijd ($T = V/Q$)	204	min.
Tijdsduur van dosering :	131	min.
Tijdsduur van meting :	≈ 150	min.

3.3.3 Plaatsen en tijden van meting, verwachting voor het verloop van de concentratie.

Van te voren zijn plaatsen gekozen, waar op vaste tijdstippen monsters genomen zouden worden, de meeste meetplaatsen bevinden zich langs de randen om het wegstromende water te kunnen bemonsteren. Vanwege een beperkt aantal personen en monsterflesjes konden niet alle interessante meetplaatsen in het programma opgenomen worden.

De plaatsen langs de rand waar monsters genomen zouden worden zijn aangegeven met de letters A t/m J (zie fig.22). Ook is er gemeten op afstand van de rand, deze plaatsen zijn aangegeven met een code beginnend met S. Er valt onderscheid te maken tussen monsters die aan de oppervlakte, op halve diepte of aan de bodem zijn genomen, aangegeven in de code met resp. o, m, en b. Bij E en G zijn behalve uit het water bij de rand, ter vergelijking ook monsters genomen uit de goot ter plaatse: metingen Eg en Gg.

De tijdstippen van meting zijn gekozen op grond van 2 extreme verwachtingen voor het verloop, nl. volledige menging en prop-stroming.

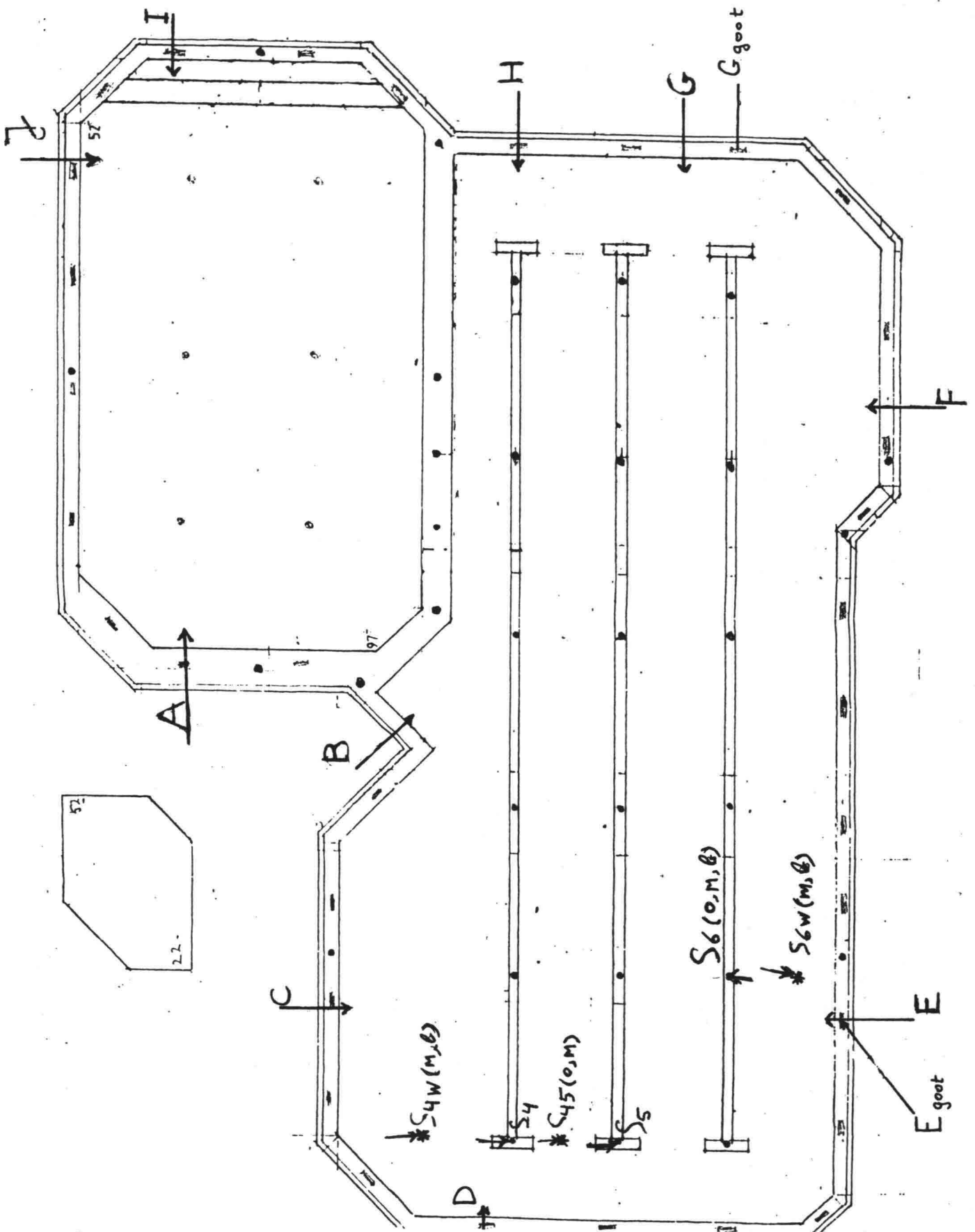


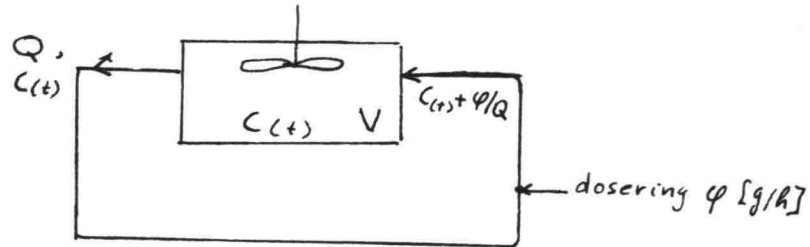
Fig. 22 OVERZICHT MEETPLAATSEN

Bij volledige menging kan het verloop van de concentratie in het bekken met een massabalans afgeleid worden: (vertraging buiten het bassin verwaarloosd) $t(\Phi + Q \cdot c) = t(Q \cdot c + V \cdot dc/dt)$, hieruit volgt :

$$dc/dt = \Phi/V$$

Na een periode $T = V/Q$ is de concentratie:

$$\Phi/V \cdot T = \Phi/Q = c_0$$



Φ : tracertoevoer [g/h]

c : concentratie in bekken [g/m³]

Q : debiet [m³/h]

V : volume van het bekken [m³]

c_0 : initiële concentratie in de leiding vlak na doseerpunt [g/m³]

Het verloop van de concentratie in de afvoer is dan een lineaire toename in de tijd (fig. 23). De invloed van de vertraging in de buffer en filter is in bijlage 1b afgeleid (fig.24).

Bij ideale propstroming wordt een plotselinge toename van de concentratie verwacht op tijdstip $T = V/Q$. In fig. 25 is de verwachting voor een tussenoplossing getekend.

Voor het beschrijven van het werkelijke verloop is een ingewikkelder model nodig, dit is uitgewerkt in 2.4 Voor bepaling van de tijdstippen van meting is dat model niet nodig geweest; voor een groot deel zijn deze gekozen uit praktische overwegingen. De tijdstippen zijn te vinden in bijlage 2 naast de meetresultaten.

Er is tevens een schatting gemaakt voor de tijd waarop de eerste tracerdeeltjes de rand bereiken m.b.v. de theorie over straalstroming. Het instromende water uit de injectiepunten is beschouwd als een vrije 3-dimensionale straal. Berekend is de tijd welke verloopt vanaf instroming in het diepe bassin (voor het ondiepe kon de theorie niet gebruikt worden, vanwege te geringe diepte voor ontwikkeling van een straal, zie bijlage 1a) tot het bereiken van de rand, zie bijlage 1a voor de berekening, de uitkomst is ca.5 minuten, deze tijd is zeer kort vergeleken met $T = 204$ minuten. Rekening moet worden gehouden met het feit dat de snelheid die in de formule wordt gebruikt een gemiddelde is. De werkelijke snelheid bij turbulentie varieert met de tijd, zowel wat de richting als de grootte betreft, zodat de uitkomst enige spreiding zal vertonen.

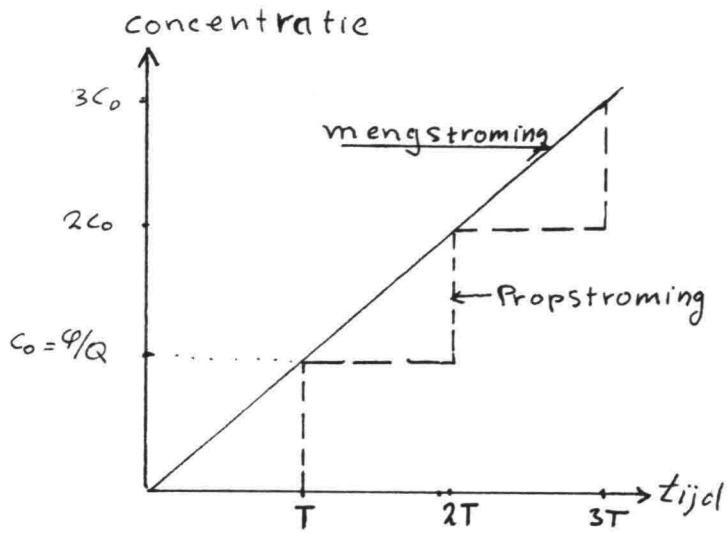


FIG. 23 STAPDOSERING IN EEN CIRCULATIESYSTEEM

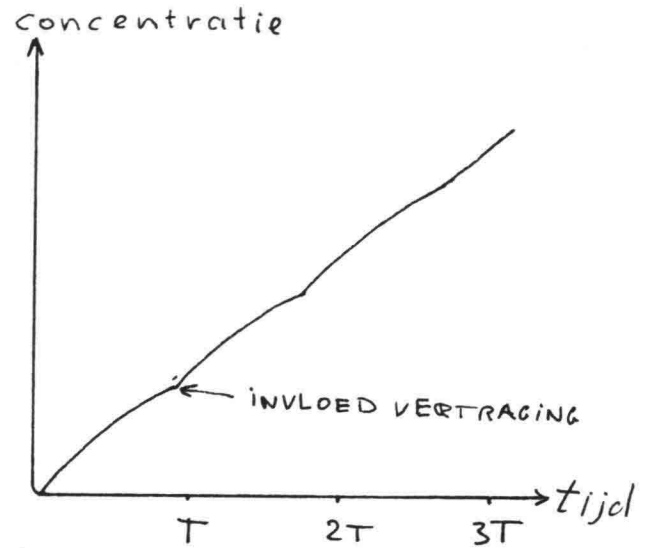


FIG. 24 IDEM, MENGSTROMING MET VERTRAGING IN DE RECIRCULATIE

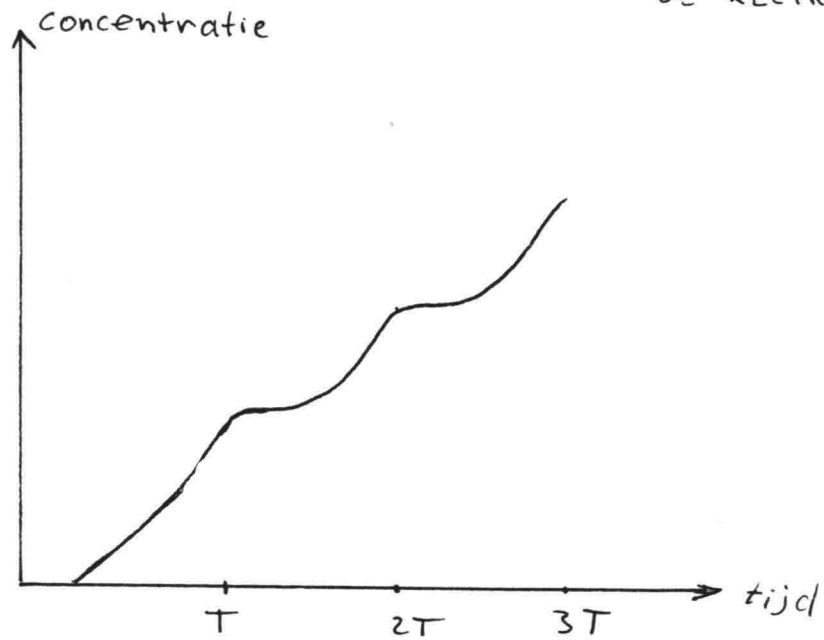


FIG. 25 COMBINATIE MENG- EN PROPSTROMING

3.3.4 Gevolgde werkwijze.

De doseerpomp is vooraf getest onder omstandigheden die tijdens de proef zouden heersen. De aansluiting is gemaakt via een opening na het de warmtewisselaar (zie fig.28). De warmtewisselaar was geruime tijd voor het begin van de proef uitgeschakeld om geen dichtheidsverschillen te veroorzaken.

De 16 meetplaatsen zijn verdeeld over 7 personen, die gedurende 150 minuten monsters hebben genomen.

De monsters langs de randen zijn genomen door eerst een ruime hoeveelheid water in een maatbeker te vangen en na roeren hiermee een flesje van 100 ml. te vullen.

Voor de metingen op afstand van de rand zijn aluminium staven gebruikt, waaraan een plastic fles bij de uiteinde was bevestigd. Voordat de monsters op diepte genomen werden werd de fles afgesloten met een kurk, eenmaal op de juiste plaats werd de kurk d.m.v. een touw uit de fles getrokken (zie fig. 26).

De monsters werden bewaard en achteraf bemeten, daarvoor was het nodig de flesjes aan te zuren met geconcentreerd zuur.

De meting van de Lithiumconcentratie vond plaats met de vlamemissietechniek. De werking berust op het in een hogere energieniveau brengen van de Lithiumatomen d.m.v. een lucht-acetylenevlam, en daarna bij terugval naar het oorspronkelijke niveau de afgegeven energie in de vorm van licht te meten; de gemeten emissie is evenredig met het aantal atomen en dus met de concentratie.

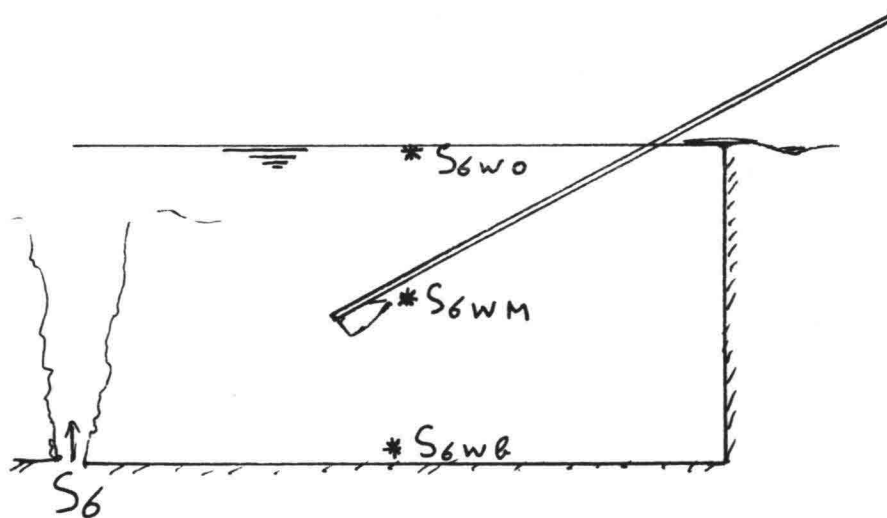
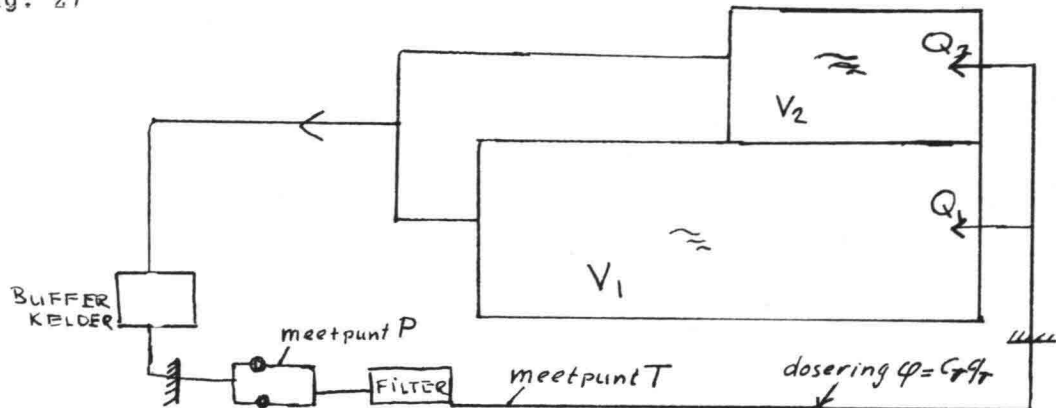


FIG. 26 VOORBEELD BEMONSTERING
OP AFSTAND

3.4 Overzicht van het meetprogramma.

Fig. 27

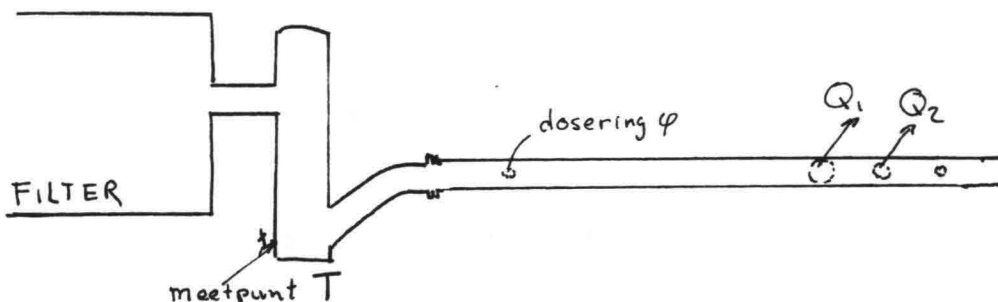


Achteraf bepaalde volume V :	535	m ³
Volume V1 :	465	m ³
Volume V2 :	70	m ³
Totaal opgelost in 10 liter water :	2278	g
Doseerpomp ingesteld op (q _t) :	0,0043	m ³ /h
Concentratie in voorraadtank (c _t) :	37,3	g/l
Constante tracerflux (Φ) :	160,39	g/h
Initiele concentratie (c ₀) :	1,02	g/m ³
Eindconcentratie (c _∞) :	≈ 0,7	g/m ³
Rondpompebiet (Q) :	156,5	m ³ /h
Debiet Q1 :	113,1	m ³ /h
Debiet Q2 :	43,4	m ³ /h
Tijdsduur van dosering :	131	min.

Begintijdstip van dosering was 8.35h, 155 min. daarna is de laatste meting verricht.

De tijdstappen variëren van 5 tot ongeveer 20 minuten.

Fig. 28 Plaats van dosering :



Plaatsen waar monsters zijn genomen :

10 plaatsen langs de rand

10 plaatsen in de stralen of tussen wand en straal.

In fig. 22 zijn de plaatsen met letters aangegeven.

De concentraties zijn gemeten m.b.v. emissietechniek met een Perkin Elmer 3030 B Atoomspectrofotometer.

3.5 Debietmetingen.

Om bepaalde verschijnselen in de resultaten van het traceronderzoek beter te kunnen verklaren zijn er debieten gemeten langs de rand en is er gekeken naar stromingsrichtingen aan de oppervlak, voorzover waarneembaar met eenvoudige drijvers.

De debietmeting is globaal bepaald door het wegstromende water op te vangen in een maatbeker en de daarvoor benodigde tijd met een stopwatch op te nemen. De meting is gedaan in de goot nabij de afvoeropeningen, op de plaatsen A t/m J. Steeds is gelet op de lengte van de rand waarover het water naar de betreffende opening stroomt en of het van links of rechts komt (zie fig. 29).

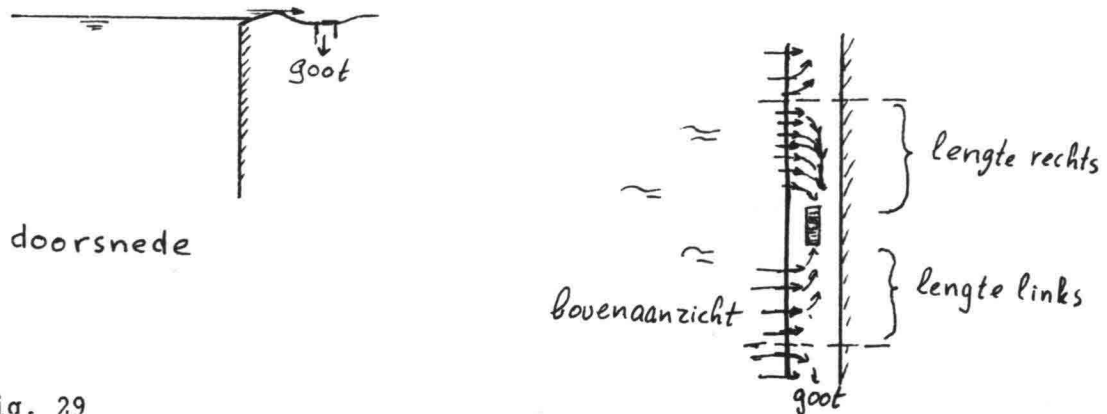


Fig. 29

De resultaten zijn weergegeven in tabel 1. In fig. 30 is voor de rand aangegeven op welke plaatsen veel stroming of opvallend weinig stroming was waar te nemen.

Tabel 1. globale afvoer in de goot bij de meetplaatsen.

meet- punt	links		rechts		totale afvoer [m ³ /h]
	lengte [m]	afvoer [m ³ /h]	lengte [m]	afvoer [m ³ /h]	
A	1,38	0,74	1,5	1,21	1,95
B	0,88	1,24	0,88	1,73	2,97
C	1,13	0,63	1,50	1,14	1,77
D	1,0	0,08	1,38	0,10	0,18
E	1,13	3,47	1,13	2,95	6,42
F	1,50	0,14	0,63	0,11	0,25
G	1,25	1,50	0,75	0	1,50
H		geen stroming over de rand			--
I		"	"	"	--
J	0,50	0,01	1,13	0,20	0,21

De bepalingen zijn niet nauwkeurig, verwacht wordt dat de werkelijke waarden voor de afvoer hoger zullen zijn, de afwijking kan een factor 1,4 bedragen.

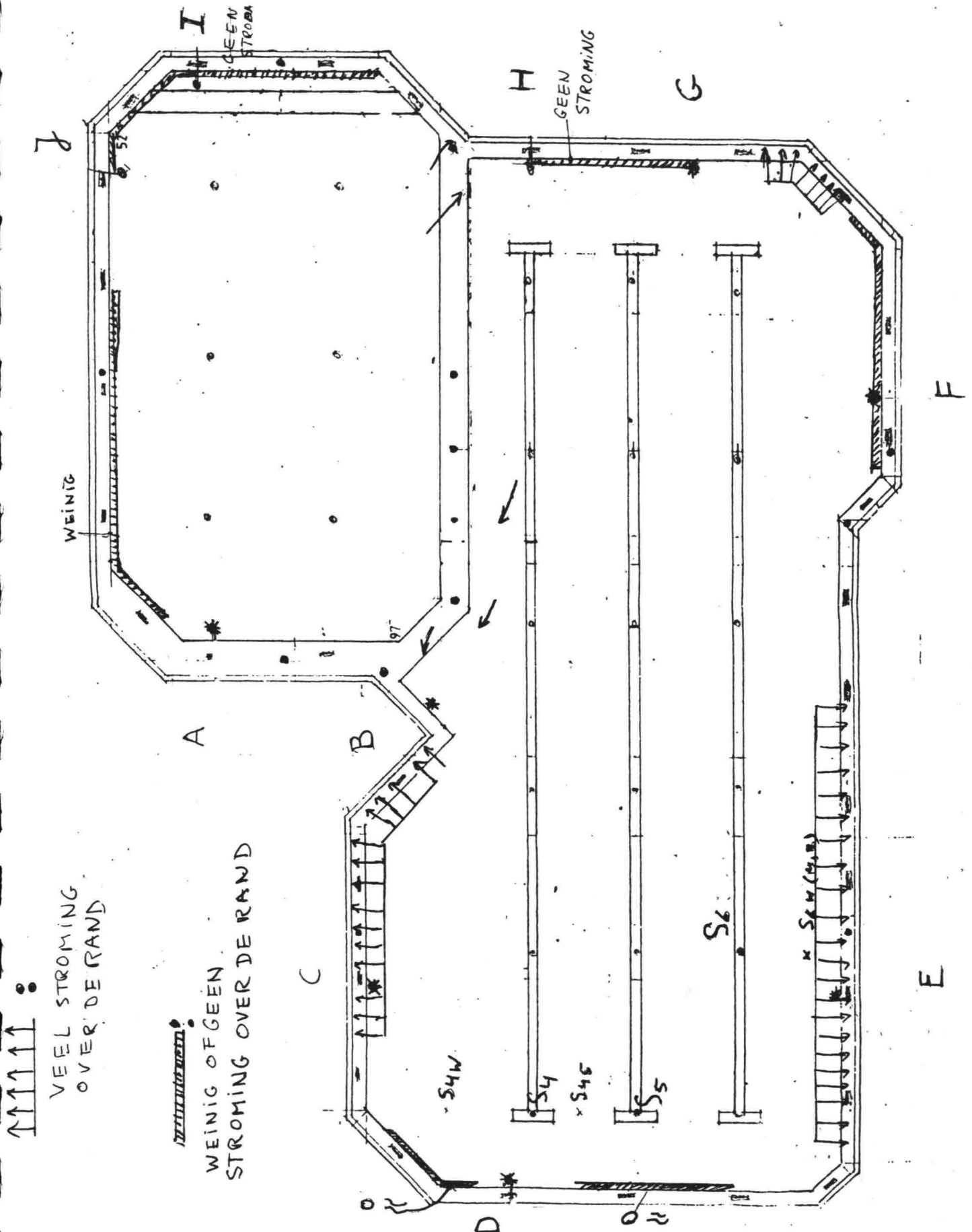


FIG. 30 OVERZICHT STROMINGEN

3.6 Meetresultaten en interpretaties.

In totaal is de lithiumgehalte bepaald voor 279 monsters, 6 hiervan (no. 274 t/m 279 in bijlage 2) zijn achteraf genomen ter bepaling van de volume van de onderzochte bassins. In bijlage 2 zijn de gemeten concentraties in iedere meetpunt gegeven voor de tijdstippen waarop bemonsterd is. In de grafieken van bijlage 3 zijn de concentraties uitgezet tegen de tijd naast de berekende waarden uit hoofdstuk 4.

* De eerste twee grafieken (pag. B10 en B11) tonen de gemeten concentraties als functie van de tijd in de afvoerszijde van het zwembad nl. bij de pomp, meetpunt P, en bij de TSA, meetpunt T (fig 27). Te zien is een lineaire toename van de concentratie in de tijd, de toename per tijdseenheid: $0,005 \text{ g/m}^3, \text{min}$; dit is gelijk aan Φ/V . Zoals in 3.3.3 is afgeleid is dit de responsie van een bak waarin volledige menging optreedt. Uit deze responsie mag echter niet geconcludeerd worden dat het voor elk gebied van het systeem geldt (no.12), zoals ook blijkt uit de verschillende grafieken voor de diverse meetpunten.

Er is een vertraging t.o.v. de dosering waar te nemen.

* Onderlinge vergelijking van de grafieken voor het bassin zelflevert in de eerste plaats op dat de tijdstip waarop de eerste tracerhoeveelheid de rand bereikt varieert van 0 tot 25 minuten (tabel 2).

Tabel 2 Tijdstip waarop de tracer de rand bereikt.

A	4 min.	F	0 min. +
B	10 min.	G	2 min.
C	25 min.	H	1 min.
D	0 min. +	I	0 min. +
E	5 min.	J	0 min. +

+ Op $t = 0$ is niet gemeten, de waarde volgt uit de grafiek.

* Op de plaatsen D, F en J valt in het begin over een bepaalde periode een constante concentratie groter dan 0 waar te nemen (bijlage 3, pag. B15, B18, B23). De oorzaak kan kortsluitstroming zijn (...).

De grootte van de beginconcentratie is dan een maat voor de grootte van de fractie van de kortsluitstroom; bij een gemeten concentratie $\alpha * \Phi/Q$ is het debiet van de kortsluitstroming gelijk aan $\alpha * \text{het totale debiet op die plaats}$.

* Een periodieke af- en toename van de stijging is te zien in sommige grafieken (A, F, I), oorzaak van een golvende responsielijn moet gezocht worden bij interne recirculatie (no.11) (zie §1.2).

* Opvallend zijn de grote afwijkingen bij bepaalde punten bv. C en J t.o.v. de resultaten in de afvoerleiding P en T (tabel 3).

Tabel 3 Concentraties [g/m^3] na 110 min. doseren.

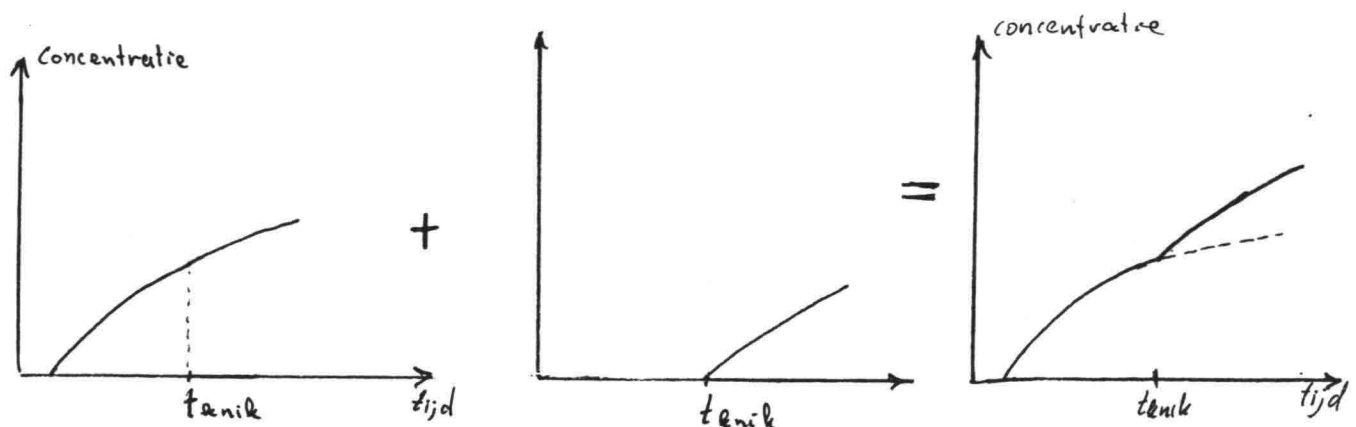
		T		0,45		P		0,49			
A	0,84	B	0,68	C	0,31	D	0,41	E	0,47	Eg	0,42
F	0,59	G	0,68	Gg	0,65	H	0,70	I	0,90	J	0,94
S4b	0,42	S4wb	0,36	S4wm	0,32	S45m	0,43	S45o	0,50		

Meestal wordt de kwaliteit geregeld op grond van de gemeten kwaliteit in de afvoerleiding (voor vrij chloor is de ondergrens $0,5 \text{ g}/\text{m}^3$). De gemeten concentraties zijn dan ook te vergelijken met de chloorconcentraties die tijdens het gebruik zouden zijn te vinden. Door beweging van de zwemmers vindt weliswaar afvlakking van de verschillen plaats, maar een groot aantal uren in een etmaal draait de zuiveringsinstallatie door zonder dat het zwembassin gebruikt wordt. Over het algemeen zullen daarom de ondiepe delen, met name het peuterbad te hoge chloorconcentraties tonen. (Uit navraag bij het personeel blijkt dat dit inderdaad het geval is), terwijl in bepaalde delen van het diepe bad een tekort aan vrij chloor heerst.

* De monsters die genomen zijn uit het instromende water bij de bodeminlaten, S4B en S6B, tonen geen bevredigende resultaten (bijlage 3, B24 en B29). De concentraties zijn te laag en te onregelmatig; kennelijk was het instrument waarmee op afstand monsters zijn genomen niet geschikt genoeg om concentraties te meten in de binnentredende stralen. De monsters van de verschillende stralen zijn door verschillende personen genomen; de werkwijze kan ook van invloed geweest zijn op de afwijkingen. Zo toont de grafiek voor S6b een groot verschil t.o.v. zijn omgeving, wat ook de verwachting is (zie § 1.2), in tegenstelling van de grafiek voor S4, waar een andere persoon de monsters nam. In het algemeen zijn wel hogere concentraties waar te nemen in of nabij het traject van de injectiepunten, bijv. S4B en S450 t.o.v. D of S6B, S6M en S60 t.ov. E (grafieken bijl. 3).

* Sommige grafieken vertonen een knik, bij C is duidelijk een steiler worden van de toename waar te nemen bij $t = 80 \text{ min}$. De oorzaak hiervoor kunnen stromingen zijn die water uit ondiepere gedeeltes van het bassin aanvoeren, zodat na een bepaalde periode een nieuwe tracerstroom de rand bereikt (fig.31). Hierbij speelt een rol dat de rand van het bassin niet oeral horizontaal is, zodat de afstroming plaatsafhankelijk is.

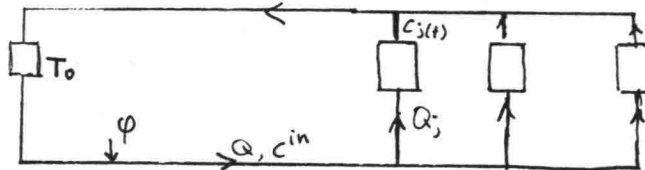
Fig. 31 mogelijke verklaring voor de knik in grafiek van C.



BEREKENINGEN MET HET MODEL

4.1 Bepaling impulsresponsiefunctie uit de metingen m.b.v. het model.

In deze paragraaf is getracht om uit de metingen de impulsresponsiefuncties $E_j(t)$ af te leiden voor een aantal meetpunten (zie 2.3 en 2.4). Blijken zal dat de metingen tekortschieten voor een volledige beschrijving van de functies en voor het afleiden van de gemiddelde verblijftijden.



De uitgangspunten in het model zijn (herhaling § 3.2):

$$c^{in}(t) = c(t) + \phi/Q \quad (\text{vgl. 2}) \quad [\text{g/m}^3]$$

$c(t)$ is gemeten bij meetpunt T:

$$c(t) = a(t-T_0), \quad (a = 0,005 \text{ g/m}^3/\text{min en } T_0 = 20 \text{ min.}) \quad (\text{vgl. 3})$$

De concentratie bij de afvoer van een meetpunt j , $c_j(t)$ is gelijk aan de convolutie van de in dat element ingevoerde signaal, c^{in} , en de impulsresponsiefunctie voor dat element:

$$c_j(t) = \int_0^t c^{in}(t-\tau) E_j(\tau) d\tau \quad (\text{vgl. 1})$$

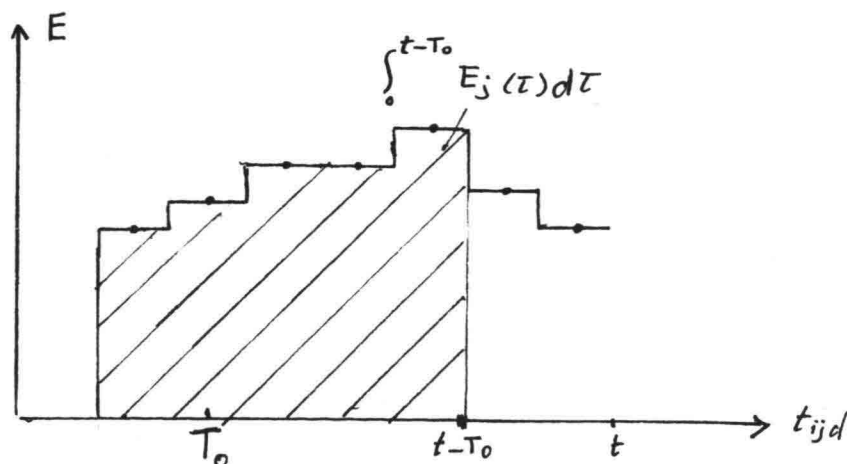
Uit vgl. 1 en 2 volgt:

$$c_j(t) = \int_0^t \{\phi/Q + c(t-\tau)\} E_j(\tau) d\tau$$

Uit de gemeten waarden voor $c_j(t_i)$ worden de waarden $E_j(t_i)$ verkregen door berekening van de integraal over kleine tijdstappen m.b.v. de trapeziumregel. De volgende vergelijking ontstaat (voor de afleiding ervan zie bijlage 4):

$$E_j(t+\Delta t) = 2Q/\phi \{ [c_j(t+\Delta t) - c_j(t)] / t - a \int_0^{t-T_0} E_j(\tau) d\tau \} - E_j(t)$$

$\int_0^{t-T_0} E_j(\tau) d\tau$ wordt benaderd door de gediscretiseerde oppervlaktes onder de reeds gevonden E waarden, bijv.:



Gekozen is voor een tijdstap t van 2 minuten; grote tijdstappen bleken zeer grote schommelingen in de resultaten te veroorzaken. De keuze van een zo kleine tijdstap betekent wel dat waarden tussen de meettijdstippen m.b.v. interpolatie moeten worden bepaald. De gevonden functies E_A en E_F in meetpunten A en F zijn te zien in fig.35 en 36.

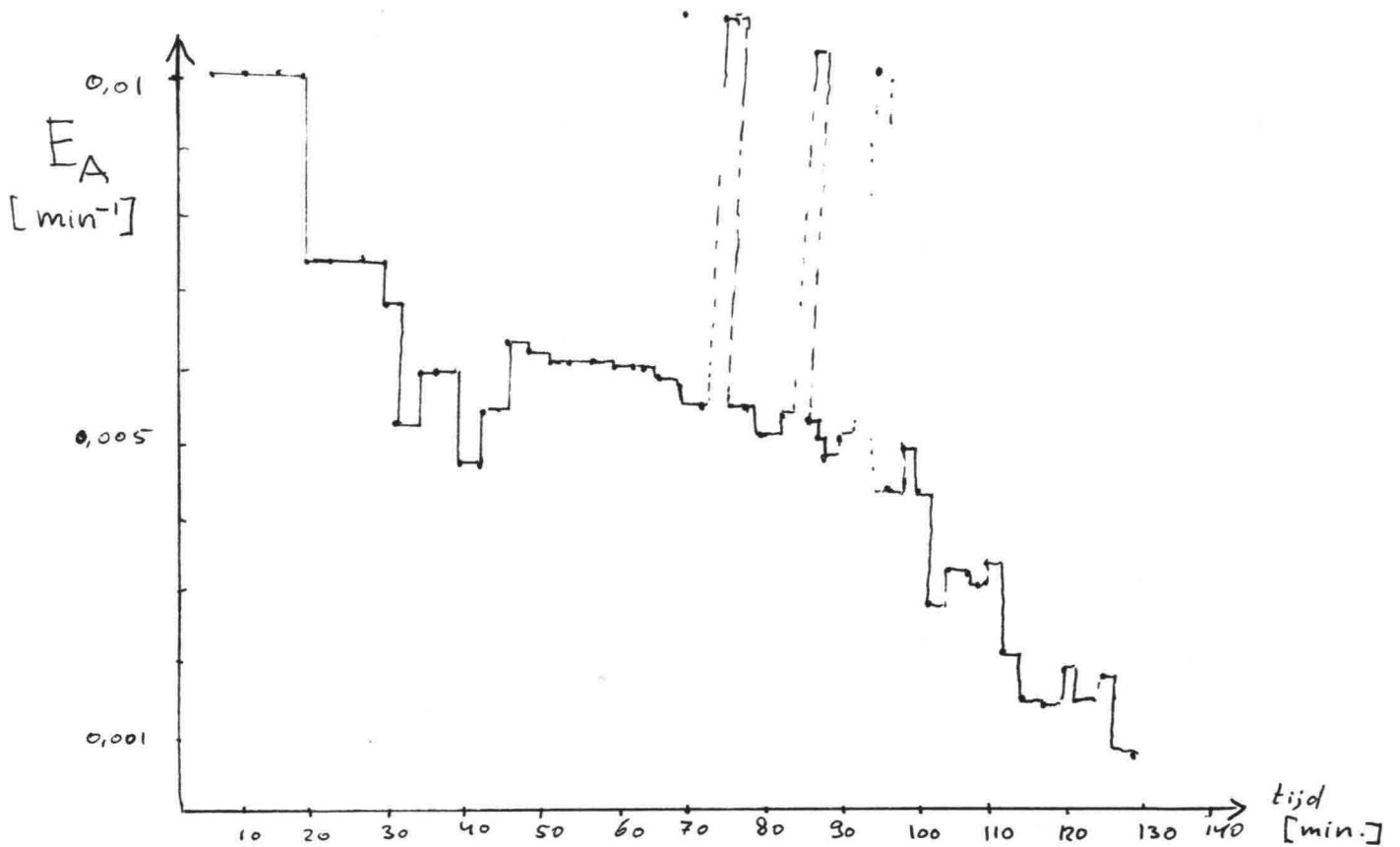
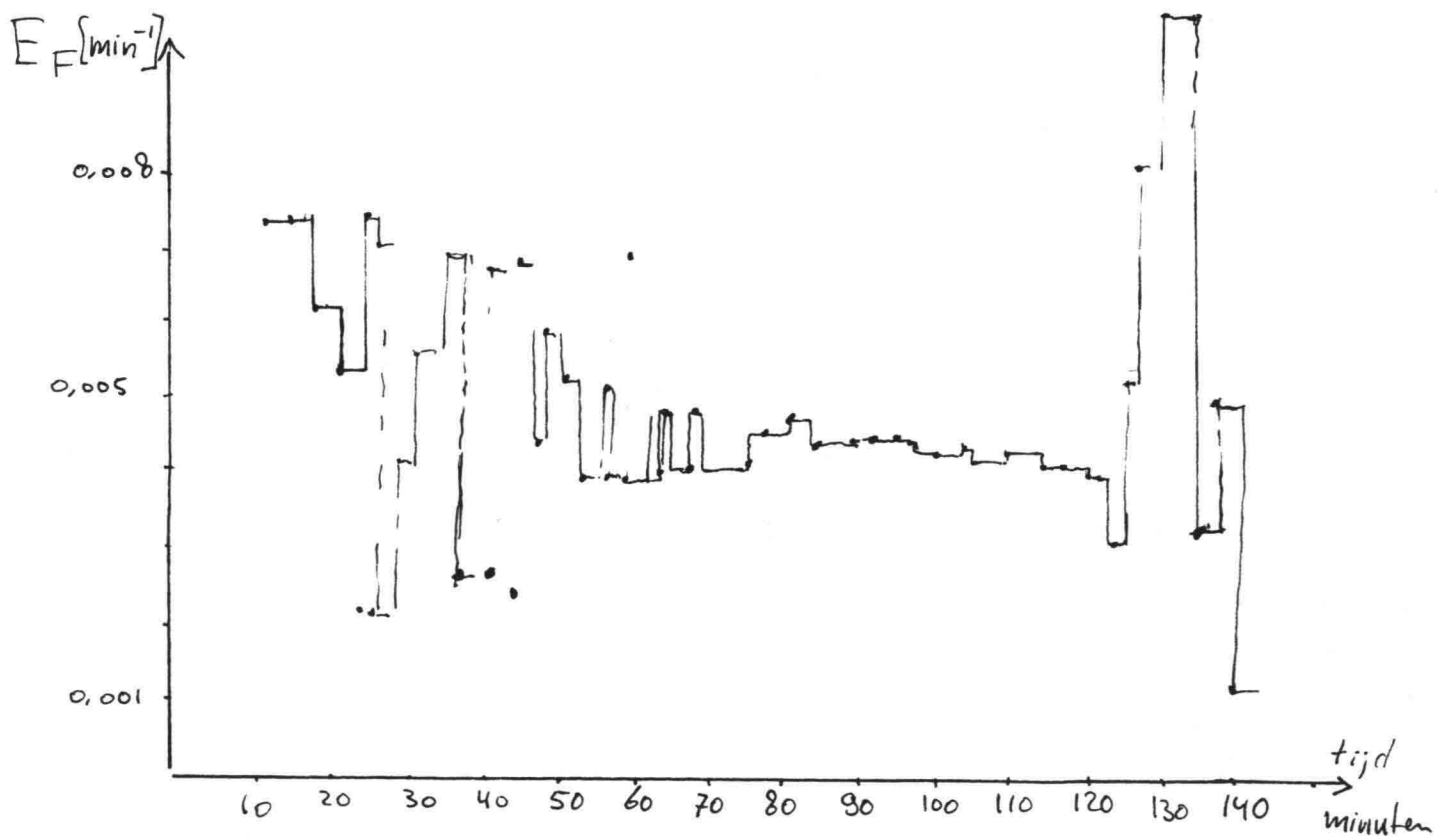


FIG.35 E functie voor A, uit de meetresultaten



Om de onregelmatigheid weg te nemen is de glijdend gemiddelde bepaald over series van 5 tijdstappen. Het resultaat is te zien in de fig. 37 en 38. Het op en neer gaan van de grafiek wijst op interne recirculatie, wat overeenkomt met de verwachte stroming t.g.v. de stralen (§ 1.2) (fig. 39).

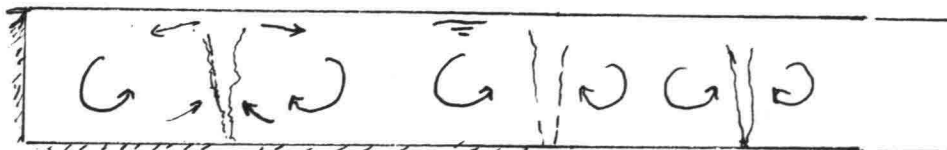


Fig. 39 stromingspatroon

De methode is niet toegepast voor alle meetpunten, omdat de resultaten niet voldoende relevante informatie verschaffen.

- Uit de figuren 37 en 38 blijkt nl. dat langer gemeten had moeten zijn om het gehele verloop van de E curves te leren kennen, met name voor meetpunt F is dit duidelijk te zien. Ook voor meetpunt A is het niet zeker of de functie na de gemeten periode van 140 min. werkelijk nul is geworden of dat er nog een stijging zal optreden. Duidelijk is dat hierdoor de voornaamste informatie, nl. de gemiddelde verblijftijd en de variantie, niet af te leiden zijn.

Er zal daarom overgegaan worden tot een aanname voor de E-functies, die gebaseerd is op een volledig gemeng systeem dat in serie geschakeld is met een propstroomsysteem (zie § 4.2). Dit systeem heeft als E functie een verschoven negatieve e-macht. Uit fig. 37 en 38 blijkt immers een plotselinge stijging en een afname zoals een negatief exponentiele functie. Ook de overige grafieken van de meetresultaten (bijlage 3) wijzen in het begin op een dergelijke functie. Met de aangenomen functies kunnen de concentraties op verschillende tijdstippen berekend worden en met de gemeten waarden vergeleken worden (§ 4.2).

Voor het meetpunt A zal naast de exponentiele functie ter vergelijking nog een blokvormige functie gebruikt worden om het concentratieverloop te bepalen, dit vanwege de vorm van de uit de metingen bepaalde E functie (fig. 37).

Voor meetpunt A is wel uit de grafiek voor de E-functie (fig. 37) de verblijftijd en de spreiding berekend, aannemend dat de curve eindigt bij $t = 130$ min. en dat bij $t = 130$ min. $E(t)$ gelijk is aan 0.

$$t_{gem} = \sum t_i E_i / \sum E_i = 19,05/0,34 = 56 \text{ min.}$$

$$\text{variantie} = \sum t_i^2 E_i / \sum E_i - t_{gem}^2 = 1345,82/0,3431 - 56^2 = 794,26 \text{ min}^2$$

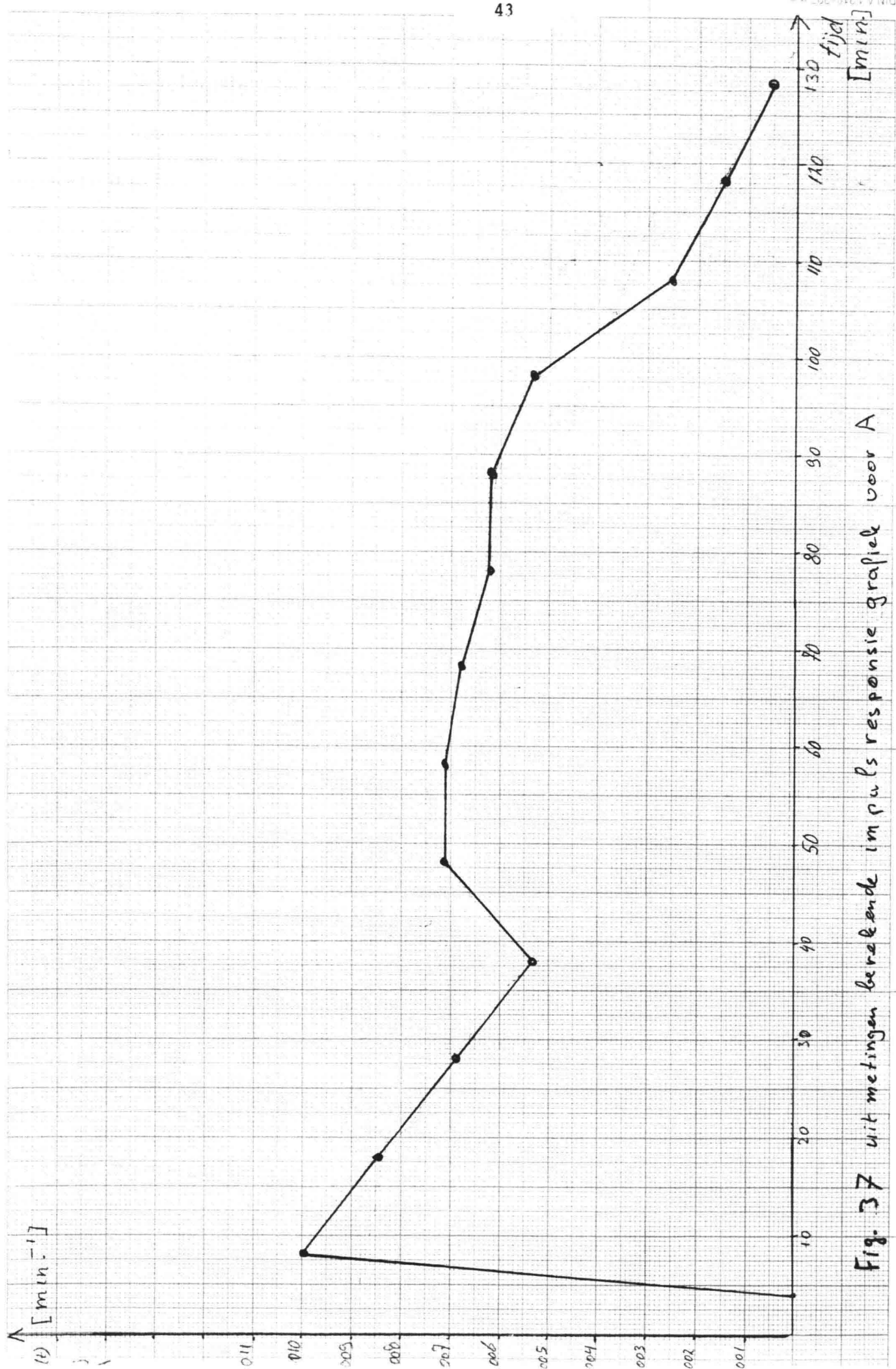


Fig. 37 uit metingen berekende impuls responsie grafiek voor A

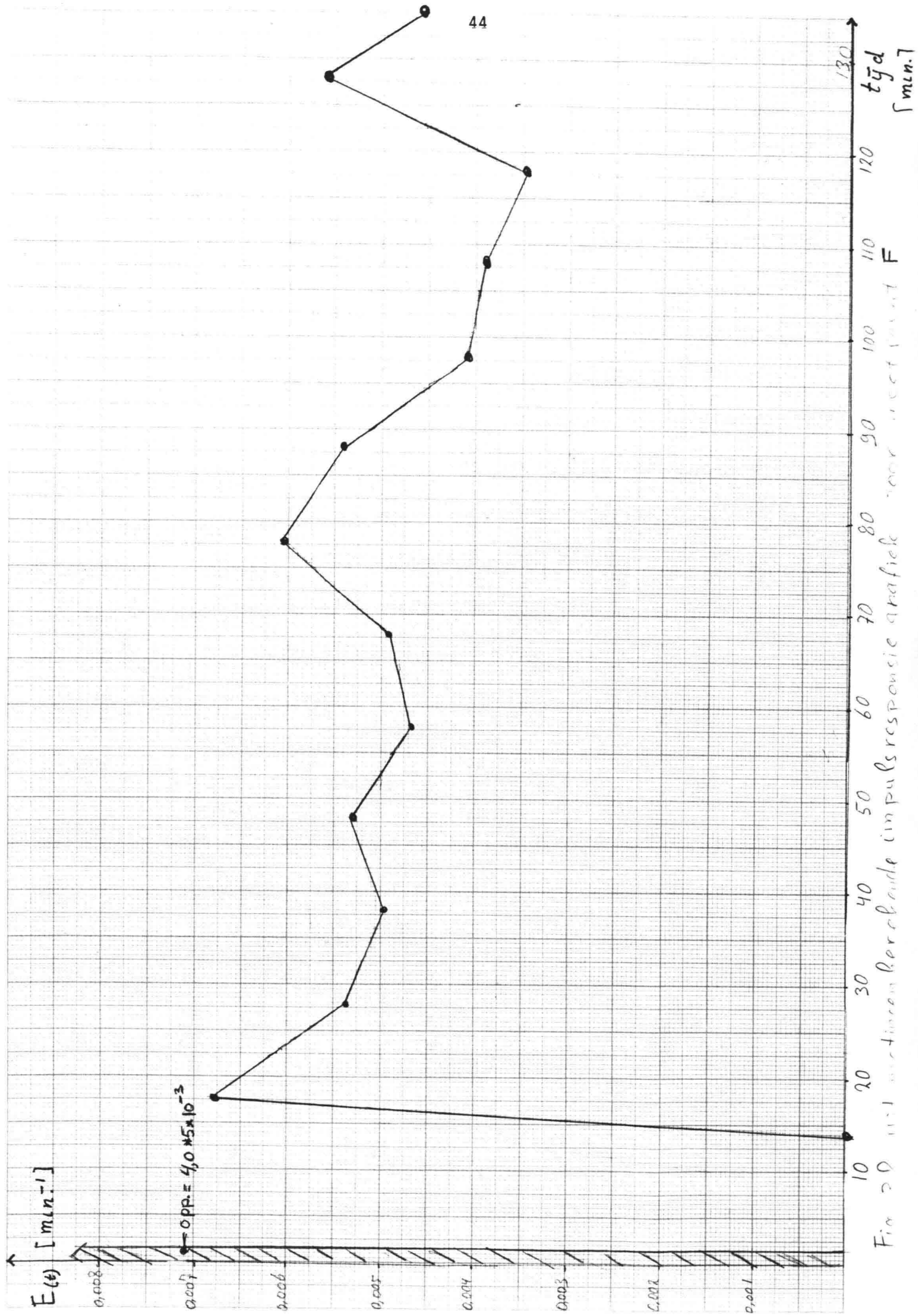
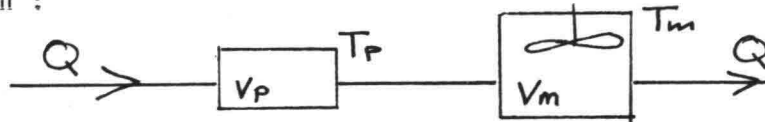


Fig 20 Impulsoverlappende impulsresponsie grafiek voor meetpunt F

4.2 Berekening concentratieverloop uit het model.

4.2.1 Uitgangspunten.

De berekeningen zijn gebaseerd op de theorie voor signaalanalyse en verblijftijdsverdeling, te vinden in § 2.3 . Het model, waarin het zwembad werd opgedeeld in compartimenten, die bij de meetpunten A t/m J horen (§ 2.4), zal nu aangevuld worden met een aanname voor de stroming binnen het compartiment. De stroming door ieder element wordt voorgesteld als een combinatie van ideale propstroming en ideale mengstroming, die elkaar opvolgen :



Theoretische verblijftijd in gedeelte met propstroming $T_p = V_p/Q$,
 Theoretische verblijftijd in gemengde gedeelte $T_m = V_m/Q$

fig. 40 schema voor de stroming door ieder compartiment.

Deze aanname voor de stroming is gekozen omdat, zoals in 1.1 is vermeld de volledige prop- en mengstroming de belangrijke uitersten zijn waartussen de werkelijkheid zich bevindt, en omdat de verwachte internerecirculatie menging van het water rond de inlaatstralen veroorzaakt. Tevens is de genormaliseerde impulsresponsiefunctie, $E(t)$, voor een dergelijk element eenvoudig in een formulevorm weer te geven die goed overeenkomt met die uit de meetresultaten (§ 4.1).

De formule voor een gemengd bekken met gemiddeldeverblijftijd T_m is nl. :

$$E(t) = 1/T_m \exp[-t/T_m]$$

Het effect van het gedeelte met propstroming is slechts een vertraging T_p t.o.v. de tijdstip van de impuls. Voor de combinatie geldt dan :

$$\begin{aligned} E(t) &= 0 & (0 < t < T_p) \\ E(t) &= 1/T_m \exp[-(1/T_m) (t-T_p)] & (t > T_p) \end{aligned}$$

De grafiek van de functie is :

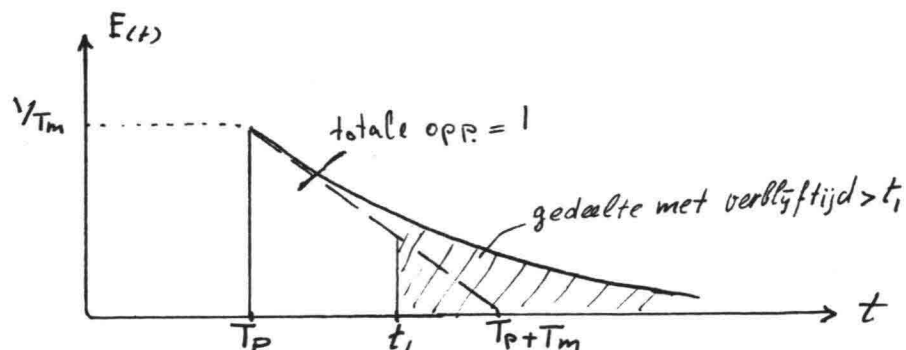
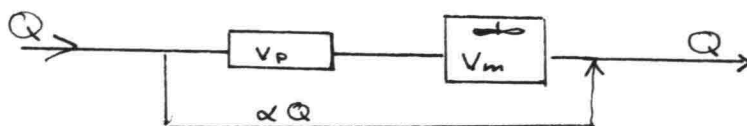
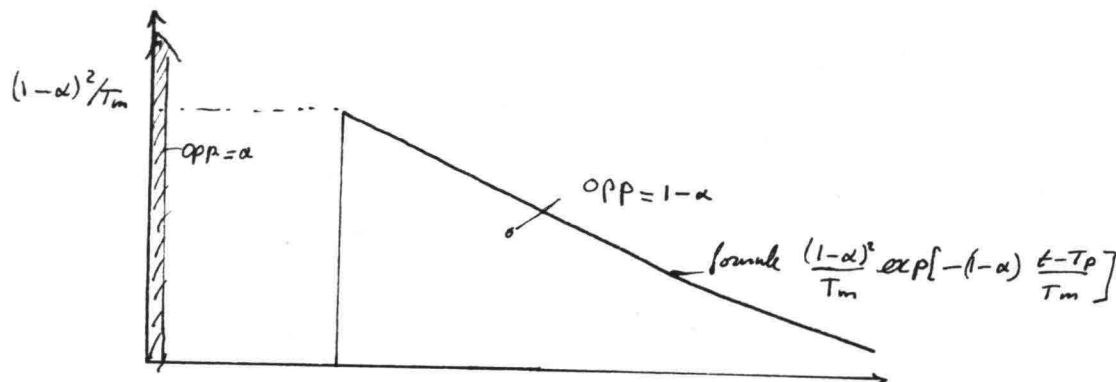


Fig. 41 gemodelleerde impulsresponsiefunctie van een element.

In de interpretatie van de meetresultaten (§ 3.6) is gewezen op kortsluitstroming bij bepaalde meetpunten, omdat de concentratie meteen na aanvang van de dosering groter dan 0 was. Dit is in de schema voor te stellen als (no. 11):



de bijbehorende E-functie is af te beelden als:



Dezelfde formule voor $E(t)$ kan worden toegepast als in plaats van T_m , T_m^* gebruikt wordt die de afwijking voor de kortsluiting weergeeft: $1 - \alpha / T_m = 1 / T_m^*$

De invloed van de interne recirculatie, die de oscillatie in de meetgrafieken (bijl.3) en in de E-functies berekend uit de meetresultaten (fig.37 en 38) veroorzaakt, zal hier ter vereenvoudiging van de berekeningen buiten beschouwing worden gelaten. Deze zouden afzonderlijk bestudeerd moeten worden met behulp van een soortgelijke modellering (no.12).

4.2.2 Afleiding formules voor berekening van de concentratietoestand en voor de relatie tussen concentratie en verblijftijd.

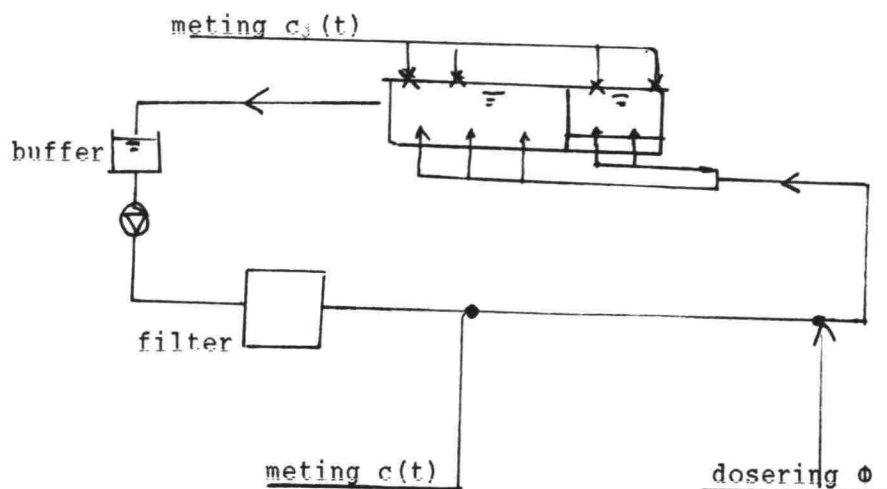


fig. 42 schema proefopstelling.

De situatie tijdens de proef (schema, fig.42), is voor het model weergegeven in fig. 43.

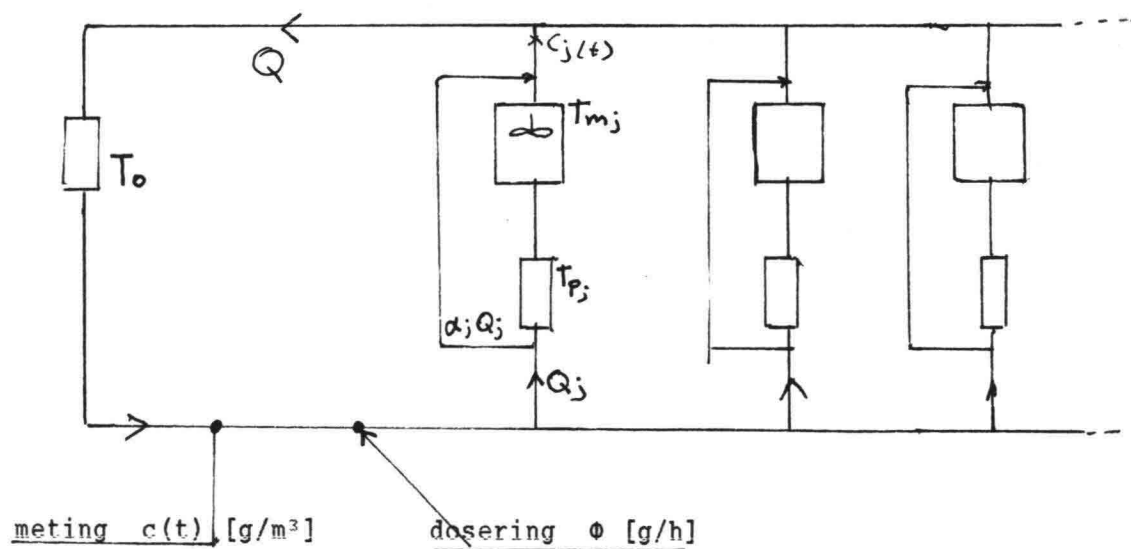


fig. 43 situatie tijdens proef in model.

De concentratie in het water bij de afvoer van een element j , $c_j(t)$, is gelijk aan de convolutie van de instromende concentratie

en de responsie op een elementaire instroming, dus de impulsresponsie voor dat compartiment (§ 3.1), voor de volledigheid herhaald:

$$c_j(t) = \int_0^t c_{in,j}(t-\tau) E_j(\tau) d\tau \quad (\text{vgl. 1})$$

De concentratie die het element ingaat, $c_{in,j}(t)$, is te berekenen uit de meting van $c(t)$ en de bekende dosering Φ :

$$c_{in,j}(t) = c(t) + \Phi/Q \quad (\text{vgl. 2})$$

Voor de functie $E_j(t)$ was gevonden (fig. 41):

$$E_j(t) = 1/T_{mj} \exp[(-1/T_{mj})(t - T_{pj})] \quad (\text{vgl. 4}) \quad t > T_{pj}$$

Gemeten is voor $c(t)$:

$$\begin{aligned} c(t) &= 0, \quad t \leq T_0 \\ c(t) &= a(t - T_0), \quad t \geq T_0 \\ a &= 0,005 \text{ en } T_0 = 20 \text{ min.} \end{aligned} \quad (\text{vgl. 3})$$

Uit (1), (2), (3) en (4) volgt (zie ook fig. 44 en 45):

a) $t \leq T_{pj}$

$$c_j(t) = 0$$

b) $T_{pj} \leq t \leq T_{pj} + T_0$

$$c_j(t) = \int_{T_{pj}}^t \Phi/Q (1/T_{mj}) \exp[(-1/T_{mj})(\tau - T_{pj})] d\tau$$

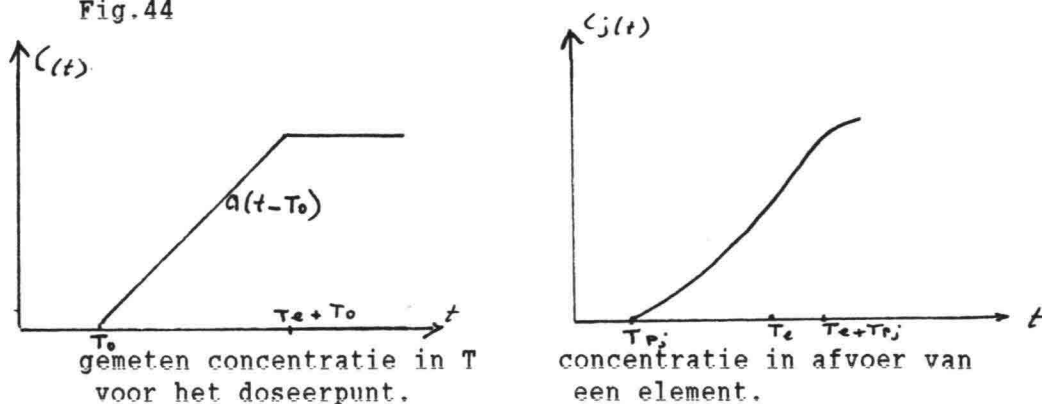
(x) voor $t \leq T_{pj}$ is $E(\tau) = 0$

c) $T_{pj} + T_0 \leq t \leq T_e + T_{pj}$

$$\begin{aligned} c_j(t) &= \int_{T_{pj}}^t \Phi/Q (1/T_{mj}) \exp[(-1/T_{mj})(\tau - T_{pj})] d\tau + \\ &+ a \int_{T_{pj}}^{t-T_0} (t - T_0 - \tau) (1/T_{mj}) \exp[(-1/T_{mj})(\tau - T_{pj})] d\tau \end{aligned}$$

* $E(\tau) = 0$ voor $\tau \leq T_{pj}$, $c(t-\tau) = 0$ voor $t-\tau \leq T_0$

Fig. 44



T_0 : vertragingstijd door filter en buffer [min.]
 T_e : einde dosering [min.]
 T_{pj}, T_{mj} : verblijftijden in een element j , zie fig [min.]

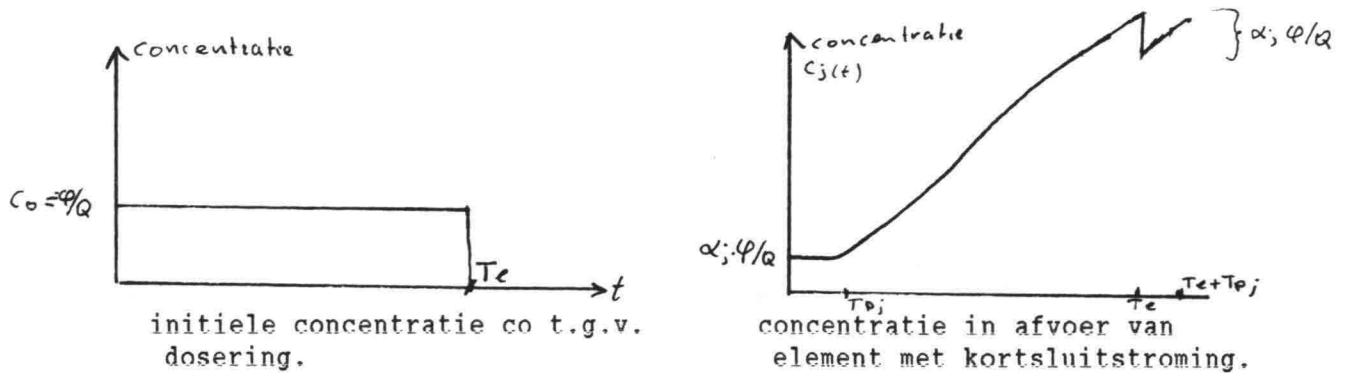


Fig. 45

ad b) $T_{pj} \leq t \leq T_{pj} + T_0$, uitwerking van de integraal geeft:

$$\begin{aligned}
 c_j(t) &= \phi/Q * 1/T_{mj} \int_{T_{pj}}^t \exp[-(1/T_{mj}) (\tau - T_{pj})] d\tau \\
 &= \phi/Q \{1 - \exp[(1/T_{mj}) (t - T_{pj})]\} \quad (\text{vgl. 5})
 \end{aligned}$$

ad c) $T_{pj} + T_0 \leq t \leq T_e + T_{pj}$, uitwerking van de integraal geeft:

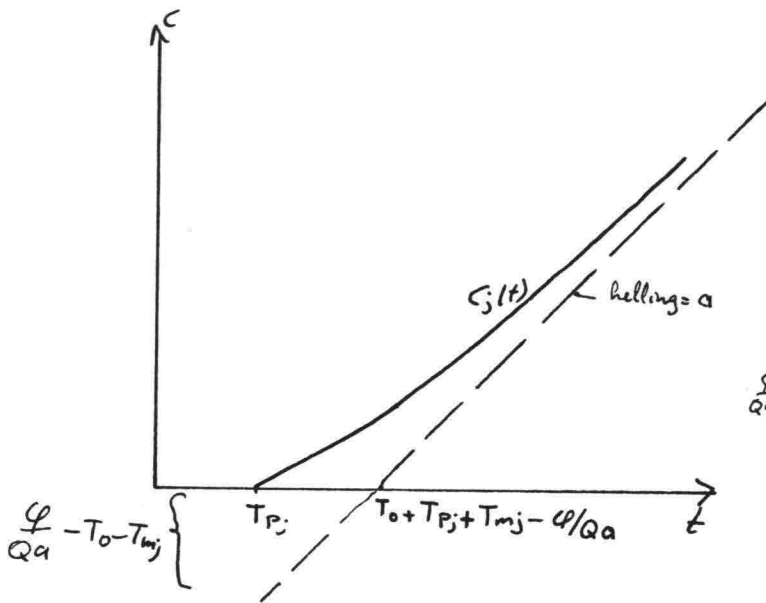
$$\begin{aligned}
 c_j(t) &= (\text{vgl. 5}) + a \int_{T_{pj}}^{t-T_0} (t - T_0 - \tau) 1/T_{mj} \exp[(1/T_{mj}) (\tau - T_{pj})] d\tau \\
 &= (\text{vgl. 5}) + a \{t + T_{mj} \exp[-1/T_{mj} (t - T_0 - T_{pj})] - T_0 - T_{pj} - T_{mj}\} \\
 &\quad (\text{voor de volledige uitwerking zie bijlage 5})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \phi/Q \{1 - \exp[(1/T_{mj}) (t - T_{pj})]\} + 0,005 \{t + T_{mj} \exp[-1/T_{mj} (t - T_0 - T_{pj})] - (T_0 + T_{pj} + T_{mj})\} \\
 &\quad (\text{vgl. 6})
 \end{aligned}$$

Voor $t \rightarrow \infty$ wordt vgl. 6 : $c_j(t) = \phi/Q + a \{t - T_0 - T_{pj} - T_{mj}\}$ (zie fig. 67)

Voor het verloop van $c_j(t)$ zijn twee verschillende vormen mogelijk afhankelijk van het feit of de verblijftijd T_{mj} , groter of kleiner dan $\phi/Qa - T_0 \approx 180$ min is (zie fig. 46). Dit verschijnsel is ook bij de gemeten krommen te vinden, vergelijk de kromme van I ($T_{mj} = 80$ min) met die van E ($T_{mj} = 216$ min). (bijlage 3).

a) $T_{mj} > \frac{\varphi}{Qa} - T_0 \text{ (} > 180 \text{ min.)}$



b) $T_{mj} < \frac{\varphi}{Qa} - T_0 \text{ (} < 180 \text{ min.)}$

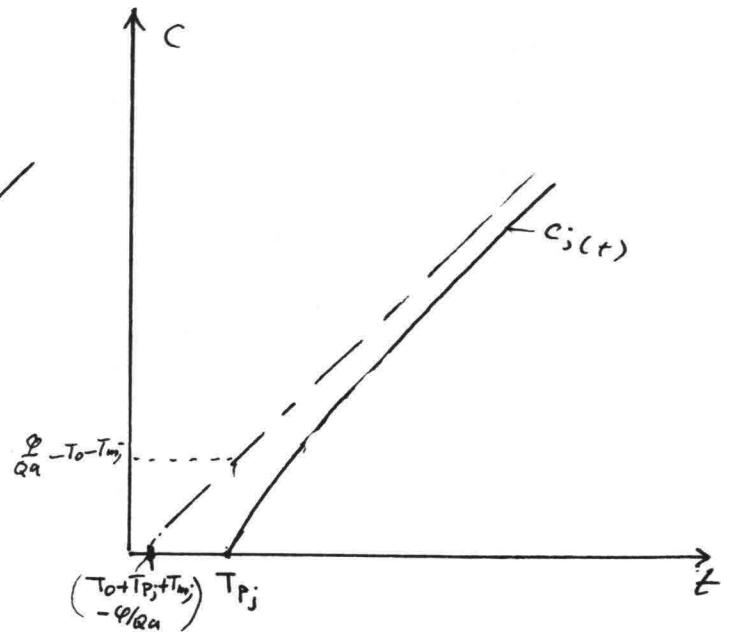


Fig. 46 Grafiekvorm $c_j(t)$

4.2.3 Bepaling parameters voor de berekening.

Voor het berekenen van de concentratie in de afvoer van ieder element als functie van de tijd, $c_3(t)$, zijn de volgende parameters nodig (zie vgl. 6):

$$\Phi, Q, a, T_0, T_{pj}, T_{mj}$$

Φ en Q zijn bekend uit het meetprogramma (§ 3.4):

$$\begin{aligned}\Phi &= 160,39 \text{ g/h} \\ Q &= 156,5 \text{ m}^3/\text{h} \\ \Phi/Q &= 1,02 \text{ g/m}^3\end{aligned}$$

a en T_0 zijn bepaald uit de meting van $c(t)$ (bijlage 3, pag. B10 meetpunt T) T_0 is de tijdstip waarop $c(t)$ begint te stijgen, a is de helling van de grafiek:

$$\begin{aligned}a &= 0,005 \text{ g/m}^3 \\ T_0 &= 20 \text{ min.}\end{aligned}$$

T_{pj} en T_{mj} zijn de kenmerkende parameters van een element, de startwaardes hiervoor zijn uit de meetresultaten (grafieken uit bijlage 3) verkregen:

T_{pj} is de tijdstip waarop de concentratie begint te stijgen.
 T_{mj} is bepaald m.b.v. de afgeleide van $c_3(t)$:

$$T_{mj} = \{\Phi/Q + c(t-T_{pj}) - c_3(t)\} / \{dc_3(t)/dt\}$$

(zie bijlage 6 voor de afleiding).

Voor alle meetpunten zijn zo T_{pj} en T_{mj} bepaald uit de meetresultaten, de uitkomsten staan vermeld in tabel 4. Voor T_{mj} is genomen het gemiddelde van een aantal berekeningen, verkregen uit meetwaardes op onderlinge afstand t :

$T_{mj} = \Delta t / \Delta c_3 \{ \Phi/Q + c(t-T_{pj}) - c_3(t) \}$ vgl. a), als voorbeeld is de berekening voor meetpunt G gegeven:

T_{mj} bepaling voor meetpunt G met vgl. a)

t [min]	$c_3(t)$ [g/m ³]	$t-T_{pj}$ [min]	$c(t-T_{pj})$ [g/m ³]	Δc_3 [g/m ³]	Δt [min]	T_{mj} [min]	
20	0,18	18	0	0,1	20	163	
40	0,28	38	0,09	0,12	20	133	
60	0,40	58	0,19	0,12	20	130	
80	0,32	78	0,29				
90	0,57	88	0,34	0,08	15	144	
105	0,65	103	0,415	0,08	15	143	$T_{mj} \text{ gem.} = 143 \text{ min}$
120	0,73	118	0,490				

Tabel 4 Eerste schatting voor de verblijftijden T_{pj} en T_{mj} .

plaats	T_{pj} [min]	T_{mj} gem. [min]	plaats	T_{pj} [min]	T_{mj} gem. [min]
A	4	113	H	1	130
B	10	132	I	5	80
C	25	300	J	5	80
D	30	164	S4wb(m)	14	295
E	5	216	S45m	5	228
Egoot	4	215	S45o	15	228
F	15	184	S6wb(m)	10	192
G	2	143	S6m	13	176
Ggoot	2	160			

In tabel 4 is te zien dat ook voor metingen die niet bij de rand zijn uitgevoerd, de waarden zijn gegeven. Dit houdt in dat de concentraties c_j voor deze meetplaatsen gelijk moeten zijn aan die in de bijbehorende elementafvoer. Voor volledige menging is dit inderdaad geoorloofd, maar voor metingen in de straal van de injectiepunten geldt dit niet. Alleen voor S6m is wel een berekening uitgevoerd omdat de grafiek hetzelfde resultaat toonde als die in zijn omgeving, vermoedelijk is de monstername niet uit de straal geweest maar ernaast.

4.3 Resultaten van de berekening.

Met behulp van de gevonden parameters T_{pj} en T_{mj} uit tabel 4 kunnen de concentraties als functie van de tijd voor ieder meetpunt berekend worden met vgl. 5 en 6 (tot $t = T_{pj}$ min. na einde van de dosering i.e. 131 min.).

Bij berekening blijkt dat verbetering van de waardes T_{pj} en T_{mj} uit tabel 4 mogelijk is. Voor het vinden van de best passende waarde voor T_{mj} en T_{pj} zou een parameterschatting uitgevoerd moeten worden, bijvoorbeeld volgens de methode van de kleinste kwadraten.

Echter in dit geval is een nauwkeurigheid van enkele tientallen minuten voor de verblijftijden voldoende geacht, zodat volstaan kan worden met een globale optimalisering van de parameters door trial and error. Over het algemeen ging de voorkeur uit naar optimalisering van het begintraject van de curven omdat stromingen die niet door het model beschreven worden, zoals onderling tussen de elementen en over de wand tussen het ondiepe - en diepe bad, dan nog de minste invloed hebben. In de grafiek voor C is bijv. een duidelijke knik te zien bij $t = 80$ min die waarschijnlijk een dergelijke oorzaak heeft (zie ook meetresultaten en interpretaties § 3.6).

De geoptimaliseerde T_{mj} waardes voor de punten A t/m J, waarvoor de $c_j(t)$ is berekend, staan in tabel 5. T_{pj} is in alle gevallen gelijk aan die in tabel 4.

In de grafieken van bijlage 3 zijn de resultaten per meetpunt weergegeven naast de gemeten resultaten.

Opmerkingen over de resultaten :

* Het model is eigenlijk niet voor B toe te passen aangezien de invloed van stromingen uit andere compartimenten te groot is.

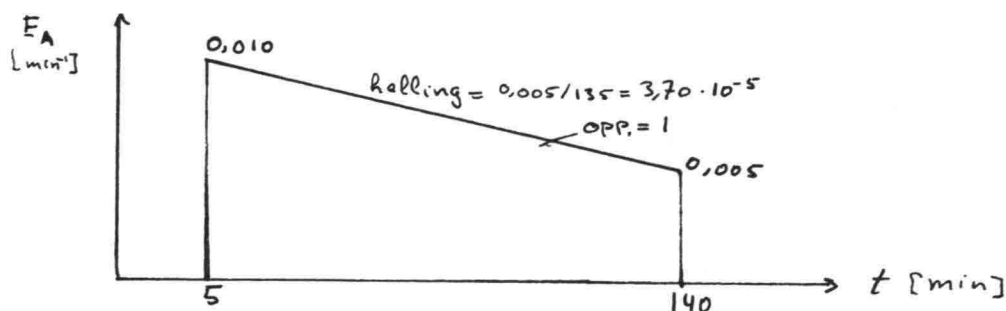
* In de grafiek voor A is tevens het concentratieverloop gegeven dat berekend is met een alternatieve E-functie gebaseerd op de meetresultaten (fig.37 § 4.1). In § 4.3.1 is de formule ervan afgeleid.

Tabel 5 geoptimaliseerde waarden voor de verblijftijd T_{mj} [min].

A	100	F	150
B	125	G	125
C	240 à 340	H	120
D	209	I	85
E	235	J	90
Egoot	215		

4.3.1 Berekening concentratieverloop in A met alternatieve impulsresponsie.

De Impulsresponsie die uit de metingen voor A is afgeleid in § 4.1 (fig.37) is geschematiseerd tot een blokvormige diagram:



$$E_A(t) = 1018,5 \cdot 10^{-5} - 3,70 \cdot 10^{-5} t \quad ; \quad 5 \leq t \leq 140$$

Toepassing van de convolutieintegraal op deze functie en de instromende concentratie, $\phi/Q + 0,005(t-T_0)$ geeft de concentratie in het afvoer van A als functie van de tijd:

a) $t \leq 5 \text{ min}$

$$c_A = 0$$

b) $5 \leq t \leq 25$

$$c_A = \int_5^t \phi/Q E(\tau) d\tau = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot \int_5^t (1018,5 - 3,70\tau) d\tau$$

$$10^{-5} \cdot [-1,85 t^2 + 1018,5 t - 5046,25] \quad (\text{vgl. 7})$$

c) $25 \leq t \leq 140$

$$c_A = \int_5^t [\phi/Q + c(t-\tau)] E(\tau) d\tau =$$

$$\text{vgl. 7} + \int_5^{t-20} 0,005(t-20-\tau) E(\tau) d\tau =$$

$$10^{-5} \cdot [-0,003 t^3 + 0,881 t^2 + 887,719 t - 3566,353] \quad (\text{vgl. 8})$$

De resultaten van de berekeningen zijn te vinden in de grafiek A van bijlage 3. Zoals te zien is in de grafiek is door de vorm van de grafiek (rechte) het resultaat moeilijker in overeenstemming te brengen met de gemeten curve dan met de eerder besproken functie.

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.

5.1 Conclusies.

1) Voor vergelijking van de resultaten uit de berekeningen met het model met die van de bemonstering zijn beide concentratieverlopen uitgezet in de grafieken van bijlage 3. Tezien is dat de mate van overeenkomst tussen meting en berekening voor ieder meetpunt verschillend is en dat er daarom per meetpunt beoordeeld zou moeten worden. Al eerder is vermeld dat een groter gewicht toegekend wordt aan overeenkomst tijdens het begin van de curve. Hiermee rekening houdend is de overeenkomst bij de diverse meetpunten als volgt in 3 klassen te verdelen :

zeer goed	goed	matig
F	A	D
Egoot	E	Ggoot
I	G	
J	H	
	C	

De uitkomsten van C komen aanvankelijk goed overeen maar in de meetresultaten is een knik te zien, wat verklaard kon worden door stroming vanuit andere gebieden (§ 3.6 bespreking meetresultaten).

De overeenkomst van de meetresultaten met de alternatieve impulsresponsie voor A is onvoldoende, verbetering door parameteraanpassing heeft weinig effect omdat de vorm van de grafiek niet voldoet. Over het algemeen mag geconcludeerd worden dat de resultaten uit het model redelijk tot goed overeenkomen met de meetresultaten. Dit is deels te danken aan het feit dat modelparameters aan de metingen zijn ontleend.

2) Diverse aannames die als uitgangspunten dienden voor het model lijken door de metingen bevestigd te worden:

- De verwachting dat er interne recirculatie optreedt binnen het zwembad als gevolg van het stromingspatroon, lijkt bevestigd te worden door de periodieke componenten in de gemeten uitgangssignalen, te zien bij F, A en E (bijlage 3) en de uit de metingen afgeleide impulsresponsiefuncties (fig. 37 en 38).
- De aanname dat er een aanzienlijke menging plaatsvindt t.g.v.

de overheersing van interne recirculatie (eerste tracer wordt na 5 minuten verwacht, terwijl $T = 204$ minuten) is terug te vinden in de vorm van de gemeten grafieken en in fig. 37 en 38 van de uit de metingen afgeleide functies.

- De aanname van opdeling van het zwembad in elementen met verschillende concentraties t.g.v. verschillende functies is terug te vinden in geleidelijk met de plaats (voornamelijk diepte) veranderende concentratieverlopen.

3) Uit de redelijke overeenkomst tussen meting en berekening en uit de bevestigingen van de verwachtingen waarop het model gebaseerd was, door de meetresultaten, volgt dat voor de gebieden rond de meetpunten de schematisatie van het model geldt en dat de verblijftijden en verblijftijdsspreidingen van die gebieden bij benadering overeenkomen met die waarden die met het model bepaald zijn. De spreidingen van de verblijftijden lijken op die van een volledig gemengd bekken, zij het dat een vertraging optreedt. De verdelingsfunctie hiervan is een verschoven negatieve e-macht (fig.41).

4) In figuur 48 is de som van T_{mj} en T_{pj} , gedefinieerd als de gemiddelde verblijftijd t_{gem} , voor alle bemonsterde plaatsen weergegeven. De waarden zijn afkomstig uit § 4.2.3. In de figuur zijn tevens vermeld de theoretische omlooptijd V/Q voor het gehele zwembad en de maximale waarden voor de gemiddelde verblijftijd volgens de voorschriften uit de WHVZ. Uit de figuur valt op dat:

- er veel onderlinge verschillen zijn, dus de ruimtelijke verdeling van de verblijftijden is vrij inhomogeen, wat ongunstig is voor de procesbeheersing.
- de gemiddelde verblijftijd op sommige plaatsen hoger is dan de maximum voorgeschreven verblijftijd, terwijl over het geheel de omlooptijd van het zwembad wel aan de eisen voldoet.

5) Er is een correlatie waar te nemen tussen diepte en verblijftijd (fig. 47), bij grotere dieptes zijn de verblijftijden groter. Dit is te verklaren door de grotere volume en kleinere debieten aan de diepe zijde van het bad; de inlaten aan de diepe kant zijn nl. het verst van de pomp verwijderd. een toename van de verblijftijd met de diepte is wel in overeenstemming met de eisen (zie fig. 48), de ondiepere plaatsen worden immers naar verhouding meer verontreinigd en behoren daarom sneller doorstroomd te worden, maar gezamenlijke zuivering van inhomogeen water bemoeilijkt de beheersing van het zuiveringsproces.

6) Uit de resultaten van de debietmetingen, weergegeven in figuur 30, kan geconcludeerd worden dat de afvoer over de rand varieert met de plaats. Vergelijken van figuur 30 en 47 toont dat uit een goede afstroming niet noodzakelijkerwijs een korte verblijftijd volgt (meetpunt C).

7) Uit de meetresultaten kan nog geconcludeerd worden dat op bepaalde plaatsen kortsluitstromingen optreden. Dit volgt uit een concentratiesprong direct na $t = 0$ (§ 3.6 en 4.2), die duidelijk te zien is bij F, I en D (zie pag B15, B18, B22).

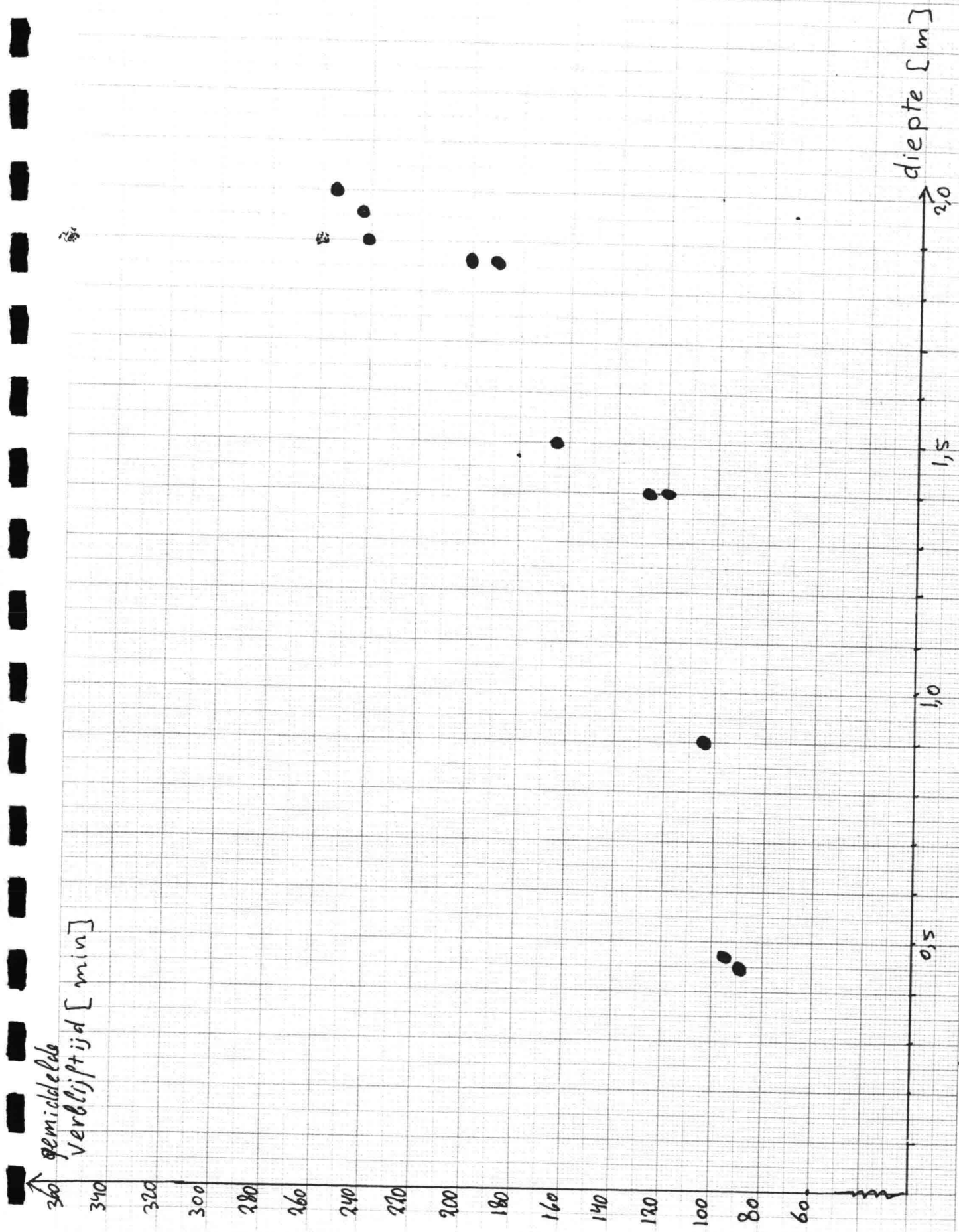


Fig. 47 RELATIE DIEPTE VERBLIJFTIJD

$$\bar{T} = \frac{V_{tot}}{Q} \approx 3 \text{ uur} = 180 \text{ min}$$

diepte:	T_{max} :
0,3 - 1,1 m	120 min.
1,4 - 2,0 m	240 min.

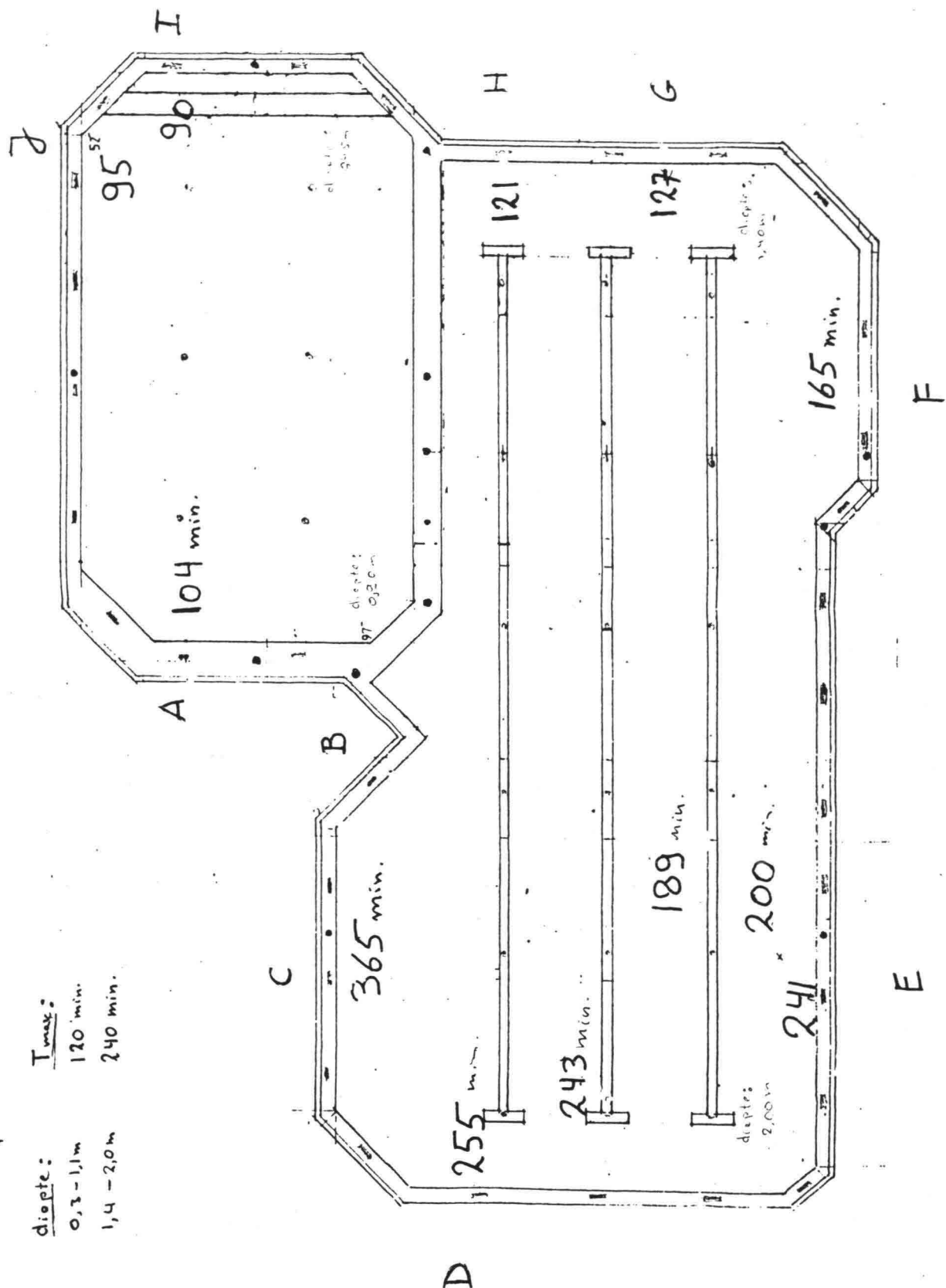


Fig. 48 Ruimtelijke verdeling van de verblijftijden, overzicht van de tgem., gedefinieerd als $T_{pj} + T_{mj}$.

6.2 Aanbevelingen.

* Verder onderzoek op dit gebied is aan te bevelen, met name door soortgelijke onderzoeken in zwembaden met andere stroomsystemen uit te voeren en zo de verdelingen van de verblijftijden met elkaar te vergelijken.

Om de ruimtelijke verschillen in doorstroming te bepalen kunnen ook veldsgewijs monsters genomen worden die op chloorgehalte onderzocht worden. De situatie waaronder de proef plaatsvindt, zoals aantal zwemmers en voor buitenbaden het weer, moet genoteerd worden om zoveel mogelijk de zwembaden onder gelijke omstandigheden te kunnen beoordelen.

Ook numerieke simulatie van het stromingspatroon m.b.v. de hydrodynamische vergelijkingen behoort tot de mogelijkheden om het onderzoek voort te zetten. De theoretische voorspelling hiermee zou vergeleken kunnen worden met de resultaten van de meting die hier uitgevoerd is. Verder zou het gebruik van schaalmodellen in het laboratorium van nut kunnen zijn voor het onderzoek.

* Ten aanzien van het ontwerp.

Uit de resultaten is af te leiden dat bij een verticaal doorstroomd zwembad een afstand van 2,5 m tussen de injectiepunten, onderling en tussen injectie en wand, nog voldoende klein is om 'dode zones' te voorkomen, 4 m is dat kennelijk niet, zie bijv. de resultaten van S6w en S45 in tegenstelling tot S4w (bijlage 3).

Rekening moet worden gehouden met het verband tussen aantal inlaatopeningen bij een vastgesteld debiet en de stroomsnelheid in de straal uit de inlaatopeningen. Men zou als uitgangspunt hiervoor kunnen nemen dat ten behoeve van de menging de snelheid minstens zo hoog moet zijn dat er turbulentie opgewekt wordt.

Het blijkt dat de concentratietoestand verschillend is per gebied van het zwembad, vooral de diepte is van invloed. De verschillen zijn deels het gevolg van het leidingennetwerk, een geweevormig netwerk is gunstiger voor gelijke stroming (vgl. fig. 19b met fig. 5). Een zwembad moet zoveel mogelijk opgedeeld zijn in afzonderlijke bekkens van gelijke diepte met een eigen circulatie- en zuiveringssysteem. Of er zou in het gehele bekken de kleinste maximale verblijftijd, nl. die van het ondiepste deel aangehouden moeten worden door meer inlaatpunten in de diepe delen.

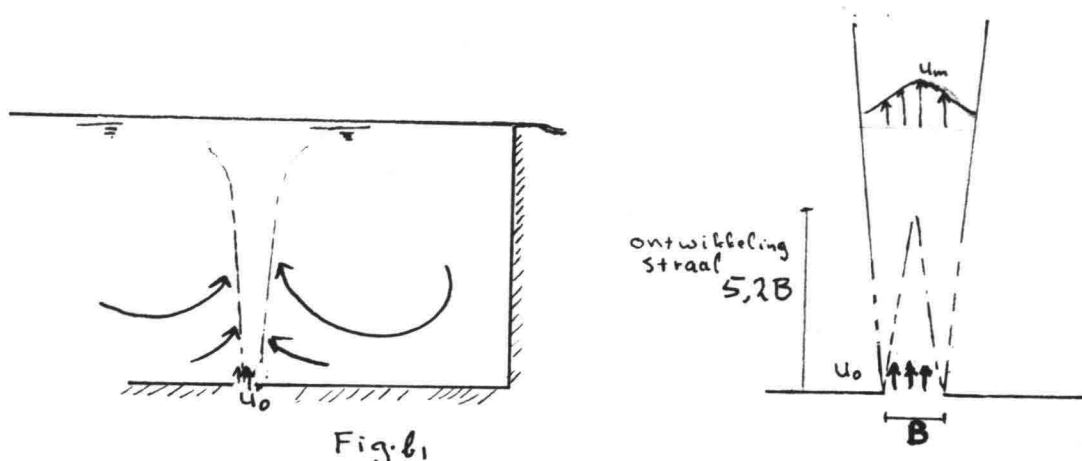
LITERATUUR

- | | | |
|---------|---|------|
| (no.1) | Zwembaden in praktijk
A. Ayar | 1987 |
| (no.2) | Waterbehandeling in zwembaden
Commissie waterbehandeling zwembaden. | 1981 |
| (no.3) | Besluit Hygiene en Veiligheid Zweminrichtingen
Staatsblad 470 | 1984 |
| (no.4) | Waterzuivering in zwembaden
Prof. Dr. Ing. H.J. Popel | 1975 |
| (no.5) | Watercirculatie in zwembaden
ing. H. Meester | 1984 |
| (no.6) | System identification
P Eyckhoff | 1974 |
| (no.7) | Aquaculture in tidal lowlands
W. v. Hengel | 1986 |
| (no.8) | Vooronderzoek naar de verspreiding van
verontreinigingen als gevolg van lozing in
stagnant water.
A.P. Benoist | 1984 |
| (no.9) | Advanced fluid mechanics
Raudkivi & Callander | 1975 |
| (no.10) | Signal analysis
A. Papoulis | 1972 |
| (no.11) | Chemical reactor engineering
O. Levenspiel | 1972 |
| (no.12) | Chemical reactor analysis and design
Froment & Bischoff | 1979 |

B1

BIJLAGE 1a Verwachte tijd waarin tracer voor het eerst de rand bereikt in het grote bad. (§ 3.3.3)

Verondersteld is dat de straal uit de injectiepunt geen hinder ondervindt van het vrije oppervlak of van de wanden, dus zich als een vrije 3-dimensionale straal gedraagt. In het ondiepe bad is deze veronderstelling niet geldig; de diepte is 0,5 tot 0,9 m, wat minder is dan 5,2 maal de breedte van de inlaatopening (B) (zie fig. b1).



Er zijn 18 inlaten, en het debiet in het grote bad is $113,1 \text{ m}^3/\text{h}$, zodat door iedere bron $6,3 \text{ m}^3/\text{h}$ stroomt. Diameter van de openingen is $0,15 \text{ m}$, dus opp. van de opening is $0,07 \text{ m}^2$.

$$u_0 = 6,3 / 0,07 = 90 \text{ m/h} = 0,025 \text{ m/s}$$

Voor een vrije 3-dimensionale straal (fig.b1) geldt :
 $u_m / u_0 = 6,3 B / x$, mits $x \geq 5,2 B$ (Fischer, no.8)

Op de x-as geldt:

$$dx/dt = u_m = 6,3 (B/x) u_0 \text{ , hieruit volgt:}$$

$$\frac{1}{2} x^2 = 6,3 B u_0 t,$$

x is dus evenredig met $\sqrt{t}$; stel $x = K \sqrt{t}$

$$dx/dt = \frac{1}{2} K \frac{1}{\sqrt{t}} = 6,3 (B/x) u_0 = (6,3 B u_0) / (K \sqrt{t})$$

$$K^2 = 6,3 B u_0 \cdot 2.$$

Bij een diepte van $1,5 \text{ m}$ zou de oppervlakte bereikt worden na t
 $= (x/k)^2 = 1,5^2 / (12,6 \cdot 0,15 \cdot 0,025) = 48 \text{ s.}$

Wat de schema van de stroming betreft zou vervolgens voor de horizontale stroming naar de rand gebruik kunnen worden gemaakt van de veronderstelling dat de stroming hetzelfde is als die van een 3-dimensionale radiale straal, echter de invloed van de andere bronnen en de wanden zijn nu te groot om te verwaarlozen. Bovendien is de snelheid zoveel afgenomen dat toepassing van de formules voor een turbulente straal niet geoorloofd is.

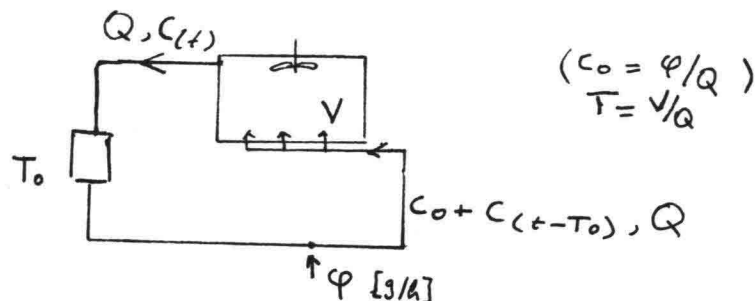
De horizontale snelheid van de oppervlaktelaag over de randen kan globaal bepaald worden m.b.v. het debiet en de omtrek:

per strekkende meter stroomt: $Q/\text{omtrek} = 113,1/82 = 1,4 \text{ m}^3/\text{h}, \text{m}$.
 Bij stroming over een laag van 5 cm wordt de snelheid $1,4/0,05 = 28 \text{ m/h} = 8 \text{ mm/s}$.

De afstand tot de rand is 2m, dus totaal is voor het bereiken van de rand benodigd:

$$2000/8 + 48 = 300 \text{ s.}$$

Bijlage 1b Afleiding concentratieverloop bij een stapdosering in een volledig gemengd bekken onder invloed van de vertraging



$$0 < t < T_0 \quad \varphi dt = Qc dt + Vdc \rightarrow c = \varphi/Q (1 - e^{-Q/V t})$$

$$T_0 < t < 2T_0: \frac{dc}{dt} + \frac{Q}{V}c = \frac{\varphi}{V} + \frac{Q}{V} \frac{\varphi}{Q} (1 - e^{-Q/V (t-T_0)})$$

$$\frac{dc}{dt} + \frac{Q}{V}c = -\frac{Q}{V} \varphi e^{\frac{Q}{V} T_0} \cdot e^{-\frac{Q}{V} t} + \frac{\varphi}{V} (1+Q)$$

gereduceerde vgl.: $c = K e^{-\frac{Q}{V} t}$

particulier opl: stel $K = u(t) \rightarrow c = u(t) e^{-\frac{Q}{V} t}$, (vorm $c' + q(t)c = b(t)$)

$$\rightarrow u' e^{-\frac{Q}{V} t} + u(t) \left[-\frac{Q}{V} e^{-\frac{Q}{V} t} + \frac{Q}{V} e^{-\frac{Q}{V} t} \right] = b(t)$$

$$u' = \frac{b(t)}{e^{-\frac{Q}{V} t}} \rightarrow u = \int \frac{b}{e^{\frac{Q}{V} t}} = -\frac{Q}{V} \varphi e^{\frac{Q}{V} T_0} \cdot t + \int \frac{\varphi}{V} \frac{(1+Q)}{e^{\frac{Q}{V} t}} dt$$

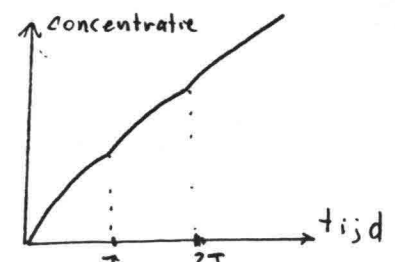
$$\rightarrow u = -\frac{Q}{V} \varphi e^{\frac{Q}{V} T_0} t + \frac{\varphi}{V} (1+Q) \frac{V}{Q} e^{\frac{Q}{V} T_0} t$$

$$\rightarrow c = e^{-\frac{Q}{V} t} \left[K + \frac{\varphi}{Q} (1+Q) e^{\frac{Q}{V} T_0} - \frac{Q}{V} \varphi e^{\frac{Q}{V} T_0} \cdot t \right] \xrightarrow{t=T_0} c = \frac{\varphi}{Q} (1 - e^{-Q/V T_0})$$

$$\rightarrow K = -\varphi e^{\frac{Q}{V} T_0} + \frac{Q}{V} \varphi T_0 e^{\frac{Q}{V} T_0} - \varphi/Q \Rightarrow$$

$$c = e^{-\frac{t}{T}} \left[\varphi e^{T_0/T} \left\{ \frac{1-t}{T} - 1 \right\} - \frac{\varphi}{Q} \right] + \frac{\varphi}{Q} (1+Q)$$

op danduur $c = k_1 t + B$ met $K_1 = \frac{\varphi/V}{1 + \frac{Q T_0}{V}}$



BIJLAGE 2

MEETTIJDEN EN MEETRESULTATEN

meetijden ^{B4} en - resultaten

Plaats	tijd [min]	concentratie [g/m ³]	plaats	tijd [min]	concentratie [g/m ³]
A	10	0,06	C	110	0,31
A	20	0,15	"	120	0,35
"	40	0,28	"	125	0,38
"	60	0,45	"	130	0,40
"	75	0,53	"	135	0,43
"	90	0,69	"	140	0,44
"	105	0,81	C	150	0,46
"	120	0,89	D	10	0,07
"	135	0,94	D	20	0,06
A	150	0,92	"	30	0,08
B	30	0,15	"	40	0,14
B	60	0,35	"	60	0,19
"	75	0,46	"	70	0,21
"	90	0,54	"	75	0,22
"	105	0,67	"	80	0,25
"	120	0,69	"	85	0,27
"	135	0,78	"	90	0,24
B	150	0,80	"	95	0,29
C	10	0	"	100	0,34
"	15	0	"	105	0,33
"	30	0,01	"	110	0,41
"	40	0,04	"	121	0,44
"	50	0,07	"	125	0,48
"	60	0,09	"	130	0,50
"	70	0,13	"	135	0,54
"	75	0,13	"	140	0,51
"	80	0,15	D	144	0,51
"	85	0,19			
"	90	0,21			
"	95	0,23			
"	100	0,25			
"	105	0,26			

Platts	tidal [min]	concentration [g/m ³]
E	10	0.02
E	20	0.09
"	30	0.12
"	40	0.17
"	60	0.27
"	70	0.29
"	75	0.32
"	80	0.38
"	85	0.38
"	90	0.38
"	95	0.38
"	100	0.44
"	105	0.46
"	110	0.47
"	121	0.52
"	125	0.53
"	130	0.56
"	140	0.55
E	144	0.56
$E_{g_{\infty}}$	10	0.03
E_g	20	0.08
"	30	0.12
"	40	0.17
"	60	0.26
"	80	0.36
"	90	0.37
"	105	0.45
"	121	0.51
"	135	0.54
"	144	0.56

Platts	tidal [min]	concentration [g/m ³]
F	10	0.04
F	15	0.05
"	30	0.14
"	40	0.20
"	60	0.29
"	70	0.36
"	75	0.38
"	80	0.39
"	85	0.43
"	90	0.49
"	95	0.50
"	100	0.52
"	105	0.54
"	110	0.59
"	120	0.62
"	126	0.66
"	130	0.70
"	135	0.69
"	140	0.71
F	150	0.71
G	10	0.03
G	20	0.18
"	40	0.28
"	60	0.40
"	80	0.52
"	90	0.57
"	105	0.65
"	120	0.73
"	135	0.77
G	150	0.74

Plants	tijel [min]	concentratie [g/m ²]	Plants	tijel [min]	concentratie [g/m ²]
G _{goot}	2	0,00	H	140	0,76
G _g	5	0,04	H	143'20"	0,74
"	10'22"	0,09	I	10'40"	0,11
"	15	0,11	I	20'40"	0,23
"	20	0,15	"	40'40"	0,40
"	40	0,22	"	60	0,56
"	60	0,34	"	80	0,72
"	80	0,48	"	90	0,77
"	100	0,59	"	105	0,88
"	120	0,70	"	120	0,96
"	140	0,72	"	135	1,02
G _{goot}	143'20"	0,74	I	143'40"	0,96
H	2'30"	0,01	J	30	0,37
H	5'30"	0,04	J	60	0,58
"	9'40"	0,10	"	80	0,74
"	15'10"	0,14	"	90	0,81
"	20'30"	0,17	"	105	0,89
"	30	0,26	"	120	1,00
"	40	0,29	"	135	0,98
"	50	0,36	J	143'50"	0,98
"	60	0,42	P	25	0,05
"	70	0,48	"	49	0,18
"	80	0,53	"	66'30"	0,27
"	90	0,59	"	91	0,39
"	95	0,61	"	101'30"	0,45
"	100	0,64	"	110	0,49
"	105	0,68	"	124'30"	0,55
"	110	0,70	"	133	0,59
"	120	0,74	"	140	0,61
"	125	0,78	"	149	0,64
"	130	0,81	"	155	0,63
"	135	0,76	"	168'30"	0,62

B₇

Plaats	tijd [min]	concentratie [g/m ³]	Plaats	tijd [min]	concentratie [g/m ³]
P	175	0,63	S _{4WB}	73'25"	0,19
P	188	0,62	"	85'30"	0,24
T	27'40"	0,07	"	97'30"	0,29
"	47	0,15	"	103'40"	0,36
"	89	0,35	"	121'30"	0,44
"	103'45"	0,42	"	133'20"	0,50
"	113'	0,47	S _{4WB}	145'20"	0,51
"	126	0,56	S _{4B}	22'	0,05
"	135	0,59	"	42'10"	0,19
"	141	0,62	"	50'	0,21
"	150	0,64	"	62'	0,26
"	157	0,64	"	72	0,23
"	177	0,65	"	88	0,32
T	191	0,64	S _{4B}	122	0,48
S _{4WM}	12	0,00	S ₄₅₀	4'10"	0,04
"	24	0,03	"	7'10"	0,03
"	36	0,06	"	13'	0,04
"	48	0,09	"	32	0,11
"	60	0,12	"	45	0,20
"	72	0,18	"	55	0,21
"	84	0,22	"	65	0,23
"	96	0,25	"	82	0,30
"	108	0,31	"	115	0,53
"	120	0,38	S _{45M}	10'	0,03
"	132	0,45	"	16'10"	0,05
S _{4WM}	144	0,47	"	37'	0,12
S _{4WB}	14		"	48'	0,17
	25'30"		"	57'	0,19
	37'50"		"	67'10"	0,23
	49'40"		"	85'	0,31
	61'30"		S _{45M}	118'	0,47
	73'25"		S _{5B}	25'	0,08

plaats tijd [min] concentratie

S60 8'30" 0,15 [g/m³]

" 20 0,21

" 38 0,23

" 48 0,31

" 58 0,33

" 97 0,47

S60 127 0,64

S6m 2'30" 0,04

" 16 0,05

" 34 0,14

" 44 0,20

" 54 0,25

" 95 0,41

S6m 124 0,56

S6B 5' 0

" 16' 0,18

" 34 0,65

" 44 0,54

" 54 0,72

" 95 0,80

S6B 124 0,91

S6WM 25' 0,08

62' 0,25

144' 0,57

S6WB 28' 0,09

64' 0,26

145' 0,59

na 1 dag Pomp Rinke na 1 dag 0,65

, rechts " 0,64

H " 0,65

E " 0,64

J " 0,64

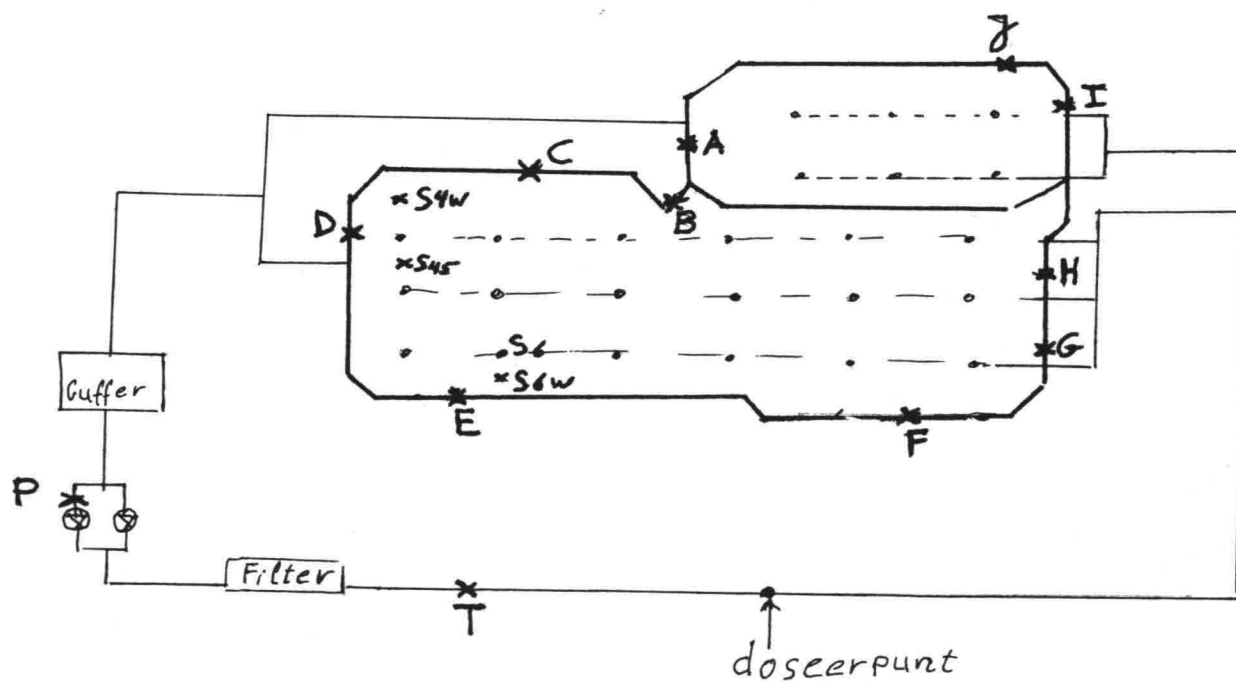
Pentebad " 0,65

— 0 : oppervlakte v. water

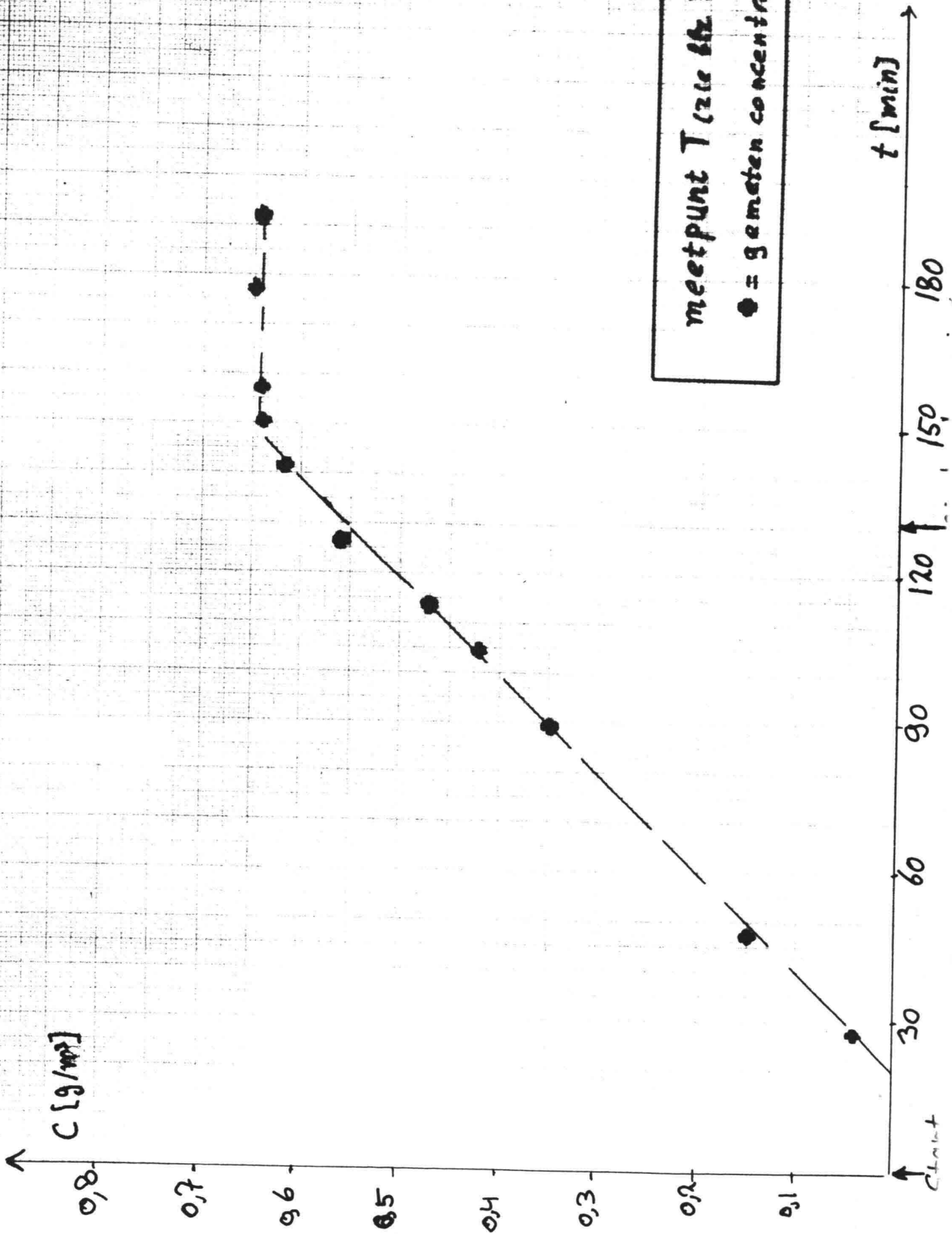
--- M : op halve diepte

.... B : bij de bodem

BIJLAGE 3

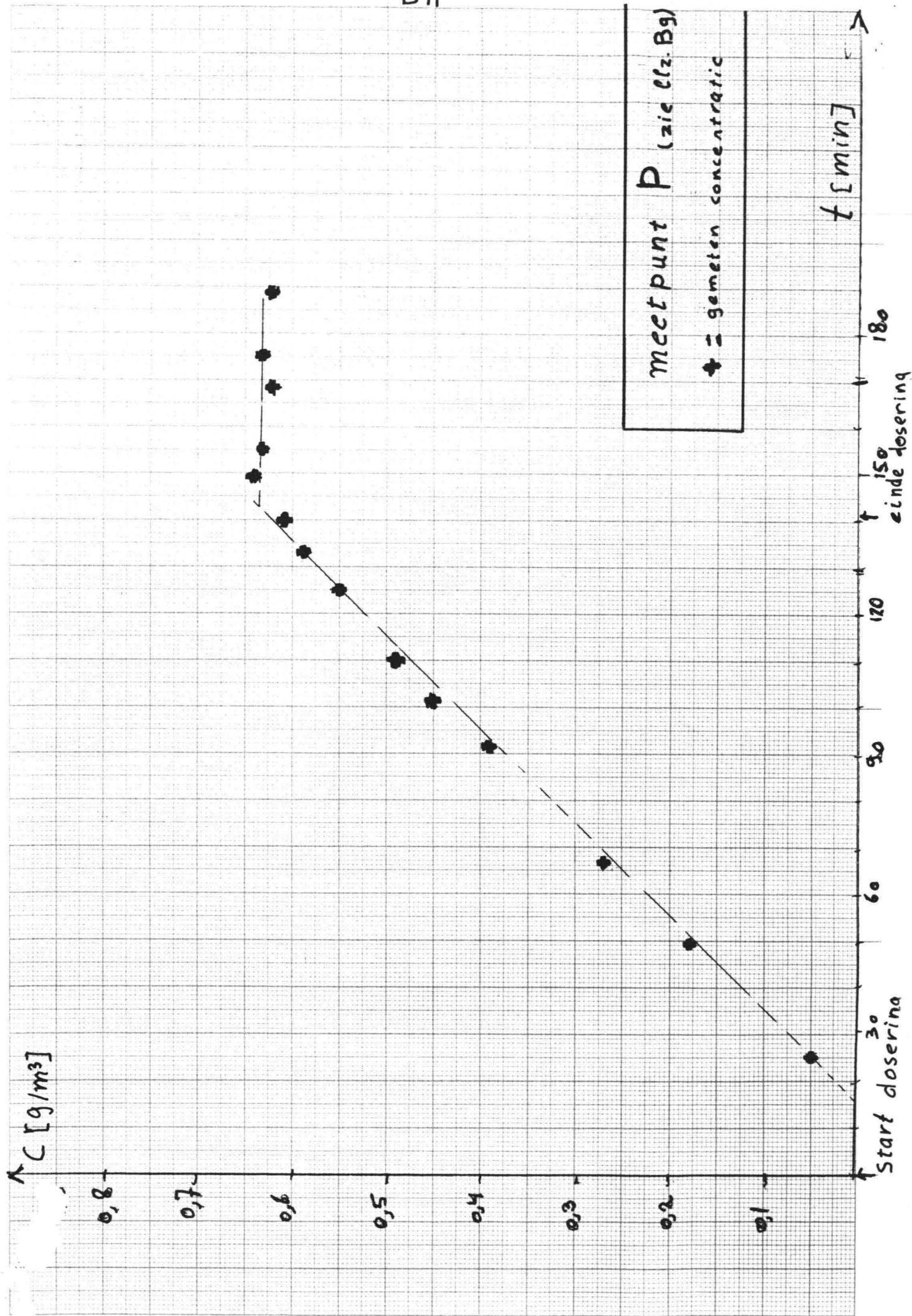
GRAFIEKEN VAN DE GEMETEN EN BEREKENDE
CONCENTRATIEVERLOPEN.fig. B₂ overzicht meetplaatsen

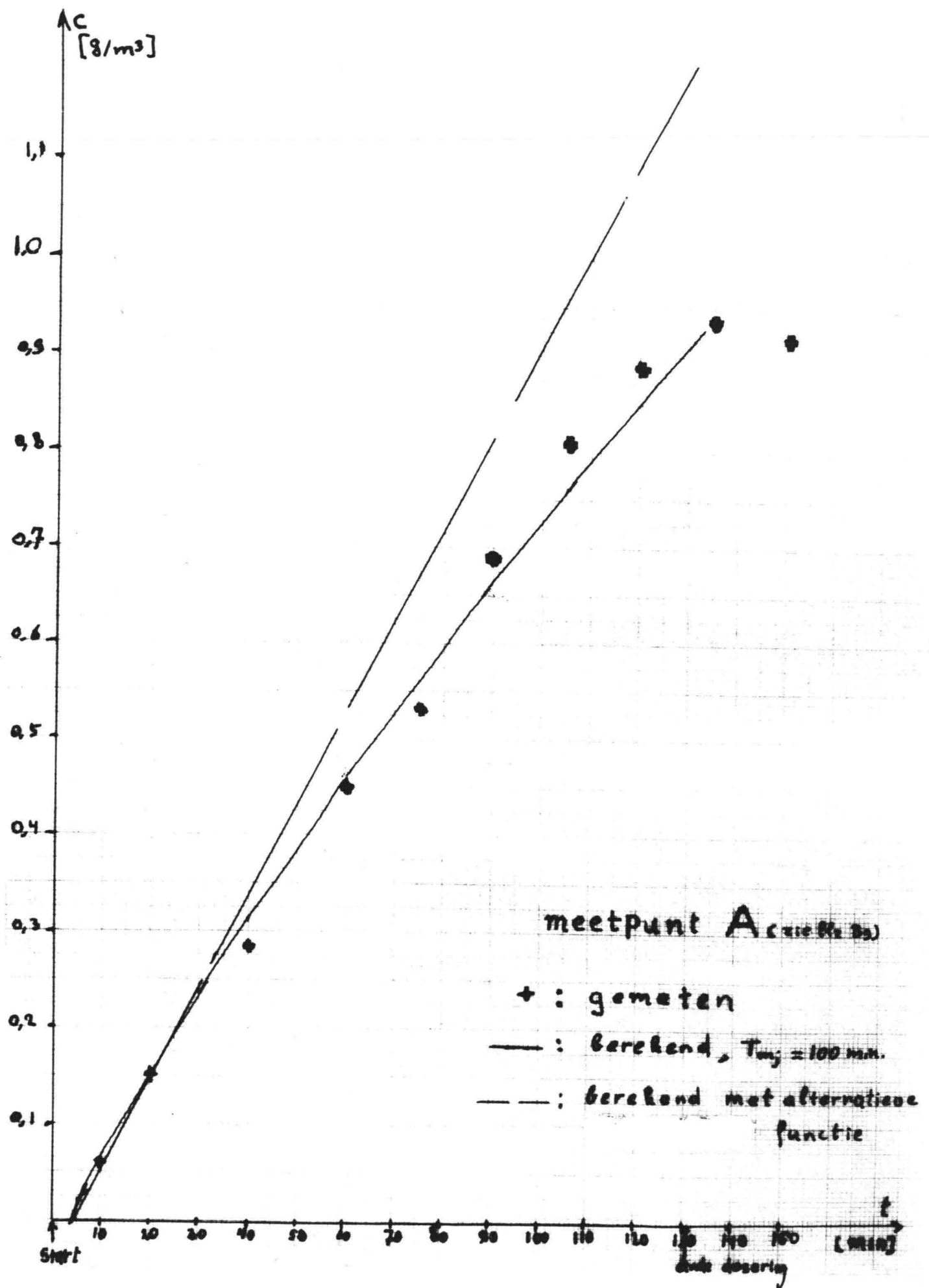
B10



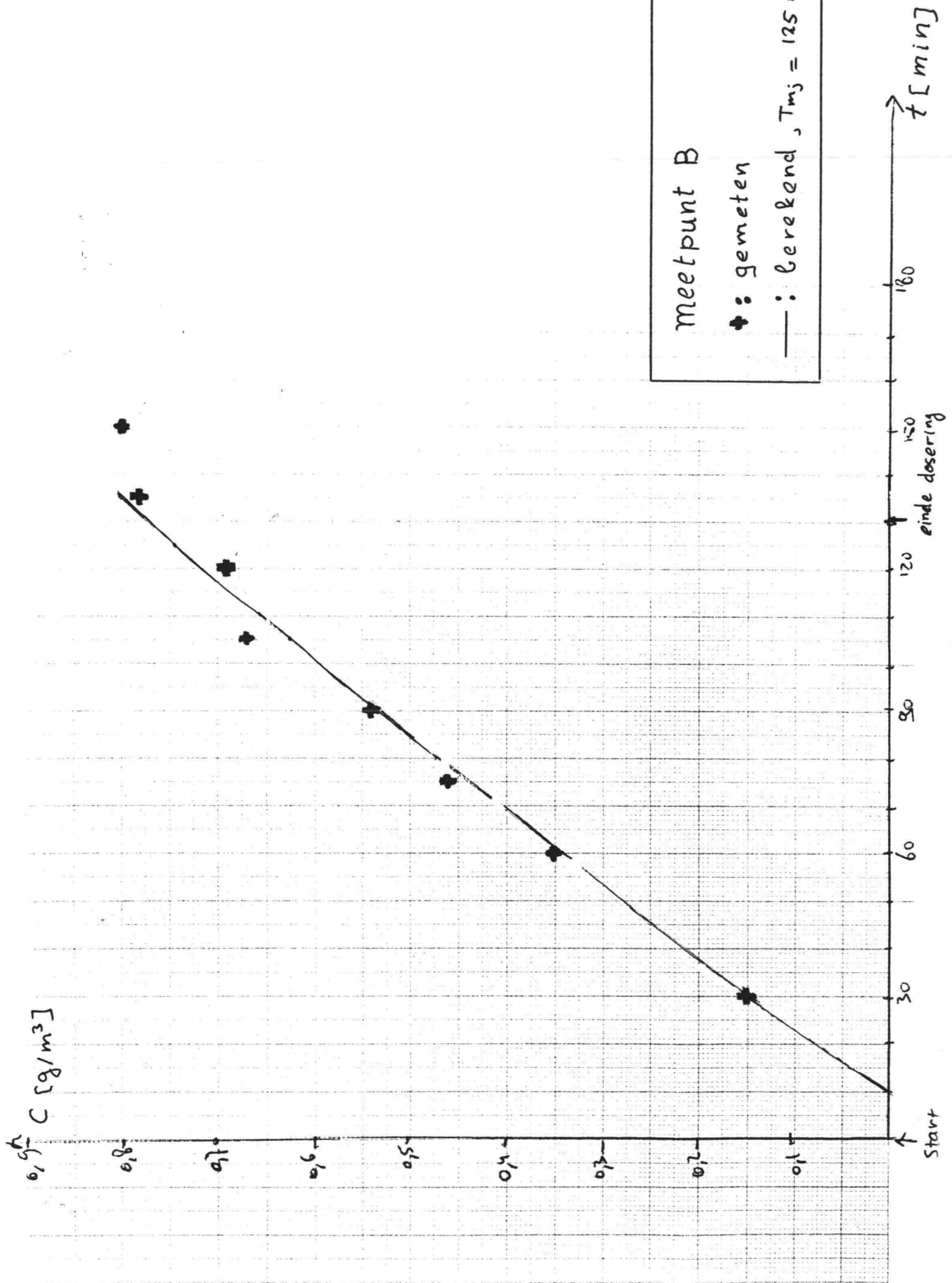
B11

DINA 4 210x297 mm

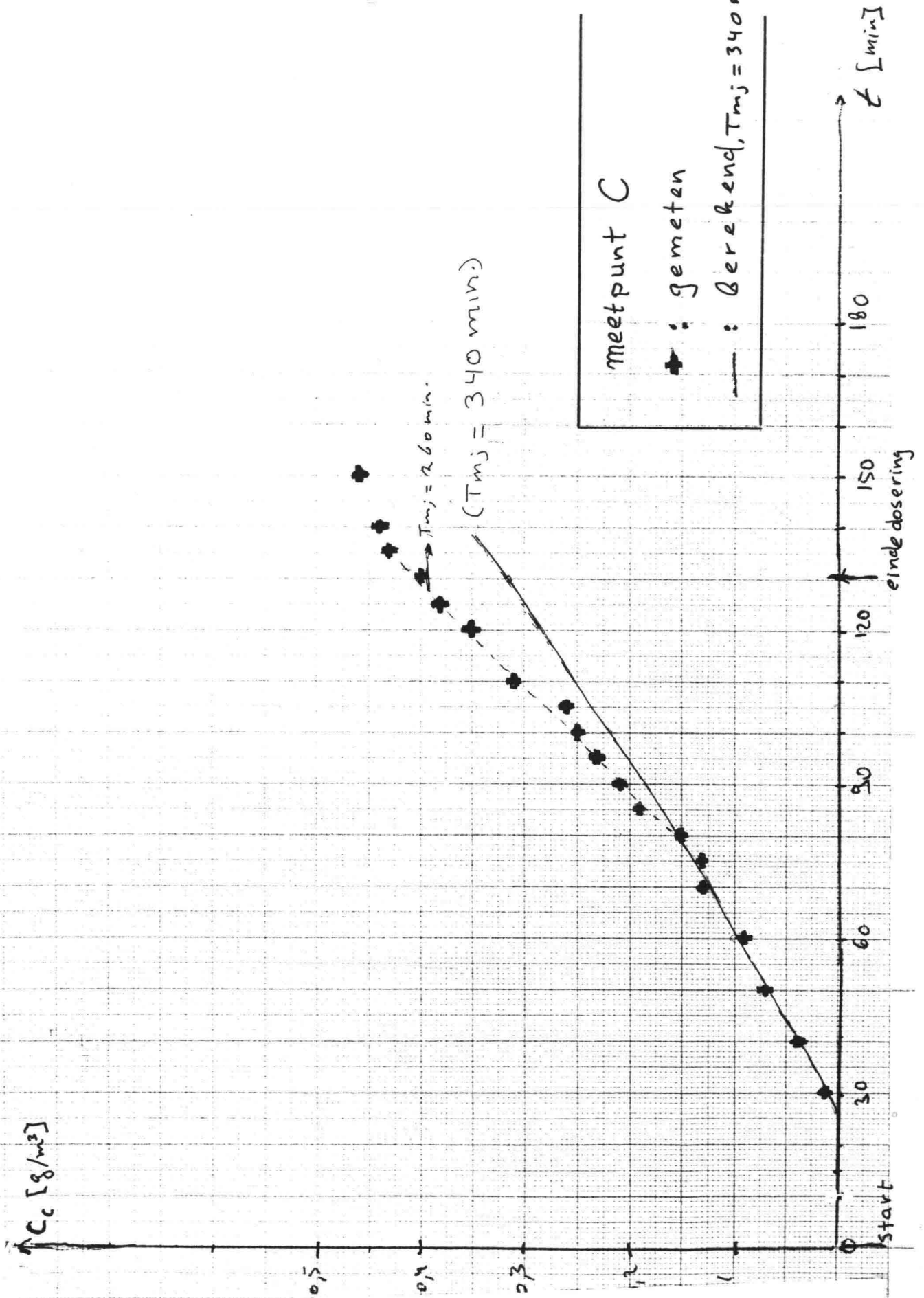


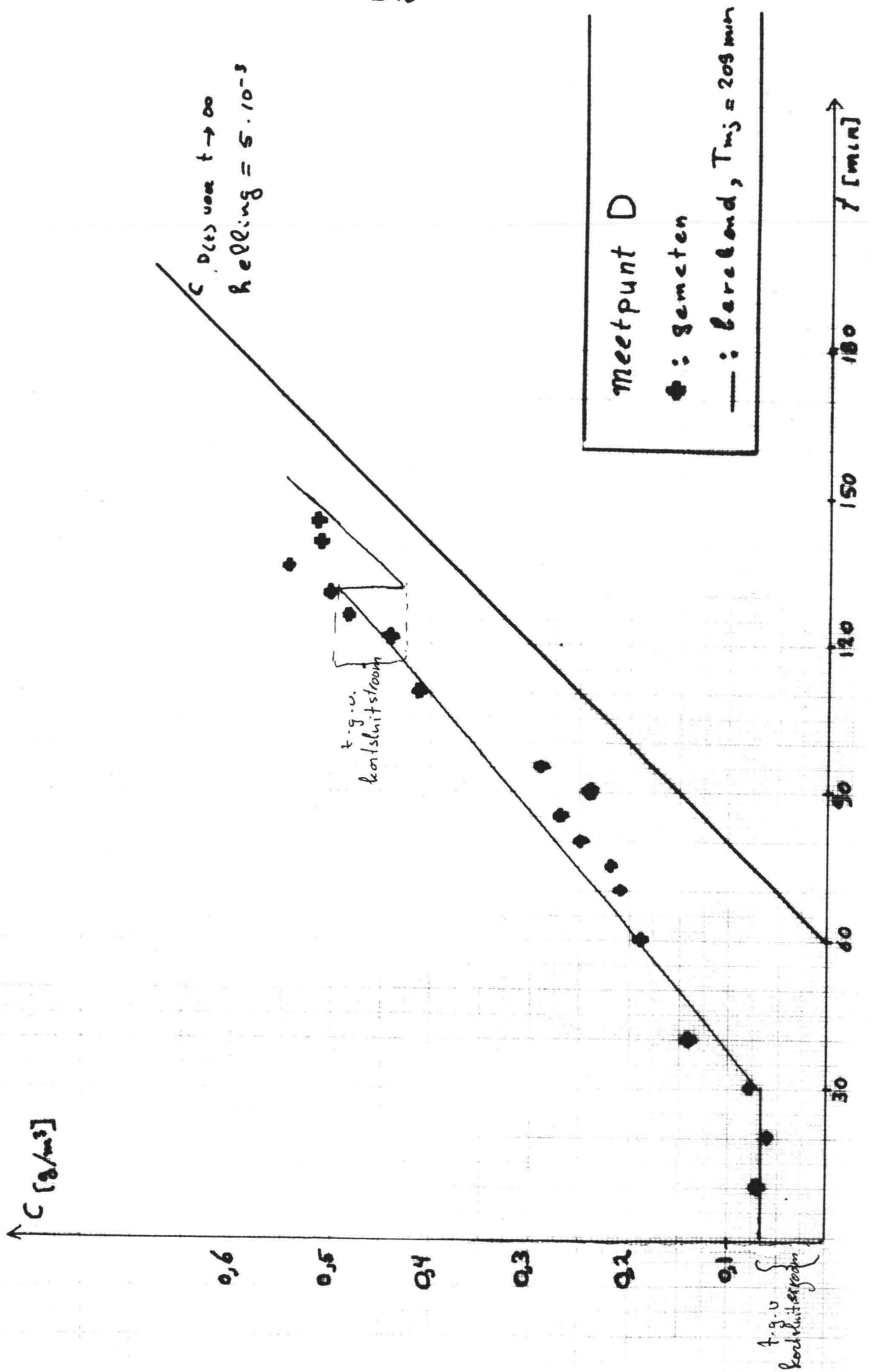


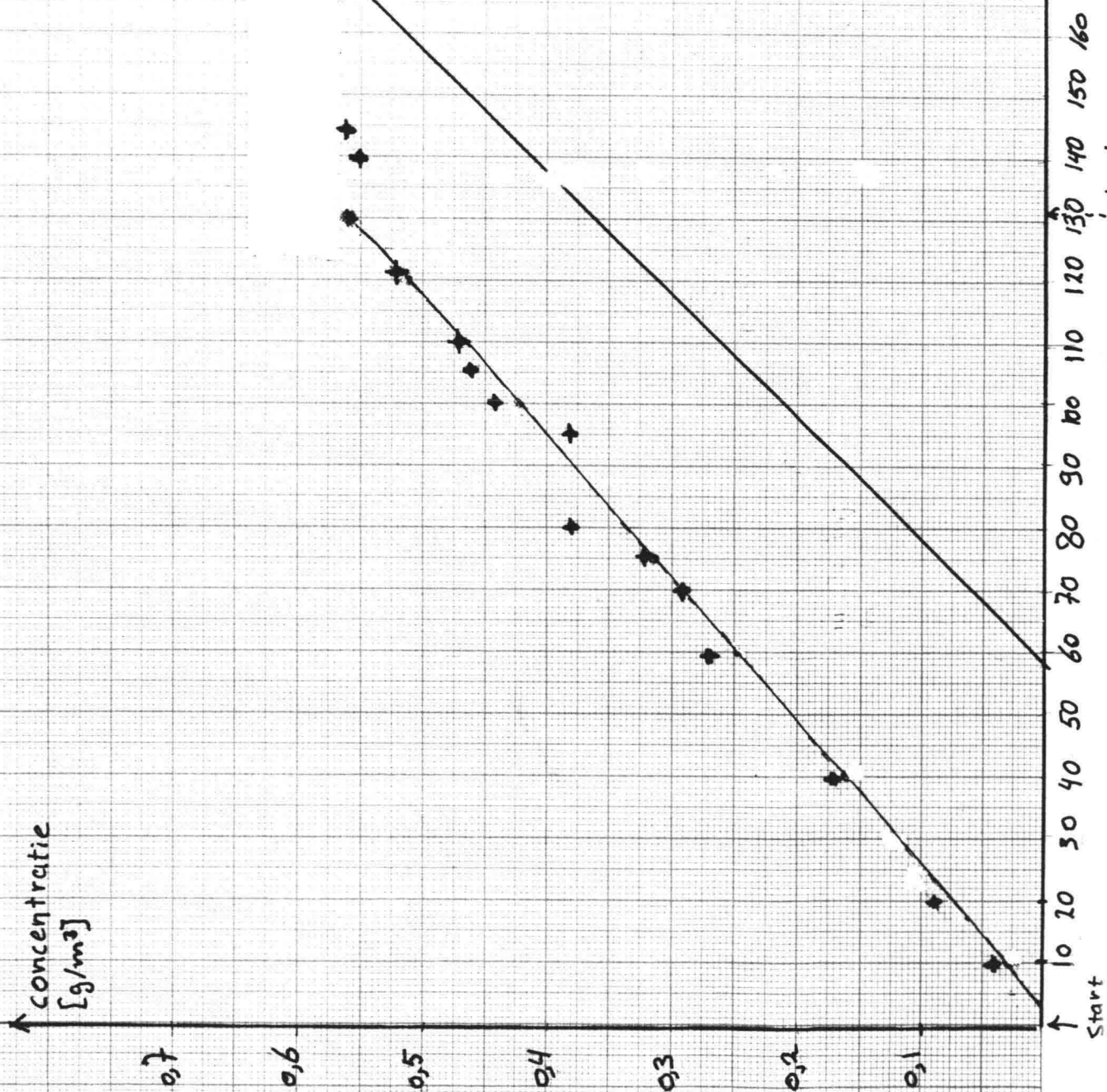
B.13

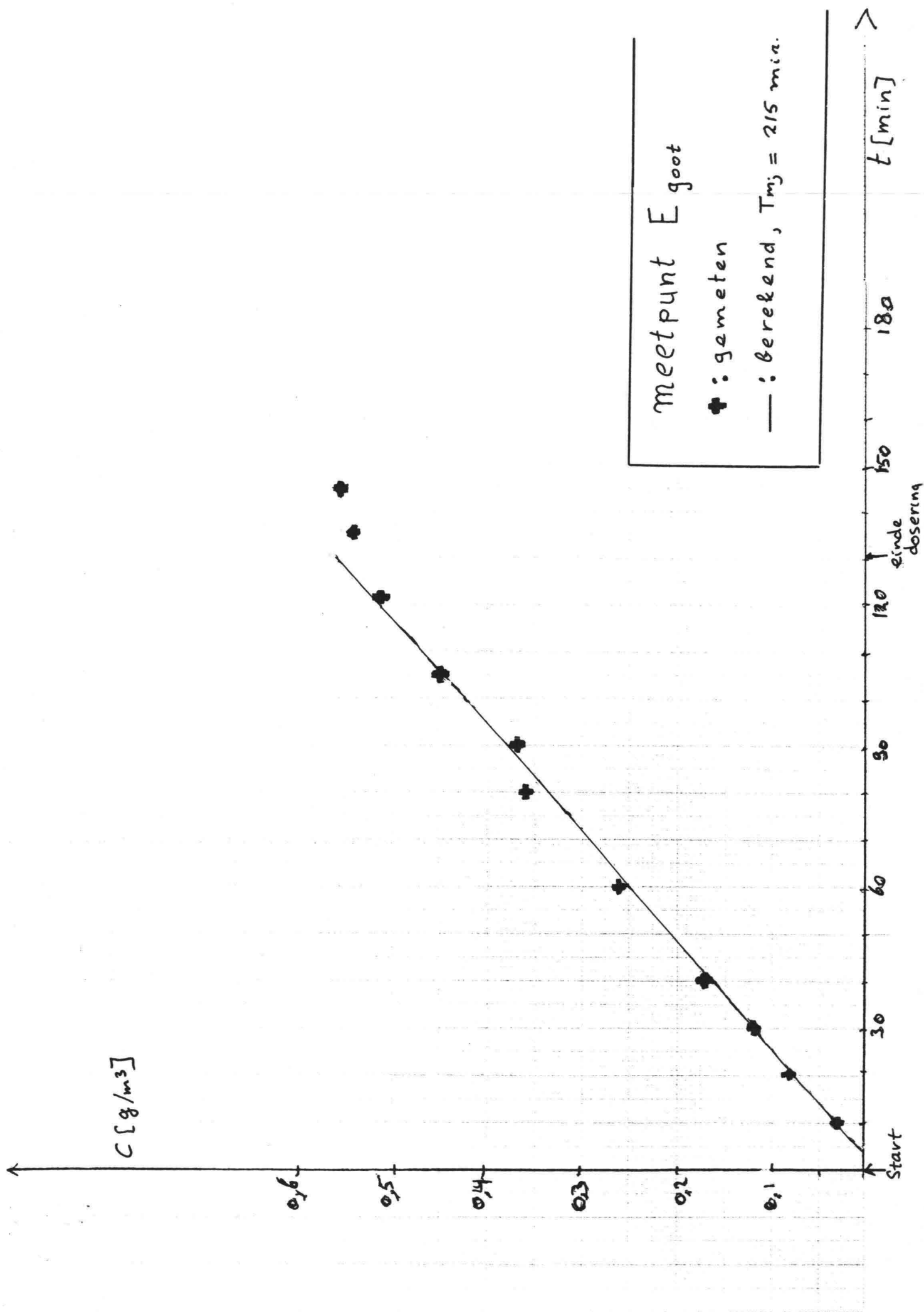


B14



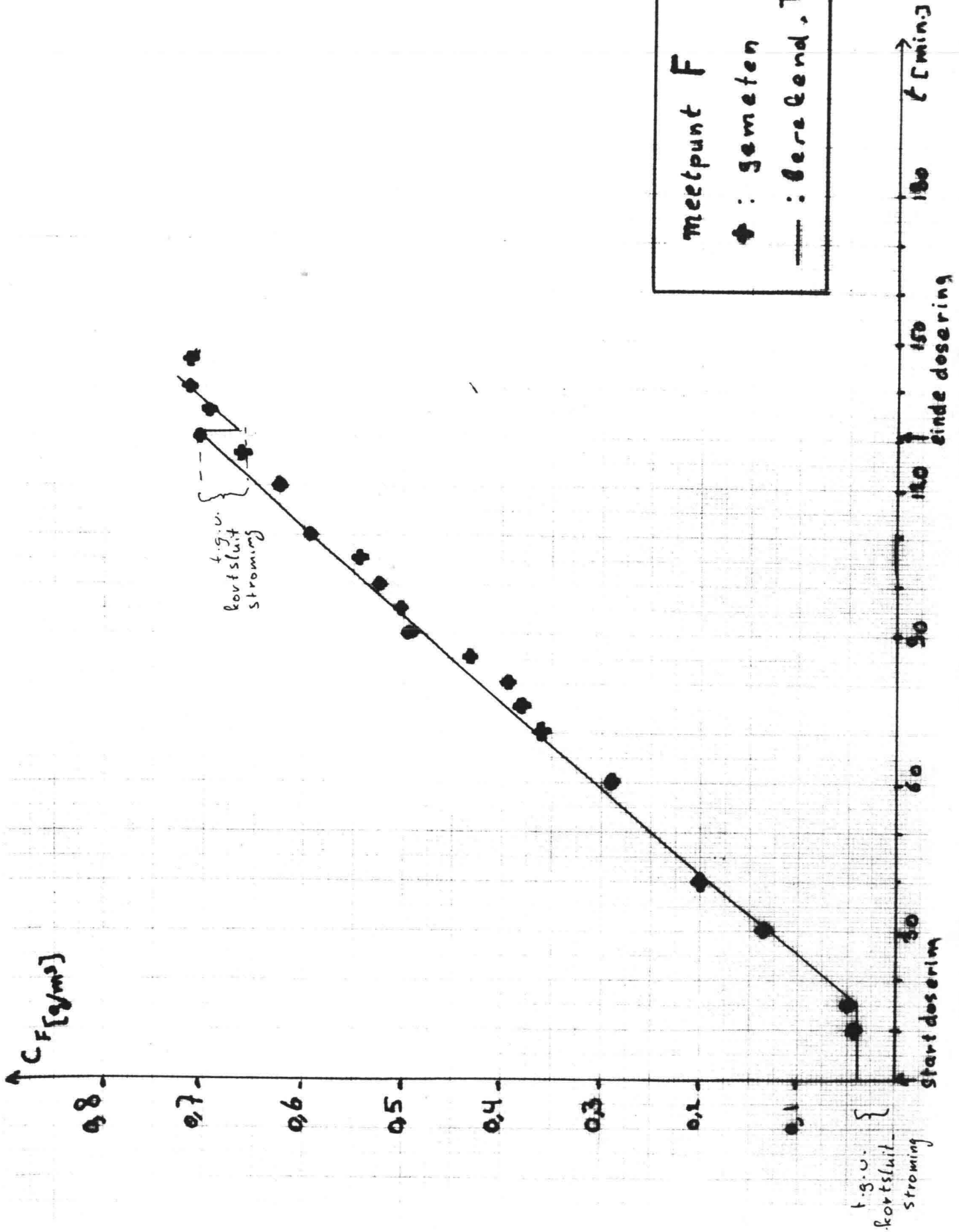


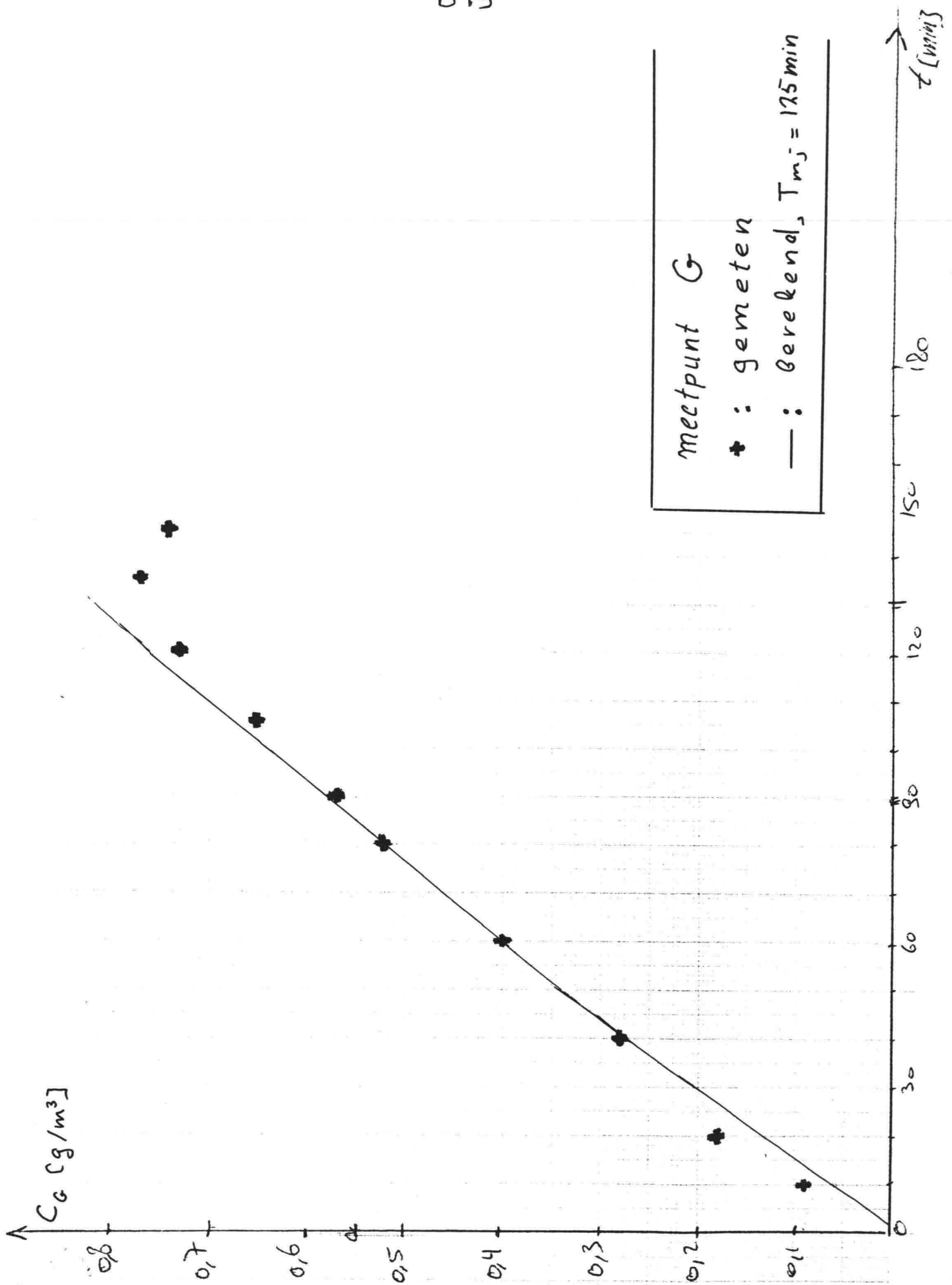




meetpunt F

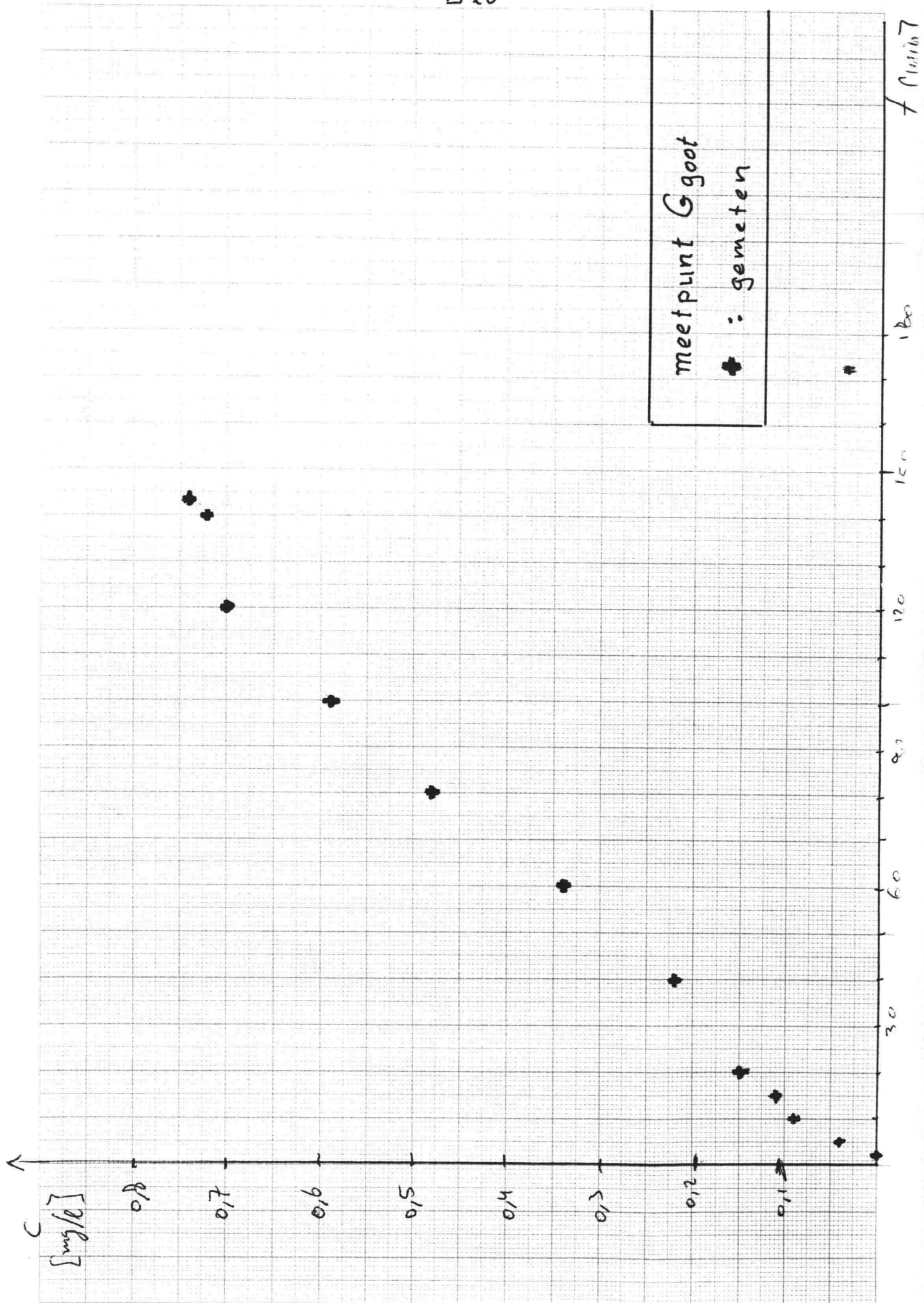
+ : gemeten

— : berekend, $T_m = 150 \text{ min}$ 

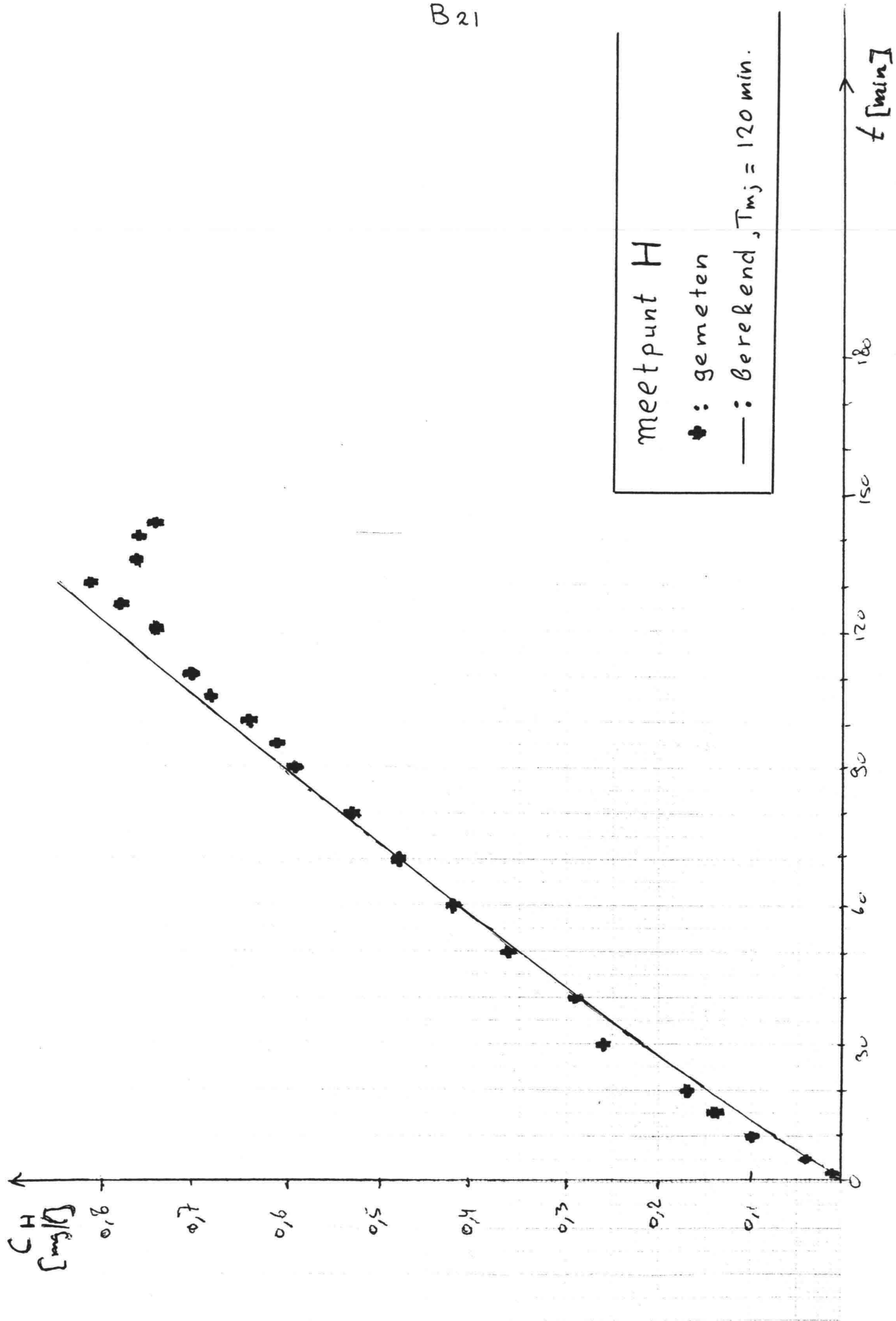


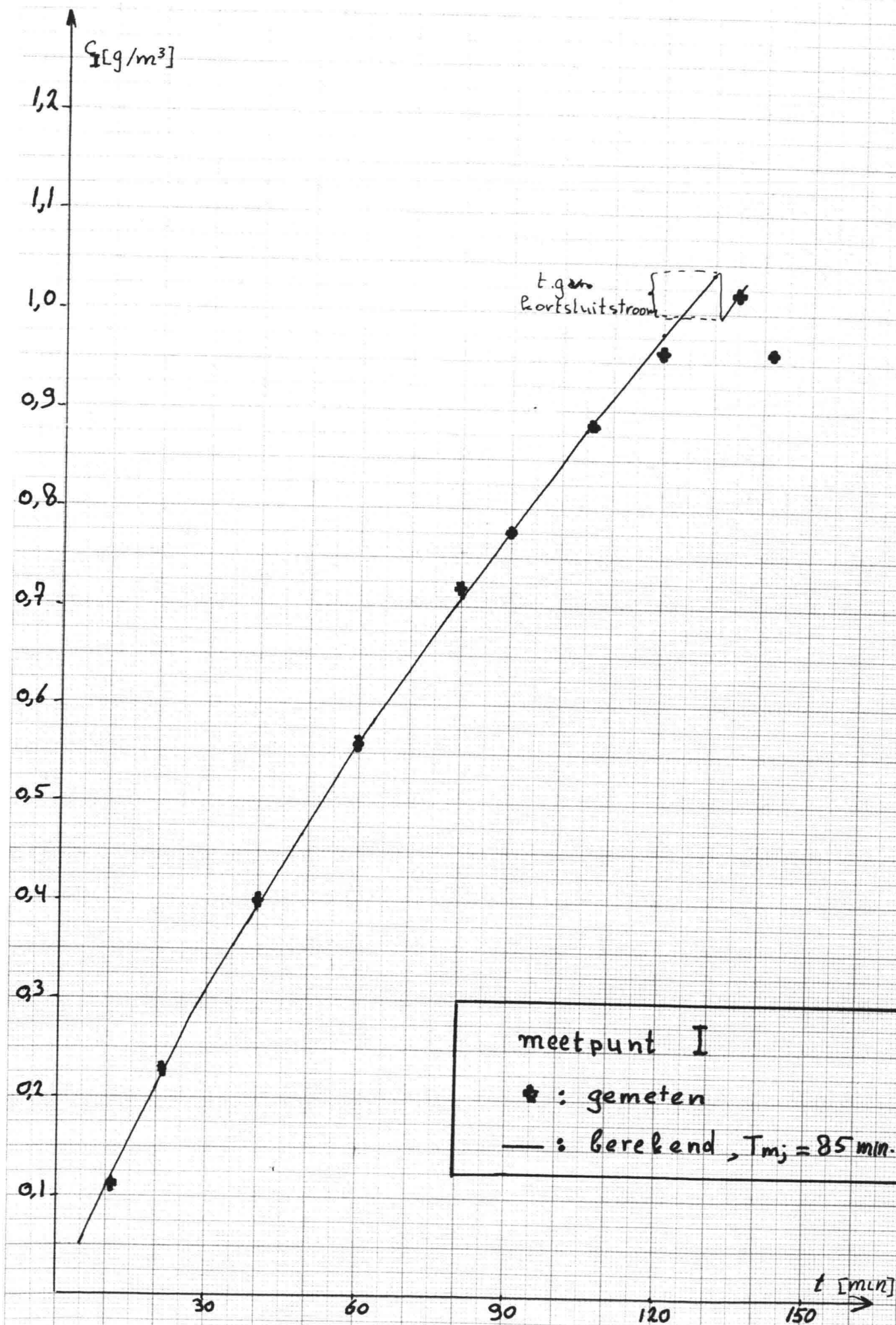
B20

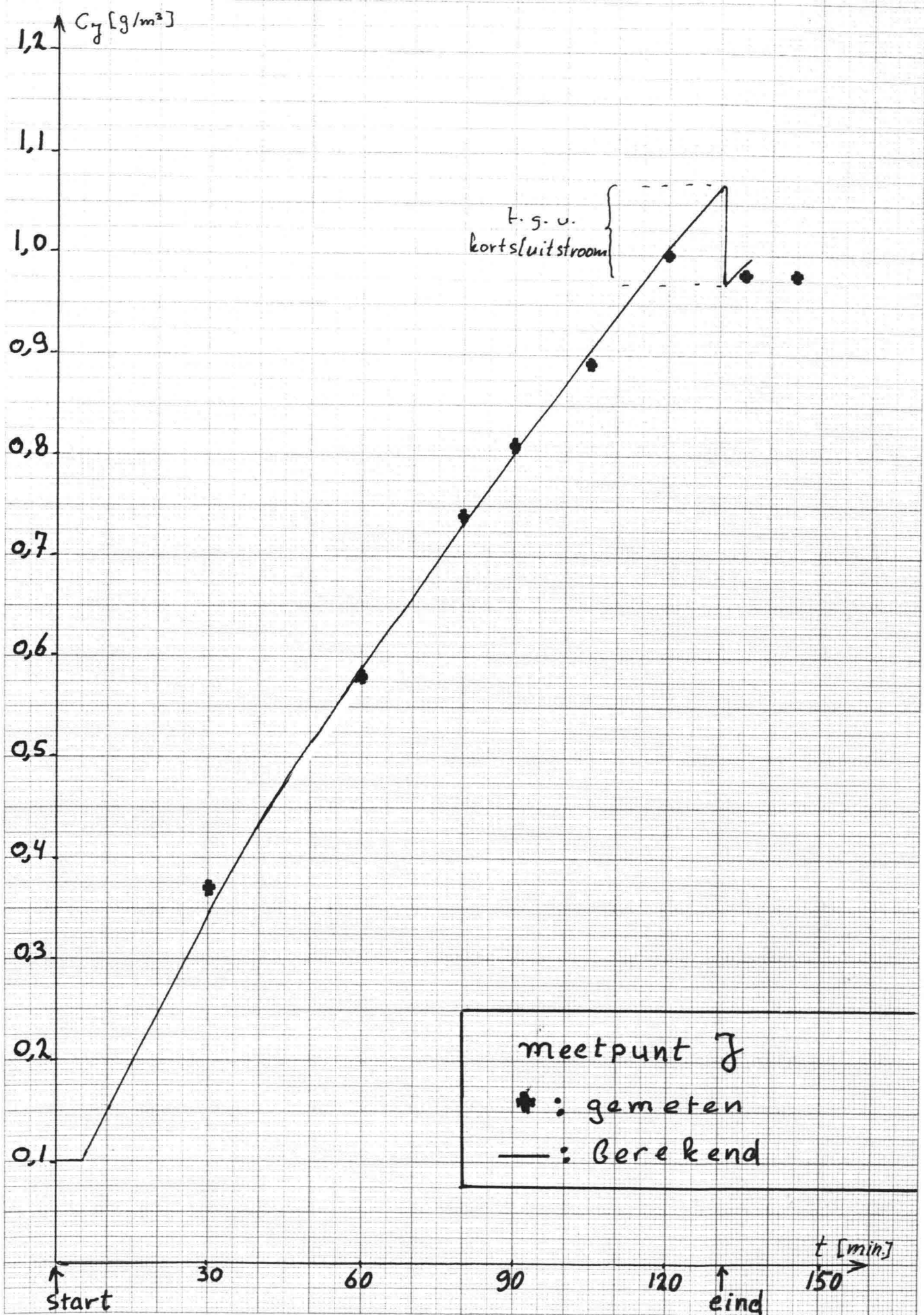
11/11/07



B21

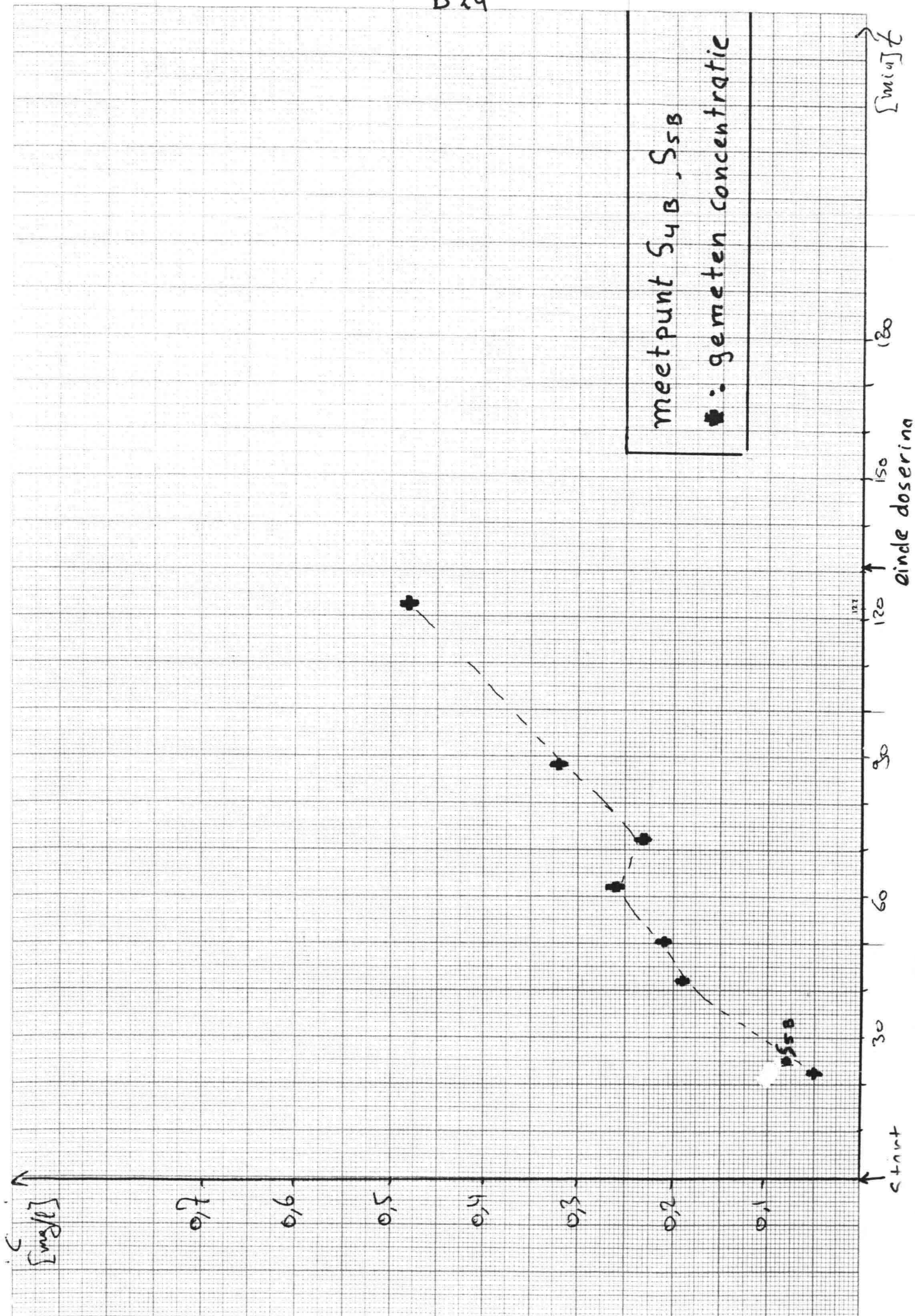


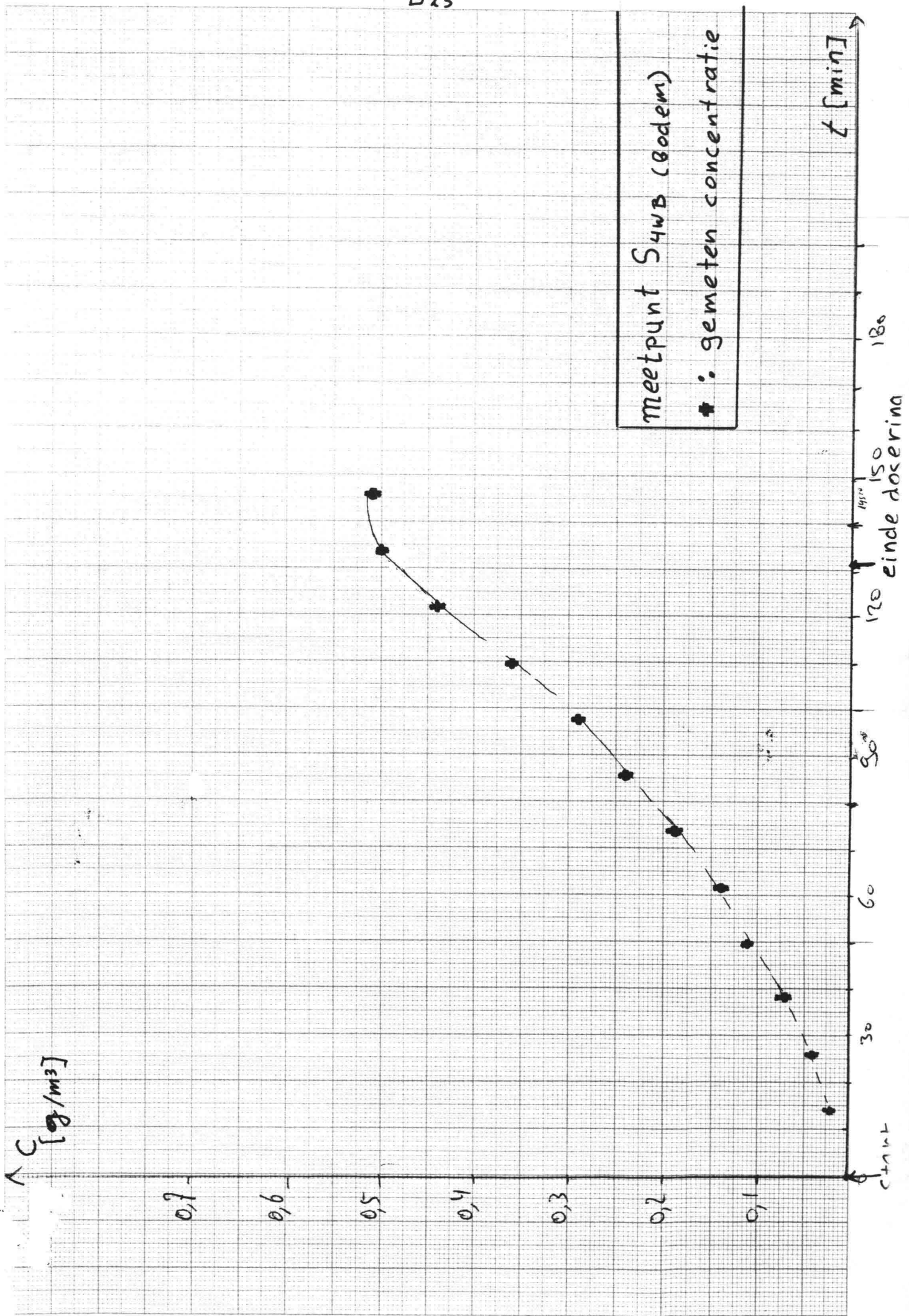


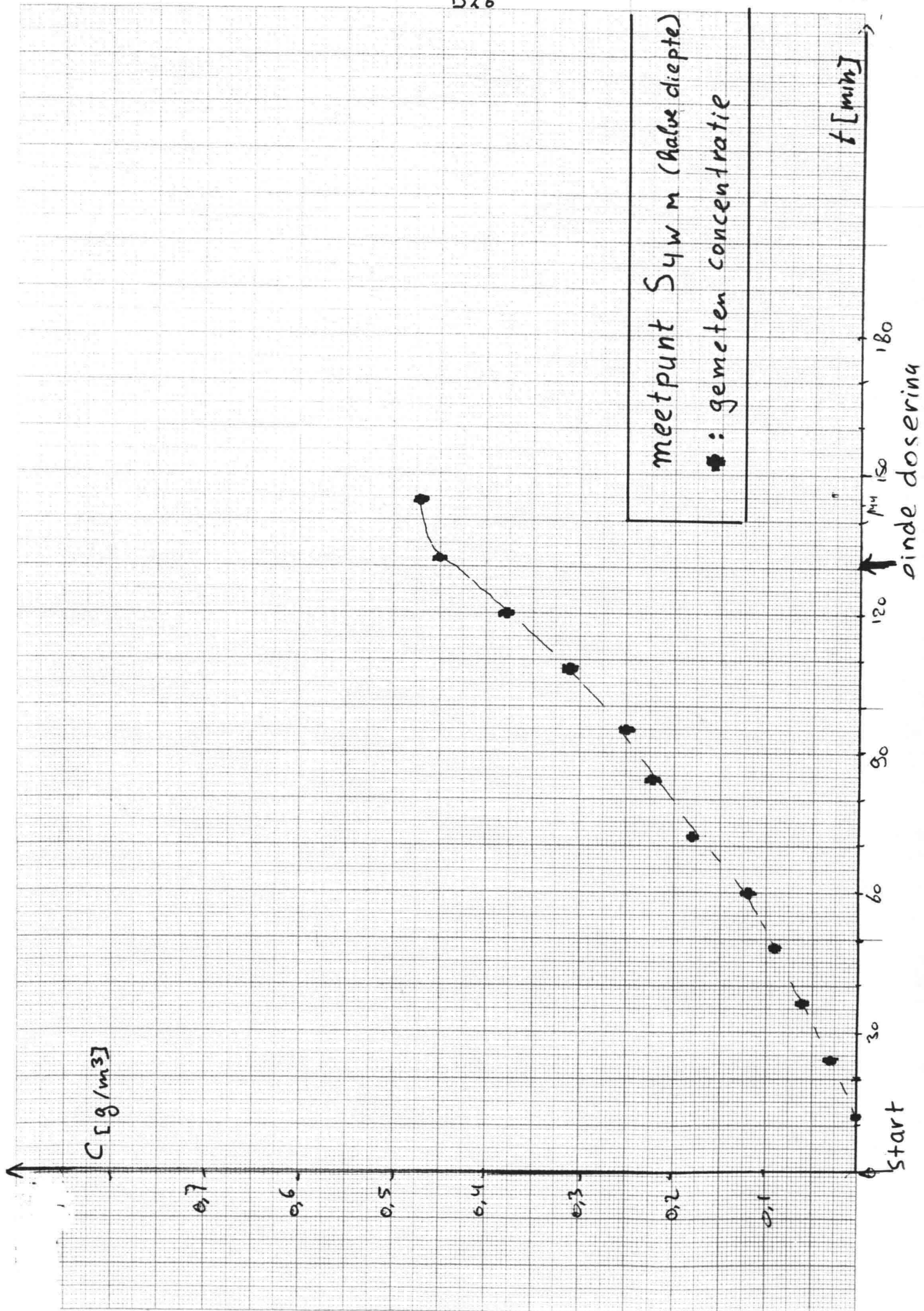


B24

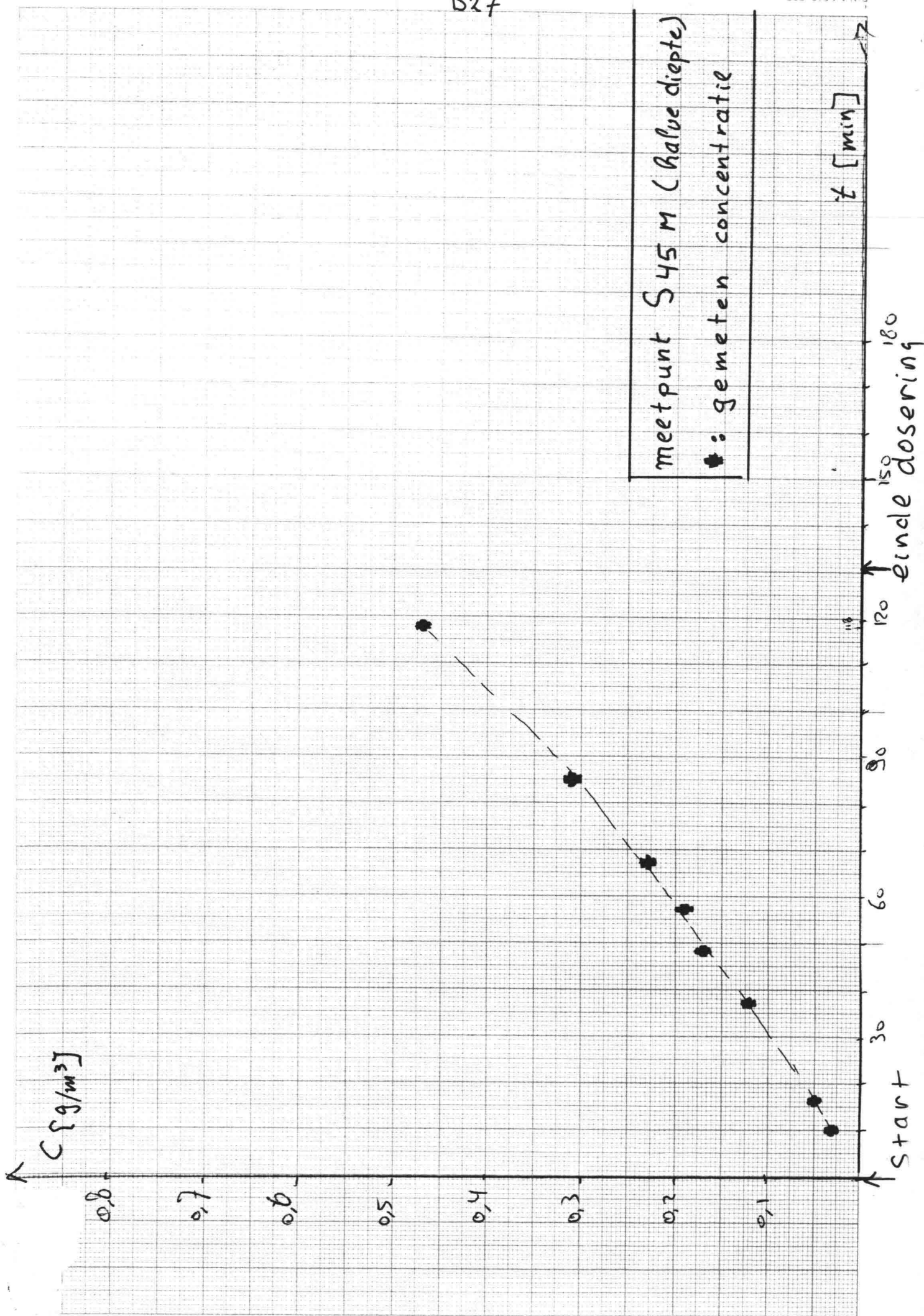
DIN A4 210x297 mm

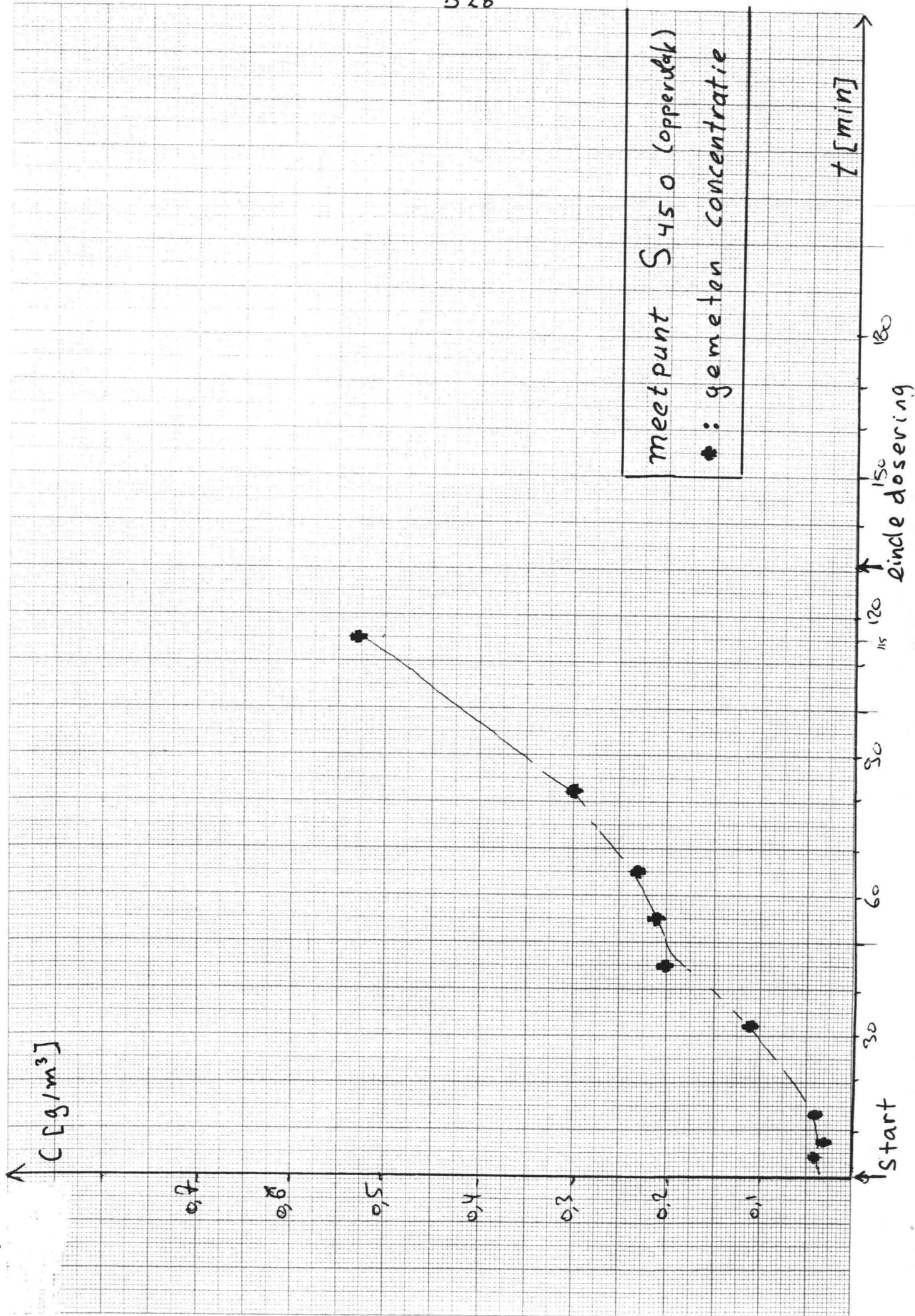


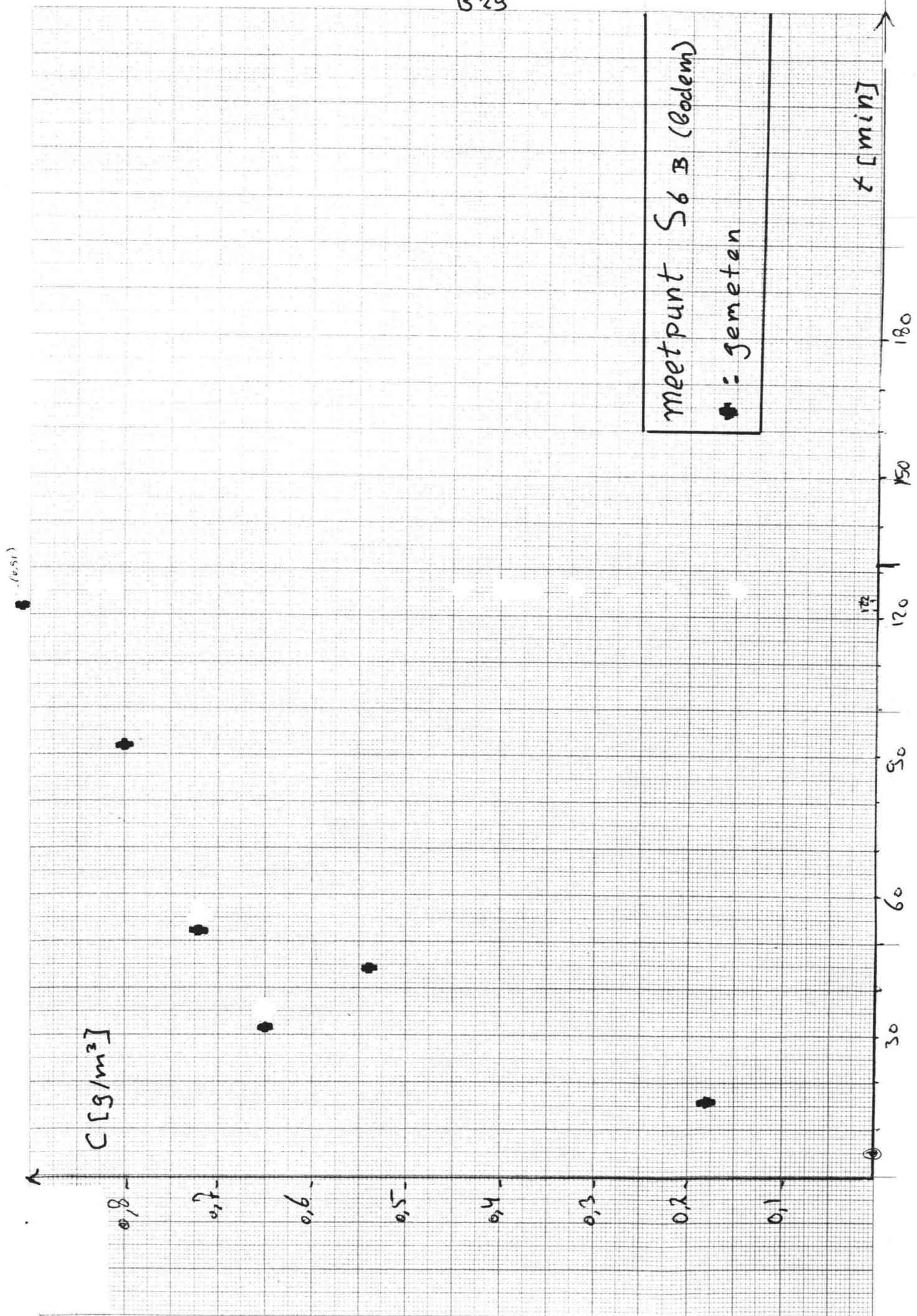




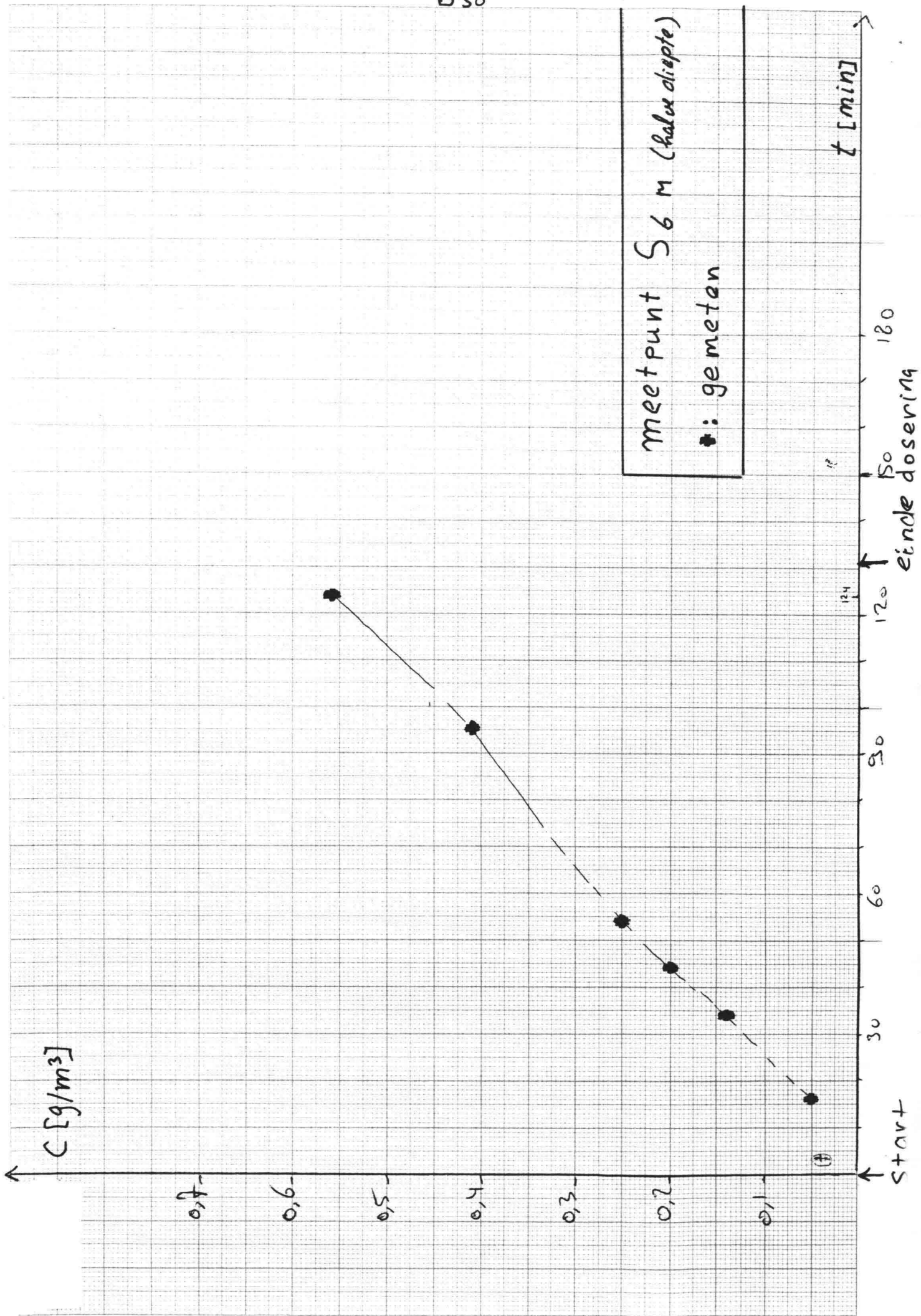
B27

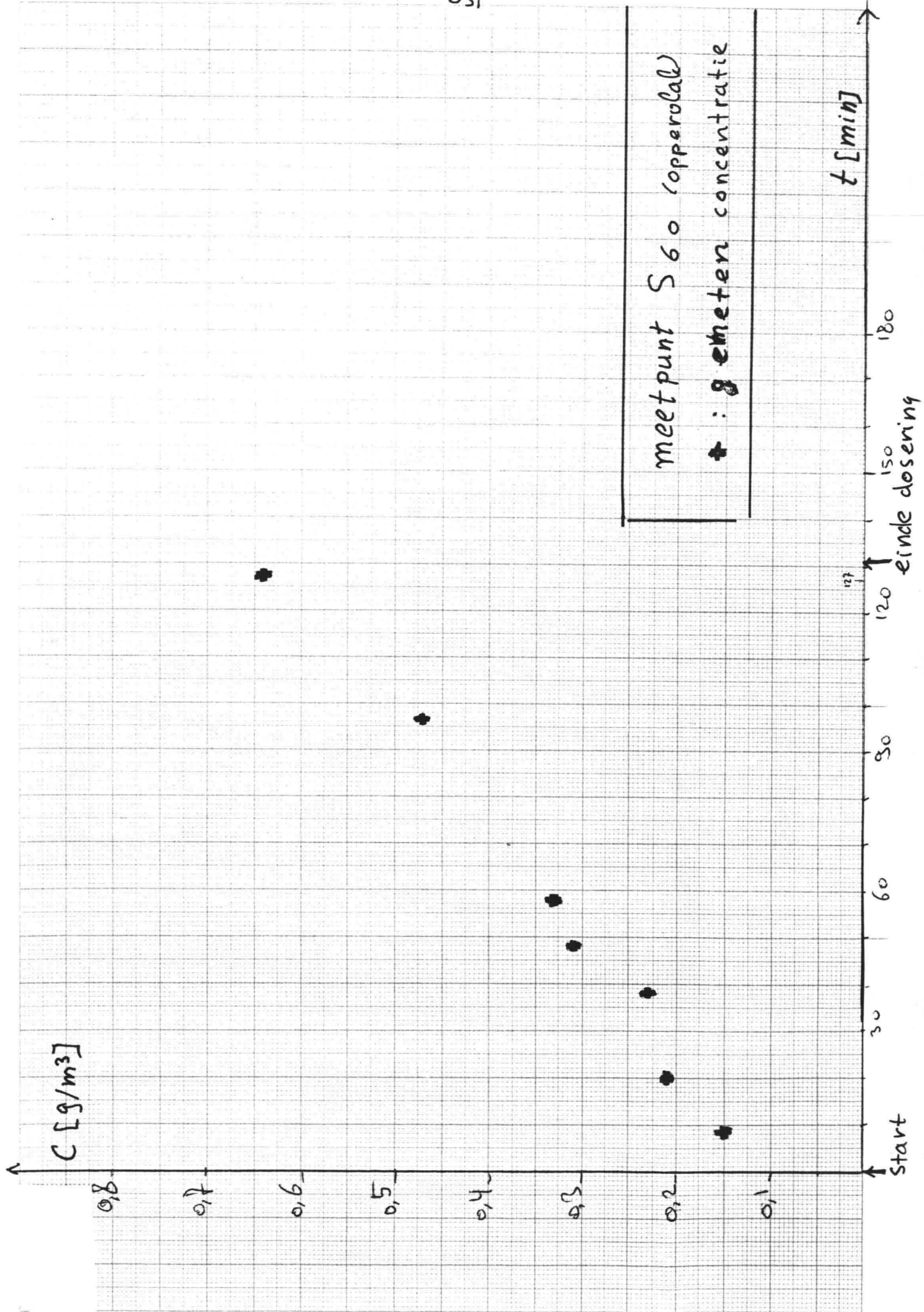


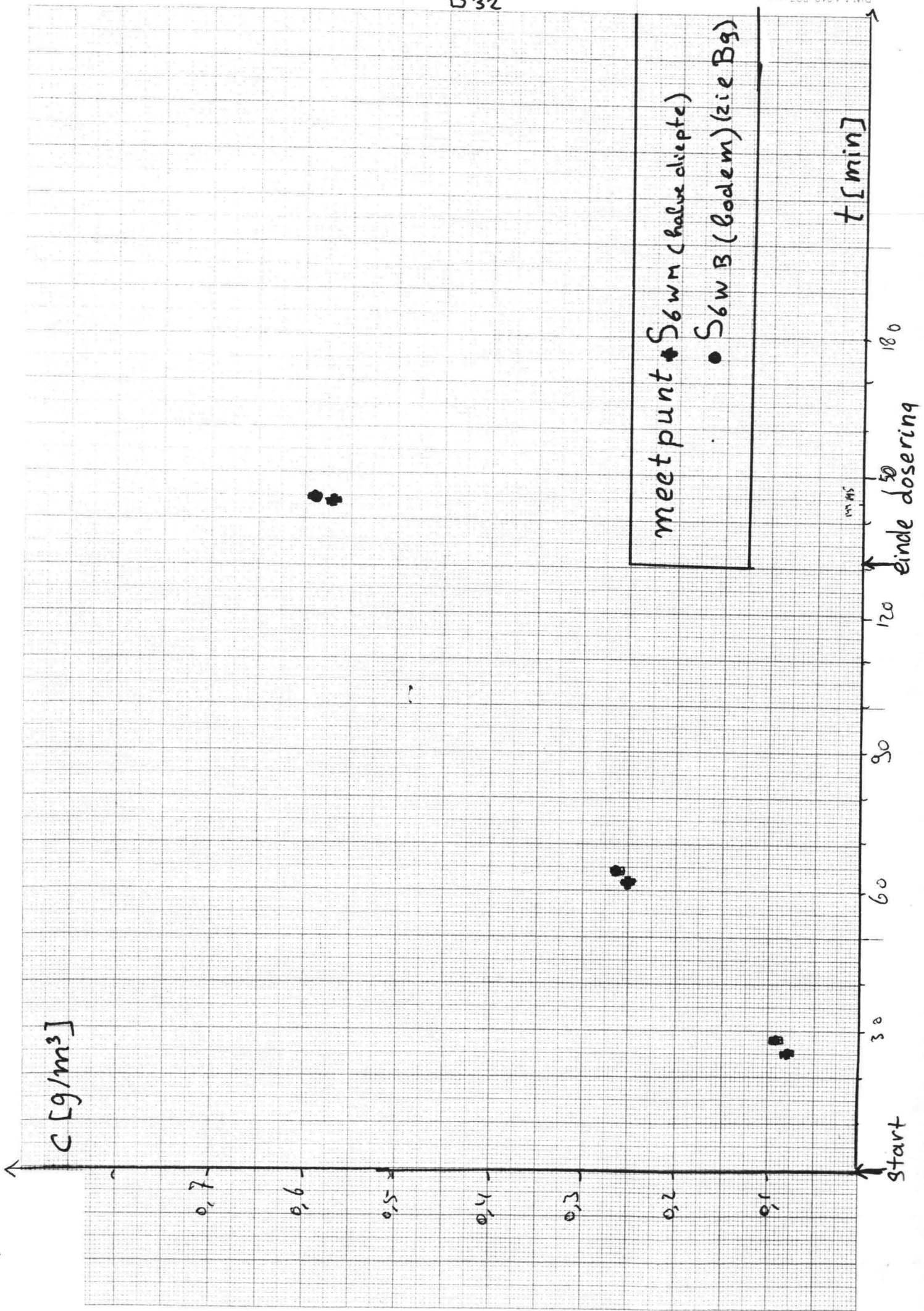




B30







Bijlage 4

Afleiding formule voor
bepaling van $E_j(t)$ uit de
metingen. (§ 4.1)

uit vgl. 1 en de gegevens : $C_j(t+\Delta t) = \int_0^{t+\Delta t} [\phi/Q + C(t+\Delta t-\tau)] E_j(\tau) d\tau$

$$= \int_0^t [\phi/Q + C(t+\Delta t-\tau)] E_j(\tau) d\tau + \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} [\phi/Q + C(t+\Delta t-\tau)] E_j(\tau) d\tau}_{*}$$

$$* \approx \frac{\Delta t}{2} \left[\phi/Q \{ E_j(t) + E_j(t+\Delta t) \} + \underbrace{C(\Delta t) E_j(t) + C(0) E_j(t+\Delta t)}_{= 0, \text{ mits } \Delta t \leq 20 \text{ min } (T_0)} \right]$$

$$\Rightarrow C_j(t+\Delta t) \approx \int_0^t \left[\phi/Q + C(t-\tau) + \frac{\partial C(t-\tau)}{\partial t} \Delta t \right] E_j(\tau) d\tau + \frac{\Delta t}{2} \frac{\phi}{Q} [E_j(t) + E_j(t+\Delta t)]$$

$$\Rightarrow C_j(t+\Delta t) = C_j(t) + \Delta t \left[\underbrace{\int_0^t \frac{\partial C(t-\tau)}{\partial t} E_j(\tau) d\tau}_{= a \int_0^{t-T_0} E_j(\tau) d\tau} + \frac{1}{2} \phi/Q \{ E_j(t) + E_j(t+\Delta t) \} \right]$$

$$\Rightarrow E_j(t+\Delta t) = \frac{2Q}{\phi} \left[\frac{C_j(t+\Delta t) - C_j(t)}{\Delta t} - a \int_0^{t-T_0} E_j(\tau) d\tau \right] - E_j(t)$$

Bijlage 5 Uitwerking integraal uit §4.2.2 ad c)

$$\begin{aligned}
& a \int_{T_{Pj}}^{t-T_0} (t-T_0-\tau) \frac{1}{T_{mj}} e^{-1/T_{mj}(\tau-T_{Pj})} d\tau \\
&= \frac{a}{T_{mj}} \left\{ \int_{T_{Pj}}^{t-T_0} (t-T_0) e^{-1/T_{mj}(\tau-T_{Pj})} d\tau - \int_{T_{Pj}}^{t-T_0} \tau e^{-1/T_{mj}(\tau-T_{Pj})} d\tau \right\} \\
&= \frac{a}{T_{mj}} \left\{ -t T_{mj} \left[e^{-1/T_{mj}(\tau-T_{Pj})} \right]_{T_{Pj}}^{t-T_0} + T_{mj}^2 \left[\left(\frac{\tau}{T_{mj}} + 1 \right) e^{-1/T_{mj}(\tau-T_{Pj})} \right]_{T_{Pj}}^{t-T_0} \right\} \\
&= a \left\{ (T_0-t) \left[e^{-1/T_{mj}(t-T_0-T_{Pj})} - 1 \right] + T_{mj} \left[\left(\frac{t-T_0}{T_{mj}} + 1 \right) e^{-1/T_{mj}(t-T_0-T_{Pj})} - \left(\frac{T_{Pj}}{T_{mj}} + 1 \right) \right] \right\} \\
&= a \left\{ t + T_{mj} e^{-1/T_{mj}(t-T_0-T_{Pj})} - (T_0 + T_{Pj} + T_{mj}) \right\}
\end{aligned}$$

Bijlage 6

Bepaling formule voor T_{mj} uit de meetgegevens via afgeleide van $c_j(t)$. § 4.2.3.

tot $t = T_e + T_{Pj}$ geldt voor $c_j(t)$:

$$c_j(t) = \varphi/Q [1 - e^{-1/T_{mj}(t-T_{Pj})}] + \frac{1}{T_{mj}} \int_{T_{Pj}}^{t-T_0} c(t-\tau) e^{-1/T_{mj}(\tau-T_{Pj})} d\tau \quad (a)$$

$$\Rightarrow \frac{dc_j}{dt} = \frac{1}{T_{mj}} \varphi/Q e^{-1/T_{mj}(t-T_{Pj})} + c(T_0) + \frac{1}{T_{mj}} \int_{T_{Pj}}^{t-T_0} \underbrace{\frac{\partial c(t-\tau)}{\partial t}}_{= -\frac{\partial c(t-\tau)}{\partial \tau}} e^{-1/T_{mj}(\tau-T_{Pj})} d\tau$$

met partiële integratie

$$\Rightarrow \frac{dc_j}{dt} = \frac{1}{T_{mj}} \varphi/Q e^{-1/T_{mj}(t-T_{Pj})} - \frac{1}{T_{mj}} \left\{ [c(t-\tau) e^{-1/T_{mj}(t-T_{Pj})}] \right\}_{T_{Pj}}^{t-T_0} + \int_{T_{Pj}}^{t-T_0} c(t-\tau) \frac{1}{T_{mj}} e^{-1/T_{mj}(\tau-T_{Pj})} d\tau$$

- elimineren met (a)

$$\Rightarrow \frac{dc_j}{dt} = \frac{1}{T_{mj}} \varphi/Q e^{-1/T_{mj}(t-T_{Pj})} + \frac{1}{T_{mj}} c(t-T_0) + \frac{1}{T_{mj}} \frac{\varphi}{Q} [1 - e^{-1/T_{mj}(t-T_{Pj})}] - \frac{1}{T_{mj}} c_j(t)$$

$$\Rightarrow \frac{dc_j}{dt} + \frac{1}{T_{mj}} c_j(t) = \frac{1}{T_{mj}} c(t-T_0) + \frac{1}{T_{mj}} \varphi/Q$$

$$\Rightarrow T_{mj} = \{ \varphi/Q + c(t-T_0) - c_j(t) \} / \left(\frac{dc_j}{dt} \right)$$

