

RIJKSINSTITUUT VOOR
VOLKSGEZONDHEID EN MILIEU
BILTHOVEN

Rapport nr.771402013

**Verspreiding van emissies uit secundaire grondstoffen
in bodems**

Deel 1. Kolomexperimenten.

P.M. Dekker, L.G. Wesselink en P.G.M. de Wilde

maart 1996

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van het Directoraat Generaal Milieubeheer, Directie Bodem in het kader van project nr.771402

This investigation has been performed in order and for the account of the Directorate General for Environmental Protection, Ministry of Housing, Physical Planning and Environment within the framework of project 771402

Rijksinstituut voor volksgezondheid en Milieu, Postbus 1, 3720 BA Bilthoven,
tel. 030-2749111, fax 030-2742971

VERZENDLIJST

- 1-6 Directie Bodem, Directoraat-Generaal Milieubeheer
- 7 Plv. Directeur-Generaal Milieubeheer, Dr.ir. B.C.J. Zoeteman
- 8 Mr. A.B. Holtkamp, Directie Bodem
- 9 Mr.drs. L.J.J. Gravesteijn, Directie Bodem
- 10 Drs. A.J.C.W.M. de Kort, Directie Afvalstoffen
- 11 Ir. R.T. Eikelboom, Directie Bodem
- 12 Prof.dr. W.H. van Riemsdijk, LUW
- 13-23 Normcommissie 39011
- 24-36 Leden Taakgroep Onderzoek (TGO)
- 37 Depot Nederlandse Publikaties en Nederlandse Bibliografie
- 38 Directie van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne
- 39 Prof. ir. N.D. van Egmond
- 40 Ir. F. Langeweg
- 41 Drs. L.H.M. Kohsiek
- 42 Dr. Th.G. Aalbers
- 43-45 Auteurs
- 46 Hoofd Voorlichting en Public Relations, RIVM
- 47 Bureau Projecten- en Rapportenregistratie, RIVM
- 48-49 Bibliotheek RIVM
- 50-80 Reserve exemplaren ten behoeve van Bureau Rapportenbeheer
- 81-90 Reserve exemplaren

INHOUDSOPGAVE

	<u>Blz.</u>
VERZENDLIJST	2
INHOUDSOPGAVE	3
ABSTRACT	5
SAMENVATTING	6
1 INLEIDING	7
1.1 Algemeen	7
1.2 Kolomexperimenten	8
2 MATERIAAL EN METHODEN	9
2.1 Monstermateriaal en monsterneming	9
2.2 Monstervoorbehandeling	10
2.3 Samenstellingsonderzoek	10
2.3.1 Ontsluiting met waterstoffluoride	10
2.3.2 Organisch koolstof, lutum, Al _{ox} en Fe _{ox}	10
2.4 Analysemethoden	10
2.4.1 Metalen	10
2.4.2 Anionen	11
2.5 Berekening cumulatieve immissie en emissie	11
3 EXPERIMENTEEL	13
3.1 Uitloogonderzoek	13
3.2 Conditioneren grond met synthetisch grondwater	13
3.3 Kolomproef	14
3.4 Behandeling percolatiewater	17
4 RESULTATEN	18
4.1 Vaste fase samenstelling	18
4.2 Uitloging	20

5	DISCUSSIE	26
	5.1 Statistische evaluatie	26
	5.2 Vergelijking uitloging met referentie-experiment	38
	5.3 U1-normen en streefwaarden grondwater	40
	5.4 Beluchten/niet beluchten	42
	5.5 Deeltjestransport	44
6	CONCLUSIES	46
	REFERENTIES	48
	BIJLAGEN	
	1. Resultaten fosforslakproef	49
	2. Resultaten staalslakproef	81
	3. Resultaten AVI-bodemasproef	109

ABSTRACT

When alkaline contaminant-holding waste materials are re-used in the environment their percolates may strongly alter the chemistry of the soil and groundwater underneath. We carried out laboratory column experiments to study this. Three alkaline solid waste materials, phosphorus slag, steel slag and MSWI bottom ash were percolated with artificial acid rain water. Subsequently, waste percolates were passed through different sandy soils with varying soil properties. The mobility of chemical components in the soil columns was linearly correlated to soil properties like organic carbon and hydrous oxide content of the soils.

SAMENVATTING

Onderzoek is verricht naar de verspreiding in de bodem van emissies uit secundaire grondstoffen. Hiertoe zijn in het laboratorium 3 kolomproeven uitgevoerd. Per proef is een alkalische secundaire grondstof uitgelooft met pH4 water; vervolgens is dit percolaat over verschillende typen bodems geleid. Als secundaire grondstoffen zijn fosforslak, staalslak respectievelijk AVI-bodemas onderzocht. In totaal zijn een 7-tal gronden met variërend organisch koolstof-, klei-, en oxide-gehalte in het onderzoek meegenomen.

Uit het onderzoek bleek dat stoffen die sterk uitlogen uit secundaire grondstoffen (*Ba* uit staalslak, *F* uit fosforslak en *F*, *Mo*, *Sb* en *Cu* uit AVI-bodemas, *Ca* uit alle alkalische secundaire grondstoffen) in meer of minder mate worden gebonden in de onderliggende bodem. De mate van binding bleek linear gecorreleerd met het organisch koolstof gehalte danwel het oxalaat extraheerbaar Fe+Al-gehalte van de onderzochte gronden. Alkalisch reststofpercolaat mobiliseerde de 'bodem-eigen' chemische componenten Zn, As en Sb sterker dan pH4 water (referentie experiment), terwijl voor Cu het omgekeerde gold.

De resultaten van dit onderzoek worden in deelrapport-2 verder uitgewerkt tot bindings(sorptie)vergelijkingen waarmee de verspreiding van reststof-componenten in de bodem modelmatig kan worden berekend.

1 INLEIDING

1.1 Algemeen

Het rest- en afvalstoffenbeleid in Nederland is gericht op het reduceren van storten en het bevorderen van het hergebruik van afvalstoffen als secundaire grondstof in praktijktoepassingen in weg- en waterbouw (Notitie afvalpreventie, 1988; NMP). In deze afvalstoffen kunnen milieuvervuilende stoffen geconcentreerd zijn, welke door uitloging bodem, grond- en oppervlaktewater kunnen verontreinigen. Ter bescherming daarvan zijn daarom in het ontwerp Bouwstoffenbesluit (oBB) maximaal toelaatbare belastingen van de bodem en oppervlaktewater vanuit een toepassing van afvalstoffen in weg- en waterbouw omschreven [1].

Ten behoeve van de in het Bouwstoffenbesluit geformuleerde toetsingsprocedure voor de milieuhygiënische beoordeling van bouwmaterialen is een set gestandaardiseerde voorschriften (monsterneming, analyse, uitloogtesten) ontwikkeld. Dit heeft in opdracht van DGM plaatsgevonden binnen het kader van het zogenaamde *taakstellend plan 'Uitloogkarakterisering van bouwmaterialen en afvalstoffen'* (TSP-1). Naast het ontwikkelen van gestandaardiseerde voorschriften werd in het kader van TSP-1 onderzoek verricht naar mechanismen van uitloging van bouwmaterialen en verspreiding van uitgeloopte componenten in het milieu, met name de bodem. In dat kader werd het hier gerapporteerde project getiteld "*Modelleringsaspecten van risico-evaluatie van gedrag van stoffen in de bodem afkomstig van uitloging van afvalstoffen*" uitgevoerd. Doelstellingen van dit project waren:

- i) Het ontwikkelen van een multi-component transport model [2] ter onderbouwing van de in het kader van het Bouwstoffenbesluit ontwikkelde regelgeving.
- ii) Toetsing van het model ECOSAT op verschillende secundaire grondstof + bodem systemen, door middel van laboratorium-kolomexperimenten.

Het project werd uitgevoerd in een samenwerking tussen de Landbouwuniversiteit Wageningen (LUW, vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding) en het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM-LAE, afdeling Meetmethoden). Daarbij vond de ontwikkeling van het model ECOSAT plaats aan de LUW en werden de laboratorium experimenten en de toetsing van het model ECOSAT uitgevoerd door het RIVM.

Het onderzoek dat door het RIVM werd uitgevoerd is opgesplitst in een tweetal deelonderzoeken. Van elk deelonderzoek is een afzonderlijk en op zichzelf staand deelrapport vervaardigd. In voorliggend **deelrapport 1** worden opzet en resultaten van de laboratorium kolomexperimenten besproken, en wordt onderzocht in hoeverre het transportgedrag in de bodems van diverse componenten uit de reststoffen gerelateerd is aan bodemeigenschappen (o.a organisch koolstof gehalte). In **deelrapport 2** (Modellering) worden deze relaties verder bewerkt tot bindings(sorptie)vergelijkingen, geïmplementeerd in ECOSAT en wordt vervolgens het model getoetst aan de kolomexperimenten.

1.2 Kolomexperimenten

Om de bodemprocessen in het ECOSAT model te parameteriseren en vervolgens te toetsen zijn in het laboratorium diverse kolomproeven uitgevoerd. In dit kader is nagegaan:

- in hoeverre uit een secundaire grondstoftoepassing geëmitteerde metalen accumuleren in de bodem danwel doorspoelen naar het grondwater. Van belang daarbij zijn met name de 'kritische' componenten waarvan de uitloging uit reststoffen de in het Bouwstoffenbesluit gestelde normen overschrijdt
- wat de invloed is van geëmitteerde macro-elementen (bv. Ca) op de mobiliteit van reeds in de bodem aanwezige ('bodem-eigen') elementen, zoals zware metalen
- in hoeverre in de gronden naast transport van opgeloste stoffen ook transport aan colloïdale deeltjes van belang is.

In het laboratorium zijn kolomproeven uitgevoerd waarbij een secundaire grondstof in een grote kolom is uitgeloogd met pH4 water. Vervolgens zijn met het percolaat van de secundaire grondstof verschillende type bodems gepercoleerd. De volgende variabelen zijn onderzocht:

- a) *secundaire grondstoffen*: gekozen is voor alkalische secundaire grondstoffen, die veelvuldig in de praktijk worden toegepast, nl. fosforslak, staalslak en AVI-bodemas
- b) *bodems*: bodems met verschillende gehalten aan organische stof, lutum en oxalaat extraheerbaar Al en Fe, om het effect hiervan op de mobiliteit van metalen en anionen in de bodems te kwantificeren,
- c) *percolaatfiltraties*: filtratie van percolaten van de secundaire grondstoffen en gronden over 0.05 μm - en 0.45 μm -filters om onderscheid te maken tussen transport van metalen en anionen aan colloïdale deeltjes (0.05 - 0.45 μm) en transport van opgeloste stoffen (< 0.05 μm).
- d) *uitloogcondities*: niet beluchten en beluchten van het percolaat van de secundaire grondstof, om het effect van anaërobe en aërobe condities op de mobiliteit van metalen en anionen in de bodem te bestuderen,

2 MATERIAAL EN METHODEN

2.1 Monsterneming en monsterneming

Het onderzoek is verricht aan 3 secundaire grondstoffen (tabel 1) die in afzonderlijke experimenten zijn uitgelooft met pH4 water.

Tabel 1. Monsterneming secundaire grondstoffen.

secundaire grondstof	locatie	tijdstip	hoeveelheid	bewaarcondities
fosforslak	Rithem (Pelt & Hooykaas)	februari 1991	350 kg	droog, kamertemp.
staalslak ¹⁾	IJmuiden (Hoogovens)	maart 1993	200 kg	droog, kamertemp.
AVI-bodemass ²⁾	Rijnmond (AVR)	januari 1994	150 kg	droog, kamertemp.

¹⁾ In praktijk wordt bij omzetting van ruwijzer in staal de reststof staalslak gekoeld met zeewater. Bij de monsterneming van staalslak is slak bemonsterd die aan de lucht was gekoeld.

²⁾ AVI-bodemass is een reststof die tijdens het verweringsproces carbonatiseert. In dit onderzoek is ervoor gekozen een AVI-bodemass te bemonsteren die 1.5 jaar oud was.

Met de percolaten afkomstig van de secundaire grondstoffen zijn verschillende gronden gepercoleerd. Bij de keuze van de gronden is een variatie opgelegd aan het gehalte aan organisch koolstof, lutum, oxalaat extraheerbaar Al (Al_{ox}) en Fe (Fe_{ox}). Deze gehalten staan vermeld in tabel 2.

Tabel 2. Monsterneming gronden en algemene bodemeigenschappen.

locatie	tijdstip	pH	org.C (%)	lutum (%)	Al_{ox} (mmol/kg)	Fe_{ox} (mmol/kg)
Fochteloërveen-b	januari 1990	3.7	5.5	2.0	55.5	5.7
Kleibos-o	maart 1990	4.5	2.1	17	19.3	20.7
Beverweert-b	mei 1990	5.3	3.4	28	49.7	109.3
Filosofendal-o	oktober 1991	4.7	0.7	3.5	14.9	10.7
Filosofendal-b	oktober 1991	4.2	2.2	2.2	19.6	24.0
RIVM-o	september 1991	6.0	0.1	1.3	15.8	1.6
Wildrijk-o	november 1991	4.2	0.4	0.5	1.3	1.2

o = ondergrond / b = bovengrond

Monsterneming op de locaties vond plaats in het kader van het onderzoek "Beoordeling van gereinigde grond" [3]. De diepte waarbij de monsterneming van de ondergrond heeft plaats gevonden varieert tussen de 0.2 en 1.5 m beneden maaiveld. De bovengrond is bemonsterd tussen 0 en 0.1 m beneden maaiveld.

2.2 Monstervoorbehandeling

De secundaire grondstoffen fosforslak en AVI-bodemas zijn na monsterneming niet voorbehandeld. Staalslak is m.b.v. een bekkenbreker gebroken tot een korrelgrootte kleiner dan 4 cm.

De grondmonsters zijn bij kamertemperatuur gedroogd en gezeefd over een 4.0 mm zeef om eventuele wortels en grind te verwijderen. Na het drogen zijn de monsters verdeeld met een roterende flessenverdeler tot submonsters van 1 kg voor uitloogproeven. De secundaire grondstoffen en gronden zijn droog bij kamertemperatuur bewaard.

2.3 Samenstellingsonderzoek

2.3.1 Ontsluiting met waterstoffluoride

De totale samenstelling van een grond is bepaald door eerst het monster te destruieren met waterstoffluoride volgens Silberman en Fisher. Daarna is in het destruaat het gehalte van een aantal metalen en anionen bepaald. Destrukatie van een monster met salpeterzuur en zoutzuur (koningswater) is voor elementen ingesloten in een kiezelzuurskelet niet volledig. Destrukatie met waterstoffluoride geeft een volledige ontsluiting en heeft daarom de voorkeur.

2.3.2 Organisch koolstof, lutum, Al_{ox} en Fe_{ox}

Het organisch koolstof gehalte is bepaald door een gemalen monster aan de lucht te gloeien bij 850°C waardoor CO₂ wordt gevormd. Uit de hoeveelheid gevormd CO₂, gemeten tijdens het gloeien, is het gehalte organisch koolstof berekend, waarbij gecorrigeerd is voor de anorganische koolstofverbindingen.

De bepaling van het lutumgehalte is uitgevoerd volgens de pipetmethode en berust op een verschil in valsnelheid van deeltjes met verschillende diameter volgens de wet van Stokes.

Het gehalte aan oxalaat extraheerbaar Al en Fe in grond is bepaald door het monster te extraheren met NH₄-oxalaat: 1 gram luchtdroge grond is geschud met 50 ml 0.1M NH₄-oxalaat bij pH3 gedurende 4 uur in het donker [4]. Oxalaat extraheert secundaire, amorphe, hydroxiden waarop anionen specifiek kunnen adsorberen (o.a PO₄, [5]).

2.4 Analysemethoden

2.4.1 Metalen

De destruat en aangezuurde percolaten (pH<2) zijn na filtratie geanalyseerd op de volgende metalen: Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sn, V en Zn. De meeste metalen zijn geanalyseerd met behulp van een geïnduceerd gekoppeld plasma, Spectro-M5 (Atomaire Emissie Spectrometrie).

De overige metalen zijn geanalyseerd met behulp van een grafietoven met zeeman achtergrond correctie, Perkin Elmer Zeeman 5000 (Atomaire Absorptie Spectrometrie). In tabel 3 is een overzicht gegeven van de analysemethoden met de bijbehorende voorschriften en onderste analysegrenzen.

De onderste analysegrens is het laagst gemeten gehalte waaruit de aanwezigheid van een element met een redelijke statistische zekerheid kan worden afgeleid. Dit is gelijk aan drie keer de standaardafwijking van de gemeten eenheid van meer dan 10 representatieve controlestandaarden. De zekerheid wordt dan 93% en de kans op een vals negatief of een vals positief resultaat 7%.

2.4.2 Anionen

In de percolaten zijn de volgende anionen geanalyseerd: Br, Cl, F, CO₃, NO₃, PO₄ en SO₄. Bromide, Cl, NO₃ en SO₄ zijn gemeten met behulp van ionchromatografie, Dionex-2000i. Fluoride is gemeten met een ionselectieve elektrode (Radiometer F1052F) ten opzichte van een single junction Hg/HgCl₂ referentie-elektrode. Voor F-bepalingen is aan het monster TISAB III toegevoegd in de verhouding monster : TISAB = 10 : 1.

TISAB (total ionic strength adjustment buffer) is toegevoegd omdat een elektrochemische bepaling van F in oplossingen een constante ionsterkte vereist en een pH tussen 5 en 7. Carbonaat is bepaald door titratie van het monster met verdund zoutzuur (20 mmol/l) tot pH 8.3 en waterstofcarbonaat is bepaald door titratie tot pH 4.3. Fosfaat is fotometrisch bepaald met behulp van een autoanalyzer. Tabel 3 geeft de analysemethoden met bijbehorende voorschriften en onderste analysegrenzen weer.

2.5 Berekening cumulatieve immissie en emissie

Eluaatfluxen in (immissie) en uit (emissie) de grondkolommen zijn berekend volgens:

$$E_N = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{L_n}{S} * c_n \quad \text{formule 1}$$

waarin: E_N = cumulatieve immissie/emissie t/m fractie N in mg/kgds
 L_n/S = vloeistof/grond verhouding van fractie n in l/kgds
 c_n = gemeten concentratie in fractie n van percolaat van een
 secundaire grondstof (immissie) of
 grond (emissie) in mg/l

In de berekening van de cumulatieve immissie en emissie is de onderste analysegrens ingevuld als de gemeten concentratie kleiner was dan de onderste analysegrens.

Tabel 3. Overzicht analysemethoden, voorschriften en onderste analysegrenzen.

stof	analysemethode	voorschrift #	onderste analysegrens
Al	ICP/AES	LAE/MM-M013	100 µg/l
As	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	2.5 µg/l
Ba	ICP/AES	LAE/MM-M013	10 µg/l
Ca	ICP/AES	LAE/MM-M013	1.0 mg/l
Cd	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	0.1 µg/l
Co	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	2.0 µg/l
Cr	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	2.0 µg/l
Cu	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	5.0 µg/l
Fe	ICP/AES	LAE/MM-M013	20 µg/l
K	ICP/AES	LAE/MM-M013	0.3 mg/l
Mg	ICP/AES	LAE/MM-M013	0.05 mg/l
Mn	ICP/AES	LAE/MM-M013	50 µg/l
Mo	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	2.5 µg/l
Na	ICP/AES	LAE/MM-M013	1.0 mg/l
Ni	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	5.0 µg/l
Pb	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	3.0 µg/l
Sb	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	2.5 µg/l
Se	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	2.0 µg/l
Si	ICP/AES	LAE/MM-M013	0.1 mg/l
Sn	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	5.0 µg/l
V	grafietoven/AAS	LAE/MM-M012	2.5 µg/l
Zn	ICP/AES	LAE/MM-M013	15 µg/l
Br	ion-chromatografie	LAC-voorschrift	0.03 mg/l
Cl	ion-chromatografie	LAC-M210	0.04 mg/l
F	ion-selectieve elektrode	NEN 6483	0.16 mg/l
CO ₃	titrimetrisch	LAC-M045	0.5 mg/l
NO ₃	ion-chromatografie	LAC-M210	0.06 mg/l
PO ₄	fotometrisch	LAC-M064	10 µg/l
SO ₄	ion-chromatografie	LAC-M210	0.1 mg/l

* vermelde LAE- en LAC-voorschriften zijn SOP-nr's

3. EXPERIMENTEEL

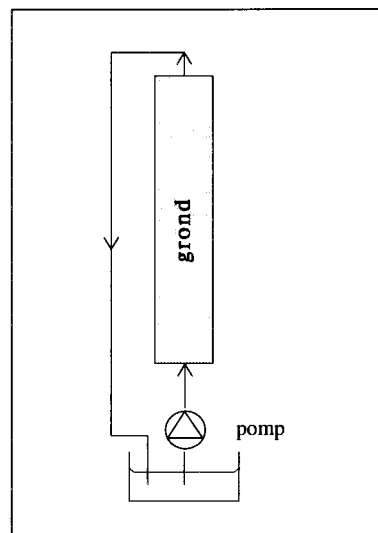
3.1 Uitloogonderzoek

De standaard kolomproef is ontwikkeld voor de bepaling van de uitloogbaarheid van anorganische stoffen uit korrelvormige materialen en afvalstoffen [6]. De kolomproef geeft inzicht in de uitloogbaarheid voor de korte en middellange termijn, $L/S = 0-10$. Met deze proef kan als functie van de vloeistof/vaste stof verhouding (L/S in l/kg) zowel het concentratieverloop als het emissieverloop worden bepaald. Het uitlooggedrag van (zware) metalen en anionen uit secundaire grondstoffen en de effecten hiervan op de onderliggende bodems is bepaald aan de hand van de volgende drie proeven:

- proef 1: *Fosforslak*
- proef 2: *Staalslak*
- proef 3: *AVI-bodemas*

3.2 Conditioneren grond met synthetisch grondwater

Voorafgaand aan een kolomexperiment werden de luchtdroge gronden geconditioneerd met synthetisch grondwater, zoals in figuur 1 schematisch is weergegeven.



Figuur 1. Percoleren grond met synthetisch grondwater.

Er werd een geringe overmaat aan synthetisch grondwater¹⁾ gedurende 5 dagen rondgepompt. Het synthetisch grondwater werd vóór het conditioneren van de grondkolommen op de zuurgraad van de bodem ingesteld. De zuurgraad van de bodem is bepaald door de grond uit te schudden met synthetisch grondwater bij een vloeistof/grond verhouding van 1. De concentraties van macro-componenten in grondwater zijn vermeld in tab. 4.

¹⁾ In totaal is ca. 1.5 porievolume rondgepompt, d.w.z. een overmaat van 0.5 porievolume, hetgeen overeenkomt met een L/S van ca. 0.2. Door het geringe volume aan conditioneerpercolaat is het effect van de conditionering op de evenwichtssamenstelling van de gronden beperkt geweest.

Tabel 4. Concentraties macro-componenten in grondwater.

parameter	grondwater *	synthetisch grondwater **
pH	5.6	4.2 - 5.7 ***
K	2.4 mg/l	1.9 mg/l
Ca	21 mg/l	16 mg/l
Na	13 mg/l	12 mg/l
Mg	4.7 mg/l	4.8 mg/l
Cl	24 mg/l	30 mg/l
SO ₄	40 mg/l	43 mg/l

* Gemiddelde concentraties in het grondwater op 10 m-mv in natuurgebieden.

** Oplossing van 0.4 mM CaCl₂ + 0.05 mM KCl + 0.25 mM Na₂SO₄ + 0.2 mM MgSO₄.

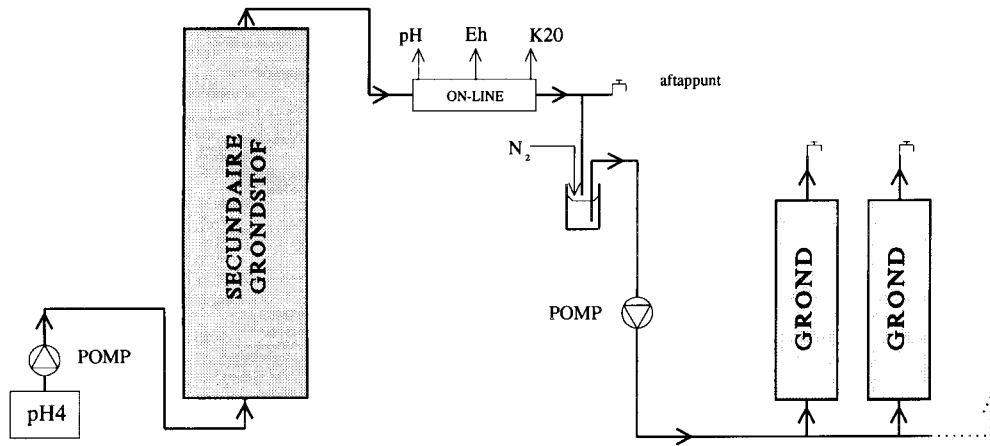
*** De zuurgraad is zoveel mogelijk ingesteld op zuurgraad van de grond.

3.3 Kolomproef

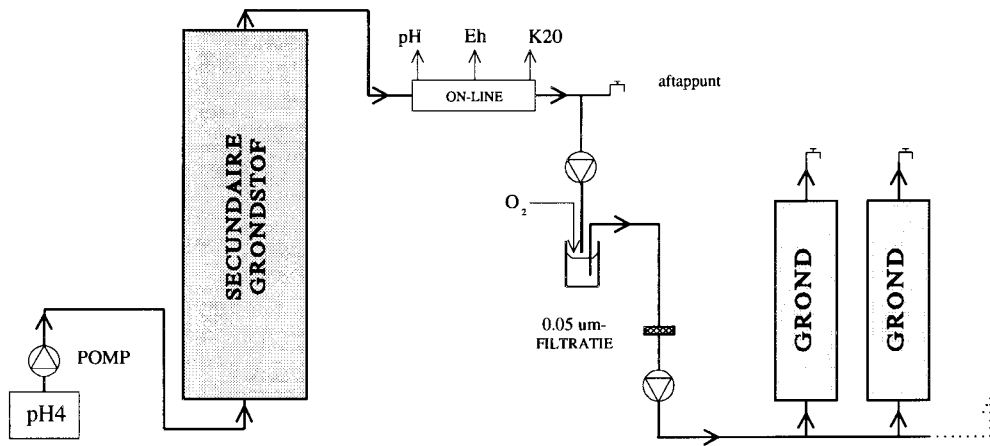
In 3 afzonderlijke proeven werden fosforslak (90 kg ds), staalslak (90 kg ds) respectievelijk AVI-bodemas (60 kg ds) in enkelvoud uitgelooft in een grote kolom met een diameter van 30 cm (figuur 2). De percolaties werden met een constante snelheid upflow uitgevoerd met demiwater dat met salpeterzuur was aangezuurd tot pH=4. In de standaard kolomproef is de percolatiesnelheid 0.5 l/kg per dag. De percolatiesnelheid in dit onderzoek was 0.2 in plaats van 0.5 l/kg per dag. Hiervoor is gekozen om het percolatiewater zoveel mogelijk in evenwicht te laten komen met het uit te logen materiaal. In het gebruikte model wordt namelijk geen rekening gehouden met kinetiek. Er wordt bij de berekening uitgegaan van een instantaan evenwicht. In de fosforslak- en staalslakproef werd 18 liter per dag door de secundaire grondstof gepercoleerd en in de AVI-bodemasproef 12 liter per dag. Het percolaat afkomstig van de secundaire grondstoffen werd voor een deel met stikstof doorgeleid voor de zogenaamde 'niet beluchte' kolomproeven (figuur 2A). Het doorleiden met stikstof had tot doel anaërobe (reducerende) omstandigheden in het percolaat van de secundaire grondstof te creëren én het neerslaan van bv. CaCO₃ te voorkomen.

Het andere deel van het percolaat van de secundaire grondstof werd in fracties opgevangen. Deze fracties werden deels gebruikt voor analyse van (zware) metalen en anionen en deels, na beluchten en filtreren over een 0.05 µm-filter, voor de zogenaamde 'beluchte' kolomproeven (figuur 2B). Het beluchten en filtreren had tot doel het percolaat van de secundaire grondstof in evenwicht te laten komen met de atmosfeer en eventueel gevormde neerslagen zoals CaCO₃ te verwijderen. Bij beluchten van het percolaat afkomstig van de verouderde (1.5 jaar) AVI-bodemas werd geen neerslag gevormd. Het percolaat van deze verouderde slak werd om deze reden niet belucht.

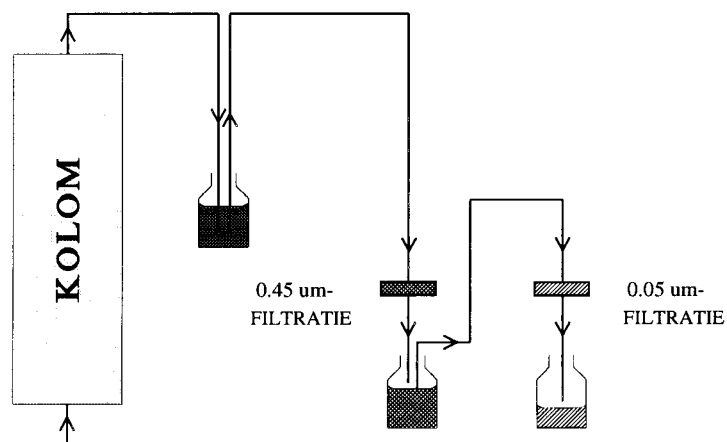
Figuur 2A. Schematische weergave kolomproef, **niet belucht**.



Figuur 2B. Schematische weergave kolomproef, **belucht**.



Figuur 2C. Schematische weergave **filtratie** percolaten.



Met zowel de niet beluchte als de beluchte percolaten van de secundaire grondstoffen werden verschillende type bodems (tabel 2) in enkelvoud gepercoleerd in glazen kolommen met een diameter van 5 cm (figuur 2). De percolaties werden upflow uitgevoerd met een constante snelheid van 200 ml per dag. In de fosforslak- en staalslakproef waren de inwegen van de grondmonsters 1 kg zodat de percolatiesnelheid per grondkolom 0.2 l/kg per dag was. In de AVI-bodemasproef waren de inwegen van de grondmonsters 0.5 kg zodat de percolatiesnelheid per grondkolom 0.4 l/kg per dag was. De kolommen waren tijdens percoleren met folie afgedekt om microbiële groei onder invloed van licht tegen te gaan. Het percolatiewater dat de grondkolommen met een constante snelheid verliet werd in frakties opgevangen. De proeven werden uitgevoerd totdat een doorbraak van onder andere fluoride plaats vond.

In de output van zowel de secundaire grondstoffen als de gronden is on-line²⁾ de redoxpotentiaal gemeten met een in een doorstroomcel geplaatste gecombineerde platina elektrode (Platina-Ag/AgCl) [7]. Na filtratie van de percolaten van de secundaire grondstoffen en gronden zijn de pH en geleidbaarheid bepaald. In de percolaten van de secundaire grondstoffen en gronden van de staalslak- en AVI-bodemasproef is de pH ook on-line bepaald om de invloed van CO₂ uit de lucht op de zuurgraad van de percolaten te voorkomen. In de staalslak- en AVI-bodemaspercolaten is tevens de geleidbaarheid on-line bepaald.

In tabel 5 is per secundaire grondstof weergegeven welke gronden met belucht en/of niet belucht percolaat van de secundaire grondstof zijn gepercoleerd.

Tabel 5. Gronden die met belucht/niet belucht percolaat van een secundaire grondstof zijn gepercoleerd.

grond	fosforslak	staalslak	AVI-bodemas
Fochteloërveen-b	-	-	niet belucht
Kleibos-o	-	-	niet belucht
Beverweert-b	-	-	niet belucht
Filosofendal-o	belucht	belucht	niet belucht
Filosofendal-b	niet belucht / belucht	niet belucht / belucht	niet belucht
RIVM-o	niet belucht / belucht	niet belucht / belucht	-
Wildrijk-o	belucht	belucht	-

²⁾ on-line: bepaling pH, redoxpotentiaal (Eh) en geleidbaarheid (K₂₀) in de output van een kolomproef voordat een percolaatfractie wordt opgevangen (Figuur 2).

3.4 Behandeling percolatiewater

Het percolatiewater afkomstig van de secundaire grondstoffen en gronden is voor zowel de niet beluchte als de beluchte kolomproeven in frakties opgevangen voor de analyse van (zware) metalen en anionen. De opgevangen frakties zijn gefiltreerd over een 0.45 µm-filter. Vervolgens is een gedeelte van elke 0.45 µm-fractie gefiltreerd over een 0.05 µm-filter (figuur 2C). Hierdoor is geprobeerd onderscheid te maken tussen transport van opgeloste stoffen (< 0.05 µm) en transport van colloïdale deeltjes (0.05 - 0.45 µm). Het transport van stoffen aan colloïdale deeltjes wordt ook wel facilitated (dragergebonden) transport genoemd [8]. Door filtratie over een 0.05 µm- en een 0.45 µm-filter kan dus worden bepaald of facilitated transport optreedt en zo ja in welke mate.

In de standaard kolomtest vindt on-line filtratie plaats door bovenin de kolom een 0.45 µm-filter te plaatsen. Er is gekozen om de percolaatfrakties pas te filtreren nadat ze waren opgevangen in een fles omdat de kolomproeven gedurende een lange periode werden uitgevoerd. Tijdens deze periode zou bij on-line filtreren het filter verstopt kunnen raken of zelfs kunnen verteren.

Een deel van het gefiltreerde percolaat werd met salpeterzuur aangezuurd tot pH<2 voor metaalanalyses (100 ml). Het restant (maximaal 250 ml) werd in een koelkast bewaard (ca. 7°C) voor analyse van anionen.

4 RESULTATEN

4.1 Vaste fase samenstelling

Tabel 6 geeft de gemiddelde samenstellingen van secundaire grondstoffen, afkomstig uit het ontwerp Bouwstoffenbesluit, Appendix A [1]. Hierbij dient opgemerkt te worden dat tabel 6 de samenstelling geeft van LD-staalslak dat gekoeld is met zeewater. In dit onderzoek is staalslak onderzocht dat gekoeld was aan de lucht. Hierdoor zullen de gehalten aan Cl en SO₄ lager zijn dan gegeven in tabel 6.

Tabel 6. Gemiddelde elementgehalten van secundaire grondstoffen (mg/kg) uit Aalbers et al, Appendix A [1].

stof	fosforslak	staalslak #	AVI-bodemass
As	0.45	1.1	6.0
Ba	127	115	919
Cd	0.47	0.69	4.8
Co	5.6	16	11
Cr	48	954	188
Cu	9.2	13	1591
Mo	9.5	5.1	35
Ni	16	181	123
Pb	6.1	13	1232
Sb	0.68	0.21	26
Se	0.94	0.97	1.0
Sn	4.3	9.2	162
V	22	3292	60
Zn	19	29	1993
Br	4.5	n.a.	18
Cl	432	373	1549
F	27342	247	372
SO ₄	8574	4065	3402

n.a. = niet geanalyseerd

gemiddelde samenstelling van LD-staalslak (Appendix A, [1])

Tabel 7 geeft de samenstellingen van de gronden die bepaald zijn na destructie met koningswater. De analyseresultaten zijn afkomstig uit het rapport 'Beoordeling van gereinigde grond' [3].

Tabel 7. Samenstelling gronden (mg/kg).

stof	Fochteloërveen (b)	Kleibos (o)	Beverweert (b)	Filosofendal (o)	Filosofendal (b)	RIVM # (o)	Wildrijk (o)
Al	n.a.	n.a.	n.a.	12000 #	17000 #	12000	6400 #
As	2.6	8.5	23	2.0	5.5	1.5	< 0.6
Ba	6.0	33	185	14	10	190	4.4
Ca	167	790	3890	169	374	800	67
Cd	0.13	< 0.02	0.08	< 0.02	0.31	< 4.0	< 0.02
Co	< 0.2	2.3	11	1.4	0.8	< 10	< 0.2
Cr	3.7	9.3	38	6.4	6.3	< 15	0.6
Cu	2.3	2.8	26	1.2	3.3	< 15	< 0.4
Fe	n.a.	n.a.	n.a.	4300 #	5600 #	1200	810 #
K	228	644	2340	196	339	7700	180
Mg	120	671	6140	568	414	330	34
Mn	n.a.	n.a.	n.a.	130 #	130 #	15	13 #
Mo	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 50	< 4
Na	59	327	914	99	213	3100	64
Ni	1.9	3.8	40	4.8	3.7	< 10	< 0.2
Pb	7.6	5.5	50	11	29	< 25	1.1
Sb	< 0.6	< 0.6	< 0.6	< 0.6	< 0.6	< 50	< 0.6
Se	< 0.6	< 0.6	< 0.6	< 0.6	< 0.6	< 0.05	< 0.6
Sn	1.1	0.8	21	1.1	2.5	< 25	< 0.6
V	3.4	18	43	6.8	8.1	< 10	1.9
Zn	6.9	16.5	98	13	15	< 25	1.6
Cl	n.a.	n.a.	n.a.	< 15	19	< 15	< 15
F	n.a.	n.a.	n.a.	50	195	20	8.0
SO4	n.a.	n.a.	n.a.	< 50	< 50	< 50	< 50

b = bovengrond

o = ondergrond

n.a. = niet geanalyseerd

metaanalyses uitgevoerd in destuaat afkomstig van destructie van de grond met waterstoffluoride i.p.v. koningswater

4.2 Uitloging

De resultaten van de zuurgraad, redoxpotentiaal³⁾ en geleidbaarheid die gemeten zijn in de percolaten van de fosforslak-, staalslak- en AVI-bodemasproef, zijn weergegeven in respectievelijk bijlage 1, 2 en 3. Deze parameters zijn weergegeven als functie van de cumulatieve vloeistof/vaste stof verhoudingen (cum-L/S). De vloeistof/vaste stof verhoudingen zijn berekend door het fraktievolume (l) te delen door de inweeg (kg) van het kolommateriaal. De cumulatieve L/S verhouding (in l/kg) kan worden omgerekend naar tijd (in dagen) door te delen door de constante percolatiesnelheid (l/kg per dag). In bijlage 1, 2 en 3 zijn tevens de concentraties weergegeven van (zware) metalen en anionen die gemeten zijn in de gefiltreerde percolaatfrakties van de secundaire grondstoffen en gronden. Deze concentraties zijn weergegeven als functie van de cum-L/S. Bij de weergave van de concentraties van de secundaire grondstof is in de grafieken de onderste analysegrens weergegeven met een dikke stippellijn.

De concentraties van metalen en anionen in de percolaatfrakties zijn omgerekend naar cumulatieve immissies respectievelijk cumulatieve emissies van de gronden volgens formule 1. Wanneer de gemeten concentratie kleiner was dan de onderste analysegrens, is in deze berekening de onderste analysegrens ingevuld. In bijlage 1, 2 en 3 zijn de cumulatieve immissies en emissies van metalen en anionen in de gronden uitgezet tegen de cum-L/S. Bij de weergave van de cumulatieve **immissie** is in de grafieken de onderste bepalingsgrens weergegeven met een dikke stippellijn. In deze berekening is per fractie de onderste analysegrens ingevuld.

In tabel 8, 9 en 10 zijn van de fosforslak-, staalslak- respectievelijk AVI-bodemasproef de cumulatieve immissies van metalen en anionen in de gronden (input) weergegeven bij een L/S van ca. 10. Daarnaast worden in deze tabellen de massabalansen van elementen in de grondkolommen gegeven. De massabalans wordt berekend door de cumulatieve immissie (input) af trekken van de cumulatieve emissie (output) uit de grond bij een L/S van 10 (output - input).

Aan de hand van de massabalansen wordt het uitlooggedrag van anorganische componenten beoordeeld. Een negatieve waarde van de massabalans duidt erop dat een metaal of anion in de grond wordt vastgelegd tot L/S=10. De immissie van een grondkolom is in dat geval groter dan de emissie. Een positieve waarde van de massabalans geeft aan dat metalen of anionen die in de bodem voorkomen gemobiliseerd worden onder invloed van het percolaat van een secundaire grondstof. Indien bij de berekening van de cumulatieve immissie (input) de onderste analysegrens is gebruikt omdat de gemeten concentraties in de percolaatfrakties van de secundaire grondstof kleiner waren dan de onderste analysegrens, is dit weergegeven met het '<' - teken. Een 0-waarde in tabel 8 t/m 10 betekent dat zowel de immissie als de emissie kleiner waren dan de onderste bepalingsgrens. Een metaal of anion dat niet is geanalyseerd, is weergegeven met n.a. (niet geanalyseerd).

³⁾ De redoxpotentiaal is weergegeven ten opzichte van een Ag/AgCl-elektrode.

In de staalslakproef werd barium bijna volledig vastgelegd in de gronden tot $L/S=10$, met uitzondering van de Wildrijk grond (bijlage 2). De vastlegging op middellang termijn ($L/S=10$) geldt tevens voor de elementen F en Mo in de bodems onder AVI-bodemas, met uitzondering van Filosofendal ondergrond (bijlage 3). Omdat Ba, F en Mo pas op langere termijn doorbraken zijn de massabalansen van deze elementen bepaald bij een L/S van 30 in plaats van 10. De resultaten staan in tabel 9 en 10 weergegeven als Ba_{30} respectievelijk F_{30} en Mo_{30} .

In tabel 8, 9 en 10 zijn tevens de U1-normen voor niet-vormgegeven bouwmaterialen weergegeven in mg/kg, afkomstig uit Aalbers et al [1]. De U1-norm definieert de maximaal toelaatbare belasting van de bodem bij een toepassingshoogte van een bouw materiaal van 70 cm. Bouwmaterialen die niet meer uitlogten dan de U1-norm mogen worden toegepast onder de voorwaarden van categorie 1 ⁴⁾. De belasting van de bodem (marginale bodembelasting) ten gevolge van uitloging uit een bouw materiaal die leidt tot een toename van een stof in de vaste fase van de bodem mag niet meer dan 1% zijn ten opzichte van de streefwaarde bodemkwaliteit in 100 jaar gemiddeld over de eerste meter van een als homogeen te beschouwen bodem. Een toename van Cl en SO_4 in het percolaat, dat grondwater wordt of is, ten gevolge van uitloging uit een bouw materiaal mag in het eerste jaar niet meer dan 100% zijn van de streefwaarde grondwaterkwaliteit [1].

⁴⁾ categorie 1: Bouwmaterialen die geen van de samenstellingswaarden overschrijden en op zodanige wijze worden gebruikt dat, ook indien geen isolatiemaatregelen worden genomen, geen van de toegelaten immissies worden overschreden [1].

Tabel 8. Immissie en massabalans (mg/kg) van stoffen in gronden bij L/S=10 in fosforslakproef.

	U1	input	MASSABALANS (output - input)					
		fosforslak	RIVM		Wildrijk	Filosofendal-o	Filosofendal-b	
			niet belucht	belucht	belucht	belucht	niet belucht	belucht
L/S		9.83	9.44	9.04	9.22	8.89	9.13	8.73
pH		9.16	6.06	6.87	6.90	7.10	6.48	6.65
Al		3.17	0.365	-1.39	13.87	3.82	15.55	13.28
As	0.88	< 0.025	0	0	0.043	0.019	0.971	0.520
Ba	5.50	0.112	0.186	0.147	0.183	0.196	0.272	0.153
Ca		543	-144	-166	-141	-268	-286	-323
Cd	0.03	< 0.0011	0.0001	0.0002	0.0139	0.0122	0.0062	0.0029
Co	0.42	< 0.020	0.009	0.005	0.027	0.476	0.116	0.112
Cr	1.30	< 0.023	0	0	0	0	0.072	0.063
Cu	0.72	< 0.049	0	0	0	0	0.023	0.006
Fe		0.203	0.782	0.474	10.92	14.57	380.9	368.3
K		34	63	42	16	23	87	23
Mg		1.3	4.3	5.7	5.9	15	28	28
Mn		< 0.490	0.115	0.039	3.56	54.09	33.40	34.08
Mo	0.28	< 0.025	0	0	0	0	0.026	0
Na		285	33	-26	37	20	57	21
Ni	1.10	< 0.050	0.001	0	0.035	0.134	0.105	0.087
Pb	1.90	< 0.029	0	0	0.144	0.010	0.217	0.160
Sb	0.05	< 0.025	0	0	0	0	0.109	0.057
Se	0.04	< 0.020	0	0	0	0	0.006	0.012
Si		220	-107	-62	-35	-63	-33	-25
Sn	0.27	< 0.049	0	0	0	0	0	0
V	1.60	0.035	-0.011	-0.012	-0.010	-0.013	0.243	0.188
Zn	3.80	0.164	0.017	-0.012	1.27	0.615	0.850	0.789
Br	2.90	1.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cl	600	473	65	48	44	27	107	12
F	13	45	-24	-31	-6.5	-39	-43	-44
CO3		230	-105	26	-5.5	-135	56	6.2
NO3		81	-3.9	-13	-48	-73	-79	-80
PO4		0.154	0.876	2.54	13.21	0.203	65.98	64.90
SO4	750	713	17	19	34	18	-8.5	-58

n.a. = niet geanalyseerd

U1 = maximaal toelaatbare emissies voor niet vormgegeven bouwmaterialen in mg/kg bij een toepassingshoogte van 70 cm (Aalbers et al [1]).

- Negatieve waarde van de massabalans: component uit de secundaire grondstof wordt in de bodem vastgelegd
- Positieve waarde van de massabalans: component die in de bodem voorkomt wordt gemobiliseerd
- 0-waarde van de massabalans: zowel immissie als emissie is kleiner dan de onderste analysegrens
- '<'-teken: immissie van een component is kleiner dan de onderste analysegrens

Tabel 9. Immissie en massabalans (mg/kg) van stoffen in gronden bij L/S=10 in staalslakproef.

	U1	input	MASSABALANS (output - input)					
		staalslak	RIVM		Wildrijk	Filosofendal-o	Filosofendal-b	
			niet belucht	belucht	belucht	belucht	niet belucht	belucht
L/S		9.60	9.44	9.99	10.31	10.03	8.74	9.51
pH		12.68	12.66	12.60	12.59	12.62	12.59	12.53
Al		2.72	36.49	37.35	14.13	30.39	24.51	28.98
As	0.88	< 0.024	0.011	0.014	0.017	0.041	0.497	0.416
Ba	5.50	6.48	-6.18	-5.97	-2.69	-6.27	-6.26	-6.31
Ba30*		12.0	-6.26	-6.91	-2.44	-9.17	-11.5	-11.4
Ca		9412	-1977	-2617	-1425	-3720	-7478	-6419
Cd	0.03	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Co	0.42	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Cr	1.30	< 0.019	0.010	0.011	0.012	0.006	0.084	0.075
Cu	0.72	< 0.049	0.037	0.035	0.032	0.034	0.178	0.105
Fe		0.278	1.43	1.23	4.30	3.49	160.5	143.1
K		13	36	25	37	14	57	29
Mg		0.66	1.28	0.77	2.7	2.5	14	13
Mn		< 0.480	0	0.089	0.567	5.55	14.39	11.71
Mo	0.28	< 0.024	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Na		142	-4.4	-0.15	13	-38	-52	-36
Ni	1.10	< 0.048	0.005	0.004	0.021	0.090	0.090	0.058
Pb	1.90	< 0.030	0.044	0.028	0.046	0.016	0.385	0.289
Sb	0.05	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Se	0.04	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Si		2.4	7.6	6.0	0.85	8.4	31	25
Sn	0.27	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
V	1.60	< 0.024	n.a	n.a	n.a	n.a	0.212	0.205
Zn	3.80	0.283	-0.125	-0.064	0.227	0.092	0.282	0.240
Br	2.90	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Cl	600	20	36	25	40	36	38	26
F	13	1.6	0.18	0.36	0.23	0.47	-0.14	0.06
CO3		269	110	127	206	366	542	954
NO3		29	1.0	-4.5	-2.9	-6.1	-22	-17
PO4		0.106	1.46	1.67	1.85	0.992	20.57	22.42
SO4	750	15	1.5	3.8	22	28	46	49

n.a. = niet geanalyseerd

U1 = maximaal toelaatbare emissies voor niet vormgegeven bouwmaterialen in mg/kg
bij een toepassingshoogte van 70 cm (Aalbers et al [1]).

* Ba30 = vastlegging van Ba bij L/S=30 i.p.v. L/S=10

- Negatieve waarde van de massabalans: component uit de secundaire grondstof wordt in de bodem vastgelegd
- Positieve waarde van de massabalans: component die in de bodem voorkomt wordt gemobiliseerd
- 0-waarde van de massabalans: zowel immissie als emissie is kleiner dan de onderste analysegrens
- '<'-teken: immissie van een component is kleiner dan de onderste analysegrens

Tabel 10. Immissie en massabalans (mg/kg) van stoffen in gronden bij L/S=10 in AVI-bodemasproef.

	U1	input	MASSABALANS (output - input)				
		AVI-bodemas	Filosofendal-o	Filosofendal-b	Kleibos	Beverweert	Fochteloërveen
			niet belucht	niet belucht	niet belucht	niet belucht	niet belucht
L/S		8.52	8.47	8.45	8.59	8.54	8.57
pH		8.47	6.13	4.02	4.77	6.03	3.39
Al		0.880	8.02	42.99	33.58	0.830	244.0
As	0.88	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ba	5.50	0.429	0.201	0.595	0.274	0.467	0.349
Ca		2986	-231	-482	-436	-719	-949
Cd	0.03	0.002	0.019	0.025	0.030	0.022	0.088
Co	0.42	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cr	1.30	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cu	0.72	0.233	-0.181	-0.152	-0.189	-0.182	-0.191
Fe		< 0.170	4.00	96.96	31.79	117.2	48.12
K		190	-8.5	20	109	-48	2.4
Mg		112	11	16	53	228	24
Mn		0.795	58.5	40.1	116	158	2.21
Mo	0.28	0.57	-0.41	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55
Mo30*		1.37	-0.43	-0.91	-1.20	-0.68	-1.29
Na		381	4.2	1.5	16	7.1	13
Ni	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Pb	1.90	0.027	0.015	0.646	0.021	0.001	0.192
Sb	0.05	0.212	-0.150	-0.190	-0.191	-0.189	-0.191
Se	0.04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Si		56	-7.5	8.8	3.9	5.3	16
Sn	0.27	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
V	1.60	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Zn	3.80	0.387	0.606	2.22	0.911	0.906	4.27
Br	2.90	0.480	0.110	0.296	0.307	0.779	0.280
Cl	600	122	28	35	163	85	28
F	13	15	-13	-13	-7.3	-13	-12
F30*		44	-19	-27	-25	-19	-38
CO3		551	-388	-544	-500	-116	-546
NO3		15	-11	44	-7.4	-14	25
PO4		0.493	-0.384	2.38	-0.397	-0.272	4.17
SO4	750	7733	-78	-95	-44	-383	2.1

n.a. = niet geanalyseerd

U1 = maximaal toelaatbare emissies voor niet vormgegeven bouwmaterialen in mg/kg bij een toepassingshoogte van 70 cm (Aalbers et al [1]).

* Mo30 / F30 = vastlegging Mo en F bij L/S=30 i.p.v. L/S=10

- Negatieve waarde van de massabalans: component uit de secundaire grondstof wordt in de bodem vastgelegd
- Positieve waarde van de massabalans: component die in de bodem voorkomt wordt gemobiliseerd
- 0-waarde van de massabalans: zowel immissie als emissie is kleiner dan de onderste analysegrens
- '<'-teken: immissie van een component is kleiner dan de onderste analysegrens

In een eerder onderzoek [3] werden de hier gebruikte gronden uitgelopen met pH4 water, waarmee het uitlooggedrag onder 'natuurlijke' condities wordt beschreven. De emissies van metalen bij L/S=10 in dit zogenoemde referentie experiment staan weergegeven in tabel 11.

Tabel 11. Cumulatieve emissie bij L/S=10 van gronden in referentie-experiment [3].

stof	Wildrijk	Filosofendal (o)	Filosofendal (b)	Kleibos	Beverweert	Fochteloër- veen
pH*	4.7	5.1	5.0	4.7	7.2	4.0
As	0.020	< 0.010	0.390	< 0.030	0.080	0.050
Ba	0.040	0.150	0.110	0.150	0.360	0.110
Ca	11	17	61	31	156	13
Cd	0.007	0.005	0.007	0.018	0.002	0.005
Co	< 0.010	0.030	0.060	< 0.060	0.100	< 0.050
Cr	< 0.010	< 0.010	0.090	< 0.010	< 0.010	0.100
Cu	0.020	0.060	0.250	0.030	0.160	0.080
K	11	14	37	11	14	21
Mg	4	4	10	5	37	8
Mo	< 0.200	< 0.190	< 0.200	< 0.200	< 0.140	< 0.200
Na	11	4	11	18	35	13
Ni	0.010	0.020	0.120	< 0.010	0.420	0.100
Pb	0.060	0.020	0.360	< 0.030	0.030	0.080
Sb	< 0.010	< 0.010	0.050	< 0.030	< 0.020	< 0.030
Se	< 0.010	< 0.010	< 0.050	< 0.050	< 0.040	< 0.050
Sn	< 0.050	< 0.050	< 0.050	< 0.050	< 0.040	< 0.050
V	< 0.100	< 0.100	0.200	< 0.100	< 0.070	0.100
Zn	0.270	0.270	0.360	0.150	0.370	0.430

* pH-waarden geschat uit grafieken afkomstig uit het rapport "Beoordeling van gereinigde grond" [3]
'<-teken: emissie van een component is kleiner dan de onderste analysegrens

De immissie (input) van metalen in het referentie experiment is nul zodat de emissie (output) gelijk is aan de massabalans (output-input) van de grond. Het uitlooggedrag van de gronden onder invloed van het percolaat van de secundaire grondstoffen (tabel 8-10) kan nu worden vergeleken met het uitlooggedrag onder 'natuurlijke' condities (tabel 11).

5 DISCUSSIE

5.1 Statistische evaluatie

De massabalansen van metalen en anionen zoals vermeld in tabel 8, 9 en 10 zijn per proef onderzocht op significante correlaties met gehalten in de bodems van:

- 1) organisch koolstof
- 2) lutum
- 3) som van Al_{ox} en Fe_{ox}

Met behulp van enkelvoudige regressie zijn er regressielijnen berekend die bovengenoemde verbanden aangeven [9]. Het enkelvoudige lineaire model luidt:

$$y = b_0 + b_1 * x$$

De afhankelijke variabele (y) is de massabalans en de onafhankelijke variabelen (x) zijn de gehalten aan organisch koolstof, lutum en $Al_{ox}+Fe_{ox}$. De regressiecoëfficiënt b_0 is een constante term en de regressiecoëfficiënt b_1 is de richtingscoëfficiënt van de regressielijn. Er is sprake van een significante correlatie als de significantie groter is dan 95% ($p < 0.05$). Bij een $p = 0.05$ kan met een betrouwbaarheid van 95% gesteld worden dat de regressiecoëfficiënt (b_1) verschillend is van nul.

In de statistische evaluatie is geen onderscheid gemaakt tussen onbeluchte en beluchte kolomproeven omdat in het algemeen de metaalemissies in de niet beluchte kolomproeven vergelijkbaar waren met deze emissies in de beluchte kolomproeven. In paragraaf 5.4 wordt hier nader op ingegaan. In het statistisch onderzoek zijn alleen die metalen en anionen betrokken die in de bodems onder de secundaire grondstoffen geheel of gedeeltelijk werden vastgelegd. Tabel 12 geeft weer of de relatie tussen de vastlegging op middellang termijn (L/S=10) enerzijds en het gehalte aan organisch koolstof, lutum en $Al_{ox}+Fe_{ox}$ anderzijds significant verschillend is van nul. In tabel 12 zijn tevens de significanties van deze relaties weergegeven op langere termijn (L/S=30) van Ba, F en Mo. Deze resultaten staan in de tabel weergegeven als Ba_{30} , Mo_{30} en F_{30} .

Tabel 12. Significanties ($p < 0.05$) voor relaties tussen vastlegging van stoffen bij $L/S=10$ enerzijds en gehalten aan organisch C, lutum en $Al_{ox}+Fe_{ox}$ anderzijds.

component	proef	aantal waarn.	significantie		
			org.C	lutum	$Al_{ox}+Fe_{ox}$
Ba	staalslakproef	6	0	0	0
Ba ₃₀	staalslakproef	6	0	0	++
Ca	fosforslakproef	6	+	0	+
Ca	staalslakproef	6	++	0	++
Ca	AVI-bodemasproef	5	++	0	0
Ca [#]	AVI-bodemasproef	4	n.b.	n.b.	+
Cu	AVI-bodemasproef	5	0	0	0
Mo	AVI-bodemasproef	5	0	0	0
Mo ₃₀	AVI-bodemasproef	5	0	0	0
Mo ₃₀ [#]	AVI-bodemasproef	4	n.b.	n.b.	0
Sb	AVI-bodemasproef	5	0	0	0
Si	fosforslakproef	6	0	0	0
F	fosforslakproef	6	0	0	++
F	AVI-bodemasproef	5	0	0	0
F ₃₀	AVI-bodemasproef	5	0	0	0
F ₃₀ [#]	AVI-bodemasproef	4	n.b.	n.b.	++
CO ₃	AVI-bodemasproef	5	0	0	0
NO ₃	fosforslakproef	6	+	0	0

: De relatie tussen de vastlegging enerzijds en het gehalte aan $Al_{ox}+Fe_{ox}$ anderzijds in de Beverweert grond valt ver buiten het lineaire gebied. Dit punt is daarom in de lineaire regressie buiten beschouwing gelaten.

++ = significant $p < 0.01$
 + = significant $0.01 < p < 0.05$
 0 = niet significant $p > 0.05$
 n.b. = niet bepaald

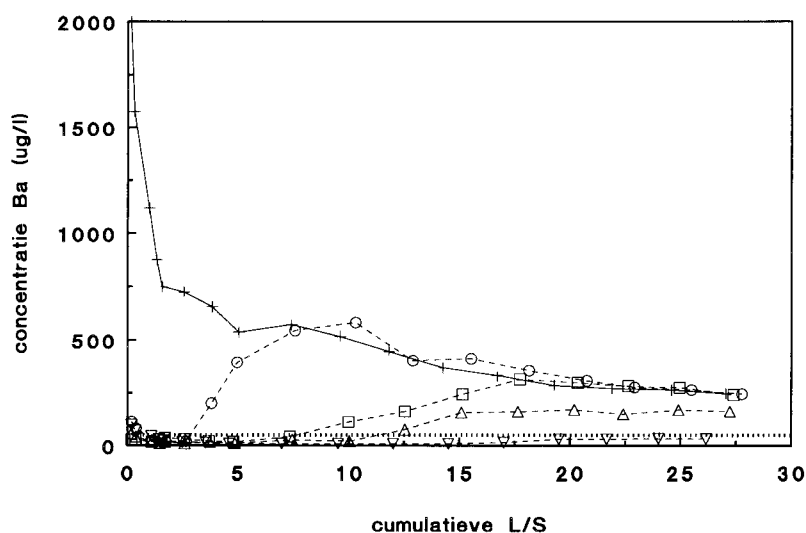
Ba₃₀, Mo₃₀ en F₃₀ : vastlegging van deze elementen bij $L/S=30$ i.p.v. $L/S=10$

Algemeen

De vastlegging van componenten uit een secundaire grondstof in de grondkolommen blijkt met name gecorreleerd te zijn met het organisch koolstof- en $(Al+Fe)_{ox}$ -gehalte van de bodems. Voor die componenten waarvan de uitloging uit de secundaire grondstof gering was, onder andere zware metalen, werd eerder vastgesteld [3] dat de mate van uitloging uit bodems sterk gecontroleerd was met het organisch koolstofgehalte.

Barium

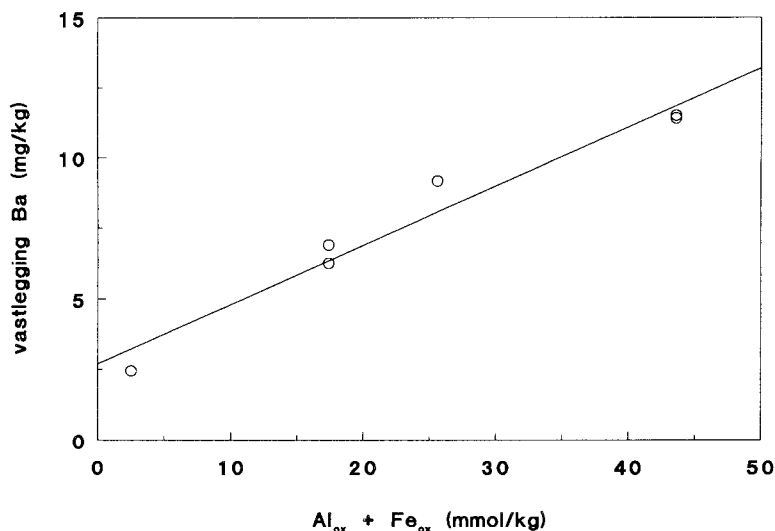
In de staalslakproef werd barium uit de staalslak praktisch volledig geïmmobiliseerd in de bodems, met uitzondering van de grond Wildrijk (tabel 9). In figuur 3 zijn de concentraties van Ba in de staalslak- en grondpercolaten van de beluchte kolomproeven uitgezet tegen de cumulatieve L/S. In deze figuur is tevens de streefwaarde van Ba in grondwater ($50 \mu\text{g/l}$) weergegeven [1]. Het blijkt dat Ba uit de staalslak in alle bodems werd vastgelegd en pas op langer termijn doorbrak. Zodra Ba in de bodems onder staalslak was doorgebroken, overschreden de Ba-concentraties in de grondpercolaten de streefwaarde. Alleen in het Filosofendal bovengrondpercolaat bleef de Ba-concentratie gedurende het gehele experiment beneden de streefwaarde.



Figuur 3. Ba-concentraties in de percolaten van de staalslakproef uitgezet tegen de cumulatieve L/S. Staalslak (+), Filosofendal-o (Δ), Filosofendal-b (∇), RIVM (\square), Wildrijk (\circ). De Ba-streefwaarde van grondwater ($50 \mu\text{g/l}$) is weergegeven.

In eerder onderzoek is aangetoond dat de emissie van Ba significante correlaties vertoont met het organisch koolstofgehalte van de bodem [3]. Een dergelijke relatie wordt in voorliggend onderzoek niet bevestigd (tabel 12).

De relatie tussen enerzijds Ba-vastlegging op langere termijn ($L/S=30$) en anderzijds het gehalte aan $Al_{ox}+Fe_{ox}$ bleek wel lineair (tabel 12). Het mogelijke mechanisme dat daaraan ten grondslag ligt is echter onduidelijk. In figuur 4 is de Ba-vastlegging op langer termijn (tabel 9) uitgezet tegen het gehalte aan $Al_{ox}+Fe_{ox}$.



Figuur 4. Vastlegging van Ba in de bodems van de staalslakproef bij $L/S=30$ versus $Al_{ox}+Fe_{ox}$. De regressielijn (niet significant, tabel 12) door de data is weergegeven.

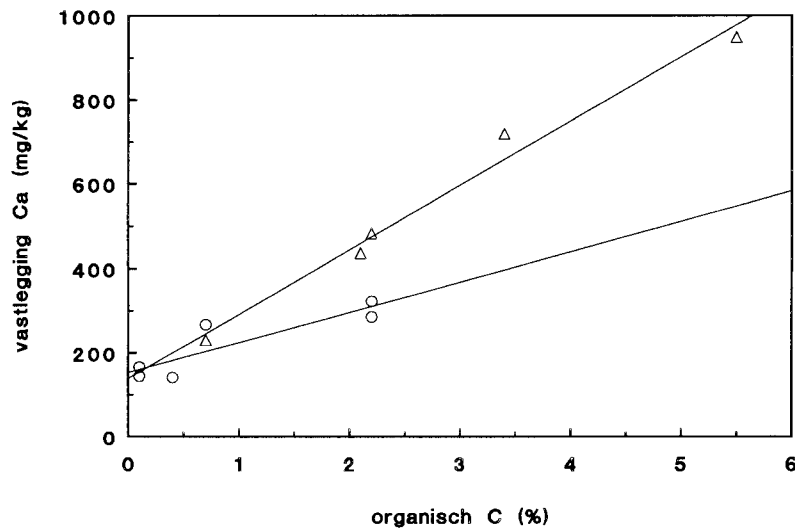
Calcium en pH

De massabalansen van metalen en anionen van de bodems voor de fosforslak-, staalslak- en AVI-bodemasproef zijn in respectievelijk tabel 8, 9 en 10 weergegeven. Uit deze tabellen blijkt dat Ca in de bodems onder de secundaire grondstoffen gedeeltelijk werd vastgelegd. In figuur 5 is de vastlegging van Ca in de fosforslak- en AVI-bodemasproef uitgezet tegen het organisch koolstof gehalte van de bodems. De organische koolstof gehalten van de bodems staan vermeld in tabel 2. Uit figuur 5 blijkt dat de mate van Ca-immobilisatie gerelateerd is aan het organisch koolstof gehalte van de bodems.

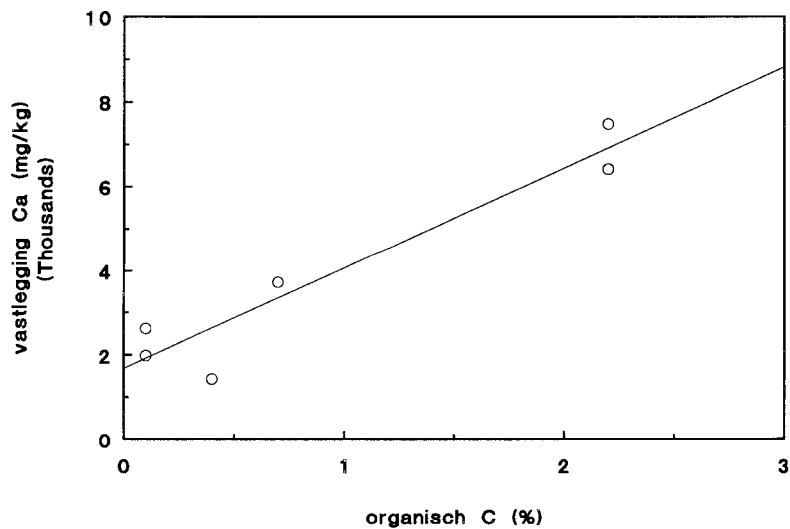
De staalslakpercolaten werden gekenmerkt door hoge Ca-concentraties (bijlage 2) en een hoge pH (ca. 13). In figuur 6 is de vastlegging van Ca uit staalslak (tabel 9) uitgezet tegen het organisch koolstof gehalte van de bodems (tabel 2). De mate van Ca-immobilisatie is net als in de fosforslak- en AVI-bodemasproef gerelateerd aan het organisch stof gehalte van de bodems. Het lineaire verband tussen Ca-vastlegging en organisch koolstof (tabel 12) zou op binding van Ca aan organische stof kunnen duiden [10]. Uit de drie proeven blijkt tevens een relatie te bestaan tussen de Ca-vastlegging enerzijds en het gehalte aan $Al_{ox}+Fe_{ox}$ anderzijds (tabel 12).

Tijdens het uitloggen van staalslak werd zowel in de staalslakkolom als in het staalslakpercolaat een neerslag gevormd. Toevoegen van zuur aan dit neerslag toonde de aanwezigheid van $CaCO_3$ aan door het vrijkomen van CO_2 .

Blijkbaar werd tijdens percoleren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ omgezet in CaCO_3 door CO_2 -opname uit de lucht. Chemische evenwichtsberekeningen [12] toonden aan dat in de bodems onder staalslak naast CaCO_3 ook $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gevormd werd. De vastlegging van Ca in de bodems onder staalslak kan dus niet in zijn geheel aan organische stof worden toegeschreven.

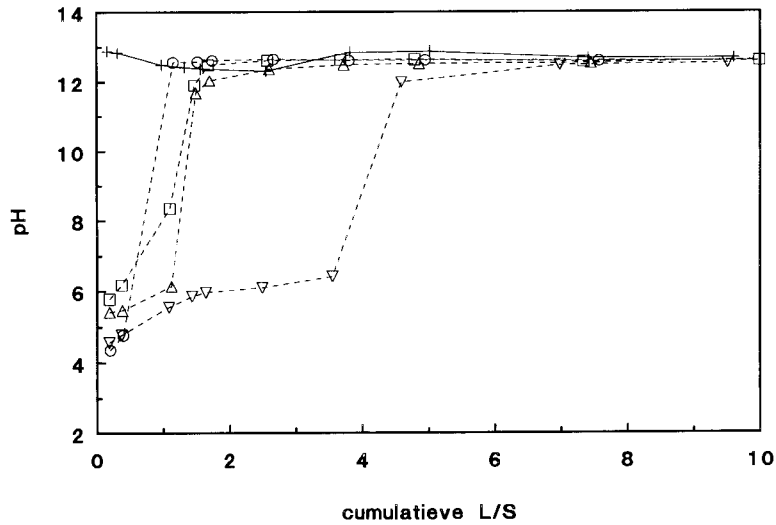


Figuur 5. Vastlegging van Ca in de bodems bij $L/S=10$ versus $C\%$ in de fosforlakproef (○) en de AVI-bodemaproef (△). Regressielijnen door de data van de 2 proeven zijn weergegeven.



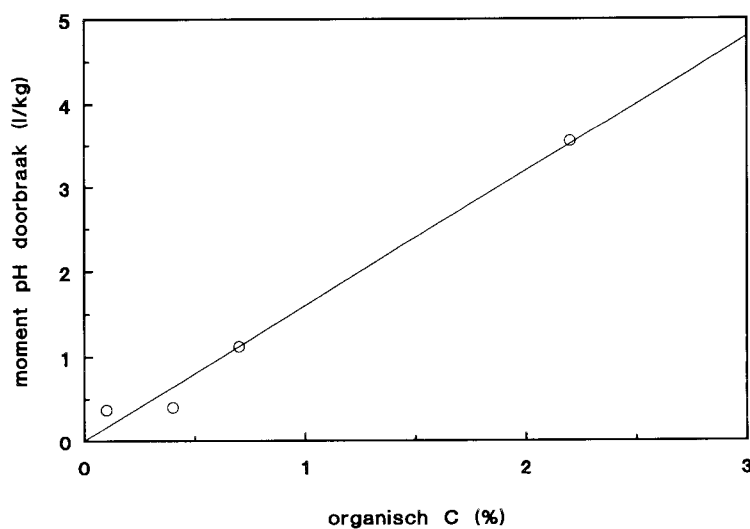
Figuur 6. Vastlegging van Ca in de bodems van de staalslakproef bij $L/S=10$ versus $C\%$. De regressielijn door de data is weergegeven.

De pH (on-line) van de staalslak- en grondpercolaten is in figuur 7 uitgezet tegen de cumulatieve L/S. Uit deze figuur blijkt dat na L/S=5 de pH van de grondpercolaten gelijk is aan de pH van het staalslakpercolaat; de pH is overal doorgebroken.



Figuur 7. pH van de staalslak- en grondpercolaten uitgezet tegen de cumulatieve L/S. Staalslak (+), Filosofendal-o (Δ), Filosofendal-b (∇), RIVM (□), Wildrijk (○).

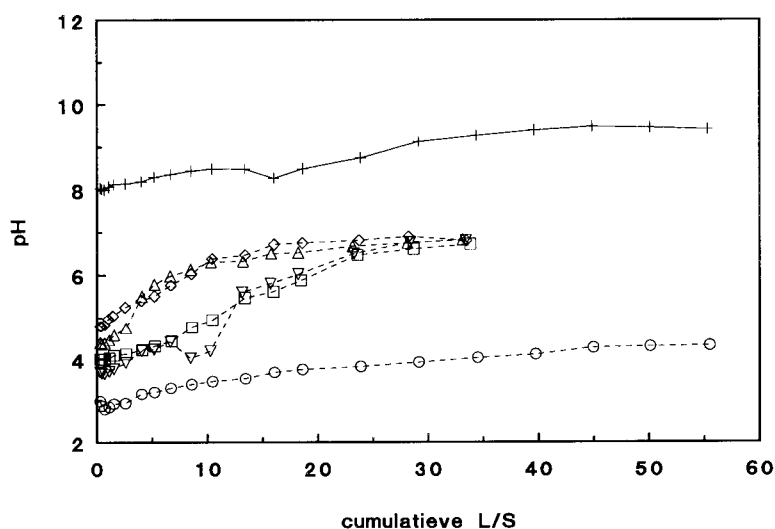
Het moment van pH-doorbraak lijkt gerelateerd te zijn aan het organische stof gehalte van de bodems. In figuur 8 is het moment waarop de pH begon door te breken in de bodems onder staalslak in L/S-eenheden uitgezet tegen het organisch koolstofgehalte van de bodems.



Figuur 8. Geschatte moment van pH-doorbraak in de bodems (in L/S-eenheden) onder staalslak versus C%. De regressielijn door de data is weergegeven.

Uit figuur 8 blijkt een lineair verband te bestaan tussen het gehalte aan organisch C en het moment van pH doorbraak. De bufferende capaciteit van een bodem neemt dus toe bij toenemend organisch stof gehalte. Door figuur 6, waarin de Ca-vastlegging in de bodems onder staalslak is uitgezet tegen organisch koolstof, en figuur 8 met elkaar te vergelijken blijkt dat er een verband is tussen vastlegging van Ca in de bodem en het moment van pH-doorbraak. Naarmate het organisch stof gehalte in de bodem toeneemt, wordt meer Ca vastgelegd in de bodem en breekt de pH op een later moment door. Deze waarnemingen duiden op het proces van Ca-proton omwisseling aan organische stof in de bodem [11].

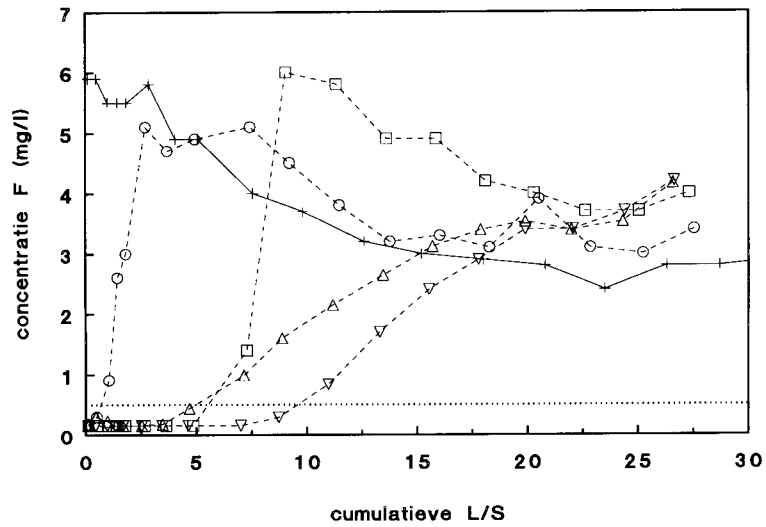
De pH (on-line) van de AVI-bodemas- en grondpercolaten is in figuur 9 uitgezet tegen de cumulatieve L/S. Uit deze figuur blijkt een verschillende mate van pH-buffering, waarbij de bodems op een eind-pH van ca. 6.5 gebufferd worden, met uitzondering van de Fochteloërveen grond. In de staalslakproef werd reeds een relatie gelegd tussen de mate van Ca-binding in bodems, de mate van pH-buffering en het organisch stof gehalte van de bodems, duidend op het proces van Ca-proton omwisseling aan organische stof. In de AVI-bodemasproef dient de Fochteloërveen grond als voorbeeld. Deze grond heeft een hoog organisch koolstof gehalte (tabel 2), een sterke Ca-binding (tabel 10) en een sterke pH-buffering (figuur 9). Merk op dat de Beverweert grond een hoog organisch koolstof gehalte heeft (org.C = 3.4%, tabel 2) terwijl deze grond een geringe pH-buffering vertoont. Een mogelijke oorzaak van de geringe pH-buffering in de Beverweert grond is dat deze grond 'van nature' al een pH had van ca. 5.3 (tabel 2).



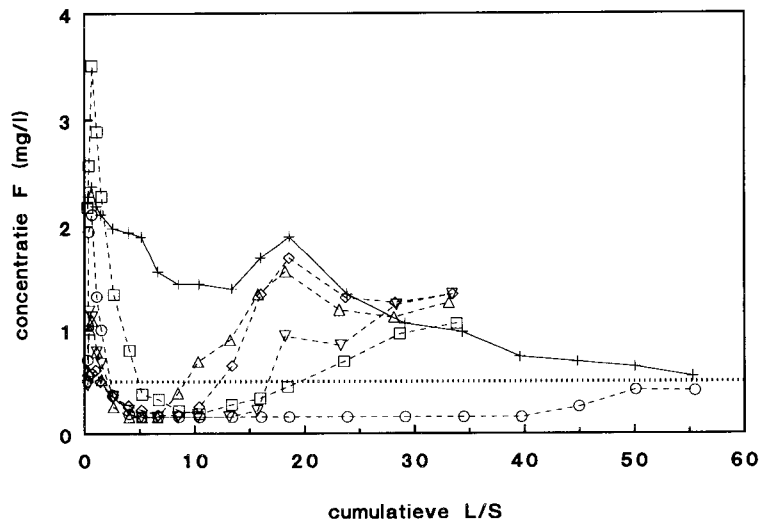
Figuur 9. pH van de secundaire grondstof- en grondpercolaten versus cumulatieve L/S. AVI-bodemas (+), Fochteloërveen (○), Kleibos (□), Beverweert (◇), Filosofendal-o (Δ) en Filosofendal-b (▽).

Fluoride

De F-concentraties in de percolaten van de fosforslak- en AVI-bodemaspreef zijn in figuur 10 respectievelijk 11 uitgezet tegen de cumulatieve L/S. In deze figuren is tevens de streefwaarde van F in grondwater (500 µg/l) weergegeven [1].



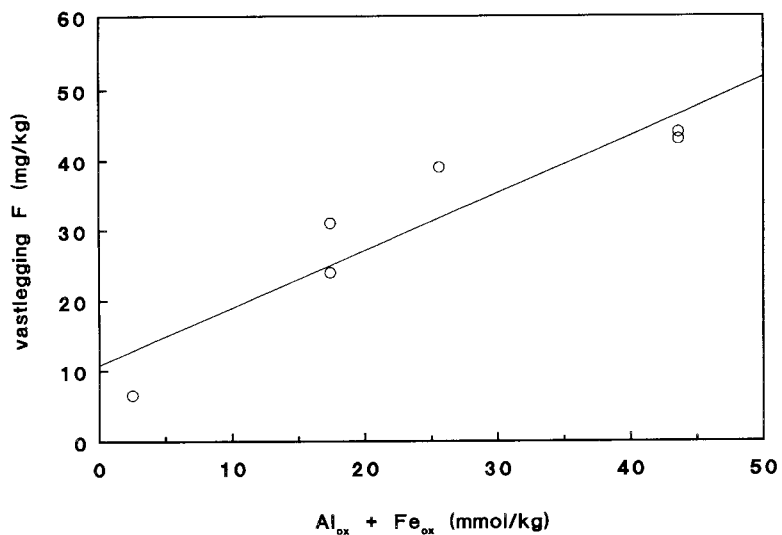
Figuur 10. Fluoride-concentraties in de percolaten van de fosforslakproef uitgezet tegen de cumulatieve L/S. Fosforslak (+), Filosofendal-o (Δ), Filosofendal-b (▽), RIVM (□), Wildrijk (○). De F-streefwaarde van grondwater (500 µg/l) is weergegeven [1].



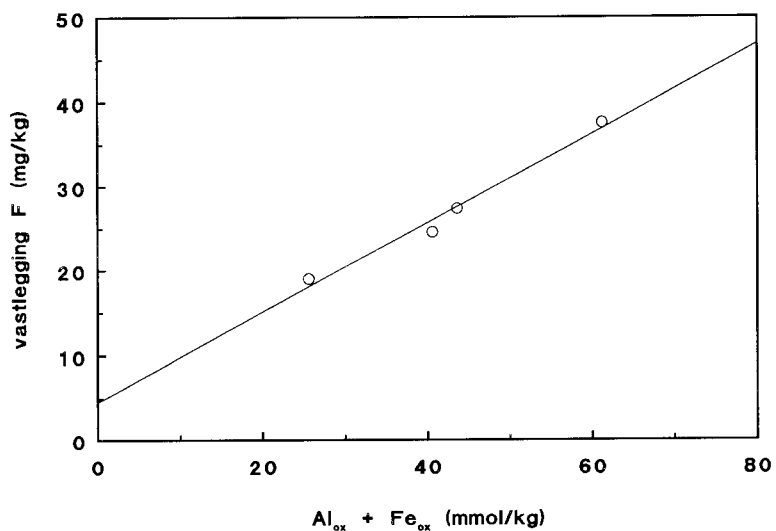
Figuur 11. Fluoride-concentraties in de percolaten van de AVI-bodemaspreef uitgezet tegen de cumulatieve L/S. AVI-bodemaspreef (+), Fochteloërveen (○), Kleibos (□), Beverweert (◇), Filosofendal-o (Δ), Filosofendal-b (▽). De F-streefwaarde van grondwater (500 µg/l) is weergegeven [1].

Uit figuur 10 blijkt dat F uit de fosforslak in eerste instantie in alle bodems werd vastgelegd en daarna, gedeeltelijk, weer werd vrijgegeven. Zodra F in de bodems onder fosforslak doorbrak, overschreden de F-concentraties in de grondpercolaten de streefwaarde voor grondwater. In de bodems onder AVI-bodemas was F mobiel tot een L/S van ca. 3, waarbij de concentraties de streefwaarde voor grondwater overschreden (figuur 11). Deze initiële F-mobilisatie, welke niet in de bodems van de fosforslakproef werd waargenomen, blijkt het gevolg te zijn van complexatie van F aan opgelost Al in de bodem [11]. Na L/S=3 nam opgelost Al in de bodem sterk af en werd F geheel of gedeeltelijk vastgelegd. Na deze F-immobilisatie brak F op langer termijn door waarbij de streefwaarde van 500 µg/l opnieuw werd overschreden, met uitzondering van de Fochteloërveen grond.

In figuur 12 is de vastlegging van F in de bodems onder fosforslak uitgezet tegen het gehalte aan $Al_{ox}+Fe_{ox}$. Omdat in de bodems onder AVI-bodemas F pas op langer termijn vrij kwam (doorbrak) is in figuur 13 de F-vastlegging bij L/S=30 uitgezet in plaats van vastlegging bij L/S=10 (tabel 10). Het verband tussen de F-vastlegging in de bodems enerzijds en het gehalte aan $Al_{ox}+Fe_{ox}$ anderzijds blijkt lineair te zijn (tabel 12). De Beverweert grond in de AVI-bodemasproef is in de lineaire regressie buiten beschouwing gelaten. De F-vastlegging in de Beverweert grond viel namelijk buiten het lineaire gebied. Mogelijk was de vastlegging aan $Al_{ox}+Fe_{ox}$ in deze bodem geringer als gevolg van de relatief hoge pH [12].



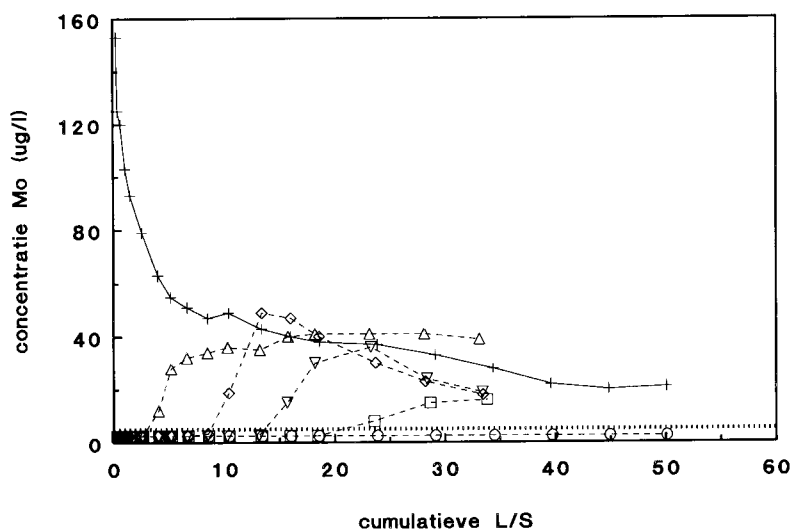
Figuur 12. Vastlegging van F in de bodems van de fosforslakproef bij L/S=10 versus $Al_{ox} + Fe_{ox}$. De regressielijn door de data is weergegeven.



Figuur 13. Vastlegging van F in de bodems van de AVI-bodemasproef bij L/S=30 versus $Al_{ox} + Fe_{ox}$. De regressielijn door de data (zonder Beverweert) is weergegeven.

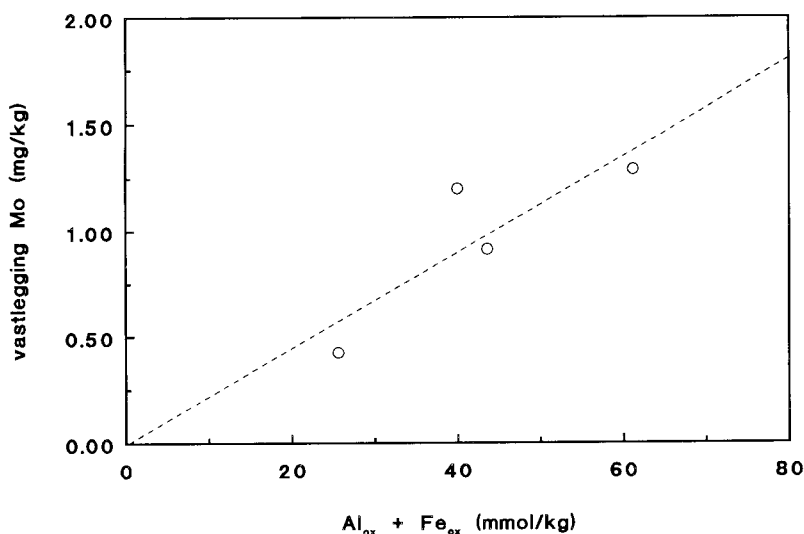
Molybdeen

De concentraties van Mo in de AVI-bodemas- en grondpercolaten zijn in figuur 14 uitgezet tegen de cumulatieve L/S. Tevens is de Mo-streefwaarde in grondwater (5 µg/l) weergegeven [1]. Uit figuur 14 blijkt dat tot L/S=10 Mo in de bodems vrijwel volledig werd vastgelegd. Op langere termijn (L/S>10) vond veelal een doorbraak van Mo plaats, met uitzondering van de Fochteloërveen grond. Zodra Mo in de bodems onder AVI-bodemas doorbrak werd de streefwaarde voor grondwater overschreden.



Figuur 14. Mo-concentraties in de percolaten van de AVI-bodemasproef uitgezet tegen de cumulatieve L/S. AVI-bodemas (+), Fochteloërveen (O), Kleibos (□), Beverweert (◇), Filosofendal-o (Δ), Filosofendal-b (▽). De streefwaarde van Mo van grondwater (5 µg/l) is weergegeven.

Het uitlooggedrag van Mo in de bodems onder AVI-bodemas lijkt op het gedrag van F (figuur 11). Er vond alleen geen initiële Mo-mobilisatie plaats zoals bij F werd waargenomen. De F-vastlegging in de bodems vertoonde een lineair verband met het $Al_{ox}+Fe_{ox}$ gehalte. Het verband tussen vastlegging van Mo op langer termijn en het gehalte aan $Al_{ox}+Fe_{ox}$ was echter niet lineair (tabel 12). Ter illustratie is in figuur 18 de Mo-vastlegging uitgezet tegen het $Al_{ox}+Fe_{ox}$ gehalte van de bodems. Er blijkt ook geen relatie te bestaan tussen de Mo-vastlegging enerzijds en het gehalte aan organisch koolstof en lutum anderzijds (tabel 12). Mogelijk speelt het geringe aantal metingen (n=4, exclusief één uitbijter) hier een rol.



Figuur 15. Vastlegging Mo in de bodems van de AVI-bodemaproef bij $L/S=30$ versus $Al_{ox}+Fe_{ox}$. De regressielijn (niet significant, tabel 12) door de data (zonder Beverweert) is weergegeven.

Antimoon

In de bodems onder de verouderde AVI-bodemmas werd Sb bijna volledig vastgelegd (tabel 10). Omdat geen doorbraak van Sb gemeten is valt er geen relatie te leggen tussen de vastlegging van Sb in de bodem en bodemeigenschappen. Van belang is echter te constateren dat Sb, waarvan de immissie vier maal de U1-norm overschrijdt en daarmee representatief is voor AVI-bodemmas [1], zeer sterk wordt gebonden in de bodem, ook in 'arme' gronden zoals Filosofendal ondergrond.

Koper

De emissie van Cu uit staalslak en fosforslak was verwaarloosbaar. De Cu-emissie uit AVI-bodemmas was meetbaar maar laag, vermoedelijk door de neutrale pH van de bodems. De Cu-uitloging uit de bodems was beneden de U1-norm en daarmee niet representatief voor de 'gemiddelde' AVI-bodemmas [1]. Vastlegging van Cu in de bodems onder AVI-bodemmas was vrijwel volledig (tabel 10, negatieve massabalans), hetgeen verwacht wordt op grond van de literatuur (o.a. [13]).

Nitraat

Nitraat afkomstig uit fosforslak werd in de bodems geheel of gedeeltelijk vastgelegd (tabel 8). Het verband tussen de vastlegging van NO_3 en het organisch koolstof gehalte van de bodems is lineair (tabel 12). Dit zou kunnen duiden op binding van stikstof aan organische stof. Het is echter ook mogelijk dat in de bodems onder fosforslak NO_3 werd omgezet in N_2 (g) als gevolg van reducerende omstandigheden in de bodems (denitrificatie).

IJzer, mangaan en fosfaat

In alle bodems onder de secundaire grondstoffen werd Fe en Mn gemobiliseerd. In de staalslakproef was de mobilisatie van deze redoxgevoelige metalen geringer dan in de fosforslakproef, mogelijk als gevolg van de hoge pH onder staalslak.

Fosfaat werd in de bodems onder fosforslak en staalslak gemobiliseerd. De PO_4 -mobilisatie was in de staalslakproef lager dan in de fosforslakproef. In bodems is PO_4 veelal geassocieerd met Fe en Mn (hydr)-oxiden en wordt hierdoor samen met Fe en Mn gemobiliseerd. De geringere mobilisatie van PO_4 in bodems onder staalslak kan daarmee worden verklaard uit een geringe mobilisatie van Fe en Mn.

5.2 Vergelijking uitloging met referentie-experiment

Door de uitloging van de gronden onder invloed van reststofpercolaat te vergelijken met het referentie-experiment (pH4 water) [3] kan worden nagegaan in hoeverre een reststoftoepassing de mobiliteit van 'bodem-eigen' elementen beïnvloedt.

Redoxgevoelige metalen

De oplosbaarheid van As, Sb, Fe en Mn is afhankelijk van de redox condities in de bodem. Een lagere redox-potentiaal verhoogt de mobiliteit van deze redoxgevoelige elementen. De mobiliteit van bodemgebonden As en Sb in Filosofendal bovengrond was in de fosforslakproef hoger dan in het referentie-experiment met pH4 water. Met name tussen een L/S van 2 en 5 vertoonde As in deze bovengrond een verhoogde uitloging (bijlage 1). De verhoogde mobiliteit van As en Sb in de fosforslakproef lijkt gerelateerd te zijn aan de redoxpotentiaal. De redoxpotentiaal van Filosofendal bovengrond onder fosforslak was tussen een L/S van 3 en 10 kleiner dan 0 mV (bijlage 1) terwijl de redoxpotentiaal van deze grond in het referentie-experiment tussen 200 en 400 mV lag [3].

In de staalslakproef was de mobiliteit van bodemgebonden As in Filosofendal bovengrond eveneens hoger dan in het referentie-experiment met pH4 water. Net als in de fosforslakproef lijkt de verhoogde mobiliteit van As gerelateerd te zijn aan de lage redox-potentiaal in de bodem. De redoxpotentiaal van Filosofendal bovengrond onder staalslak was gedurende het gehele experiment kleiner dan 0 mV. Bij een L/S-verhouding van 5 was de redoxpotentiaal zelfs -500 mV (bijlage 2).

Zink

In de fosforslak- en AVI-bodemasproef werd bodemgebonden Zn onder invloed van het percolaat van de secundaire grondstoffen gemobiliseerd (tabel 8 en 10). Deze Zn-mobilisaties waren hoger dan in het referentie-experiment met pH4 water (tabel 11). Dit is mogelijk het gevolg van Ca-Zn omwisseling, waarbij Ca uit de secundaire grondstof werd gebonden in de bodem en Zn gemobiliseerd [11]. Met name in de bovengronden Filosofendal en Fochteloërveen met relatief hoge organische stof gehalten, werd onder invloed van AVI-bodemas beduidend meer Zn gemobiliseerd dan in het referentie-experiment.

In de AVI-bodemasproef was de mobilisatie van bodemgebonden Zn hoger dan in de fosforslakproef door hogere Ca-concentraties én lagere pH in de AVI-bodemas percolaten. Door de hogere Ca-concentraties werd meer Ca in de bodems gebonden (figuur 3) waardoor Zn in de bodems werd gemobiliseerd [11].

De mobilisatie van bodemgebonden Zn was in de staalslakproef (tabel 9) lager dan in de fosforslakproef. Ten opzichte van het referentie-experiment met pH4 water was de mobilisatie van zink in de bodems onder staalslak eveneens lager. Dit geeft aan dat de immobilisatie van Zn door de hoge pH sterker was dan de mobilisatie door de hoge Ca-concentraties [11].

Koper

Uit staalslak en fosforslak kwam geen Cu vrij (tabel 8 en 9) zodat direct met het referentie-experiment vergeleken kan worden of de uitloging van bodemgebonden Cu verandert onder invloed van het percolaat van secundaire grondstoffen. De mobilisatie van bodemgebonden Cu door fosforslakpercolaat bleek geringer dan door pH4 water, mogelijk als gevolg van de hoge pH in het fosforslakpercolaat. In bodems onder staalslak was de Cu-mobilisatie vergelijkbaar met die onder invloed van pH4 water. Mogelijk wordt het immobiliserende effect van de hoge pH hier opgeheven door de zeer hoge concentraties van opgelost Ca. In de bodems onder AVI-bodemas was de Cu-uitloging lager dan in het referentie-experiment ondanks een extra Cu-input met het AVI-percolaat.

Overige metalen

Voor de overige metalen (Cd, Pb) kan op grond van de resultaten niet eenduidig worden vastgesteld in welke mate alkalisch reststofpercolaat de mobiliteit in de bodem beïnvloedt.

5.3 U1-normen en streefwaarden grondwater

De emissies van metalen en anionen uit fosforslak, staalslak en AVI-bodemas zijn getoetst aan de U1-normen voor toepassing als categorie-1 bouw materiaal [1]. De concentraties van metalen en anionen in de percolaten van de secundaire grondstoffen en bodems zijn getoetst aan de streefwaarden van grondwater [1].

Voor de meeste componenten in fosforslak werd een geringe (of niet meetbare) uitloging gemeten (tabel 8). Uitzonderingen waren Ca, CO₃, Br, Cl, F en SO₄. De emissie van F uit fosforslak was dusdanig dat de U1-norm overschreden werd. Uitloging van Cl en SO₄ vond grotendeels in de eerste 3 frakties plaats. Uit tabel 8 blijkt dat sulfaat nauwelijks bond aan de bodems. Dit geeft aan dat SO₄ een geringe bindingsaffiniteit heeft en in een praktijktoepassing relatief snel zal uitspoelen naar het grondwater. De geringe bindingsaffiniteit van SO₄ in bodems is in meerdere onderzoeken aangetoond [12]. De streefwaarde van SO₄ in grondwater is 150 mg/l [1]. In de percolaten van de bodems onder fosforslak werd deze waarde overschreden tot een L/S van ca. 2 (bijlage 1).

Uit staalslak overschreed alleen de emissie van Ba de U1-norm (tabel 9). De emissie van Cl en SO₄ uit staalslak was gering doordat de slak in tegenstelling tot het gangbare procedé niet met zeewater was gekoeld maar aan de lucht. De geringe hoeveelheid SO₄ uit staalslak werd nauwelijks of niet gebonden in de bodems onder staalslak (tabel 9). De SO₄-concentraties in de grondpercolaten van de staalslakproef bleven beneden de streefwaarde (150 mg/l, [1]) van grondwater.

Voor de hier onderzochte AVI-bodemas overschreden Mo, Sb, F en SO₄ de U1-normen. In de AVI-bodemasproef werd door middel van een eenvoudige zuurtest reeds de aanwezigheid van CaCO₃ aangetoond in de bodemas door het vrijkomen van CO₂. Door het CaCO₃-evenwicht lag de pH in het percolaat rond 8-9, terwijl deze in niet gecarbonatiseerde bodemas tot 3 pH-eenheden hoger kan liggen. In het door CaCO₃-evenwicht gereguleerde pH-traject (pH 8-9) is de oplosbaarheid, en dus de uitloging, van zware metalen in een minimum [13]. De oplosbaarheid van onder andere Mo en Sb, welke als oxyanionen (b.v. MoO₄²⁻) in oplossing gaan, vindt daarentegen een maximum in hetzelfde pH-traject.

Redoxgevoelige metalen

De streefwaarde van As in grondwater is 10 µg/l [1]. Vanwege (sterk) reducerende omstandigheden in de bodems onder fosforslak en staalslak overschreed de As-concentratie in het percolaat afkomstig van Filosofendal bovengrond de streefwaarde tot een L/S van ca. 10 respectievelijk 7 (bijlage 1 en 2). Antimoon uit de AVI-bodemas werd bijna volledig in de bodems geïmmobiliseerd (tabel 10). Hoewel de uitloging van Sb de U1-norm overschreed, bleek de Sb-emissie uit de verschillende bodems naar het grondwater (zeer) gering te zijn door de sterke Sb-immobilisatie in de bodems.

Zink

De streefwaarde van Zn in grondwater is 65 µg/l [1]. Deze waarde werd in de percolaten van de bodems onder fosforslak en staalslak overschreden tot een L/S van 2 à 3 (bijlage 1 en 2), met uitzondering van de RIVM grond. De Zn-concentratie in het percolaat afkomstig van de RIVM grond bleef beneden de streefwaarde. De mobilisatie van Zn in de bodems onder AVI-bodemas was dusdanig dat de Zn-concentraties in de grondpercolaten de streefwaarde voor Zn overschreden tot een L/S-verhouding van 5 à 7 (bijlage 3).

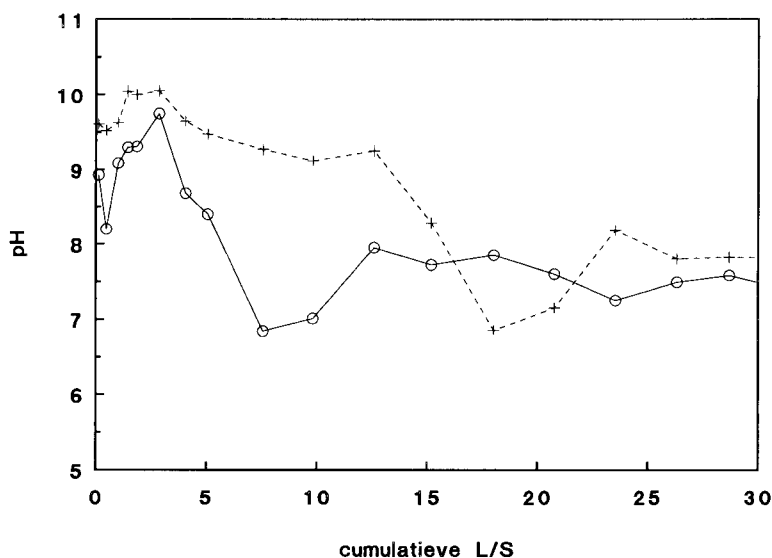
Koper

De streefwaarde van Cu in grondwater is 15 µg/l [1]. In de bodems onder fosforslak werd deze waarde alleen overschreden door Filosofendal bovengrond ($L/S < 0.5$), zie bijlage 1. In de bodems onder staalslak was de mobiliteit van bodemgebonden Cu hoger dan in de bodems onder fosforslak (zie 5.2). In alle grondpercolaten van de staalslakproef werd de streefwaarde voor Cu overschreden tot een L/S van ca. 2 (bijlage 2). Koper uit AVI-bodemas werd gedeeltelijk in de bodems vastgelegd (tabel 10). Uit bijlage 3 blijkt dat alleen in de percolaten afkomstig van Filosofendal en Beverweert de Cu-concentraties de streefwaarde overschreden tot een L/S van 1.

5.4 Beluchten/niet beluchten (figuur 2)

In de fosforslak- en staalslakproef werd de RIVM ondergrond en Filosofendal bovengrond gepercoleerd met zowel belucht als niet belucht percolaat (tabel 5). Het doel was, zo mogelijk, aërobe (oxiderende) respectievelijk anaërobe (reducerende) condities in de grondkolommen te creëren. In de AVI-bodemasprouf zijn geen 'beluchte' kolomproeven uitgevoerd omdat de percolaten al in evenwicht waren met CaCO_3 .

Door beluchten van het gefiltreerde fosforslakpercolaat daalde de pH zodat de input voor de beluchte kolomproeven een lagere pH had dan de input voor de niet beluchte kolomproeven (figuur 16). Het percolaat afkomstig van de fosforslak was blijkbaar niet in evenwicht met de atmosfeer. Door beluchting en CO_2 -opname werd vermoedelijk CaCO_3 gevormd en daalde de pH tot waarden rond 7.5. Ondanks het verschil in input-pH tussen de beluchte en niet beluchte kolomproef blijkt het pH-verloop in de grondpercolaatfrakties vrijwel identiek te zijn (bijlage 1). Dit duidt erop dat de pH in de grondpercolaten in sterke mate wordt gecontroleerd door bodemprocessen en in mindere mate door de zuurgraad van de input-oplossing.



Figuur 16. pH van gefiltreerd fosforslakpercolaat ($0.05 \mu\text{m}$) uitgezet tegen de cumulatieve L/S. Belucht percolaat (O), niet belucht percolaat (+).

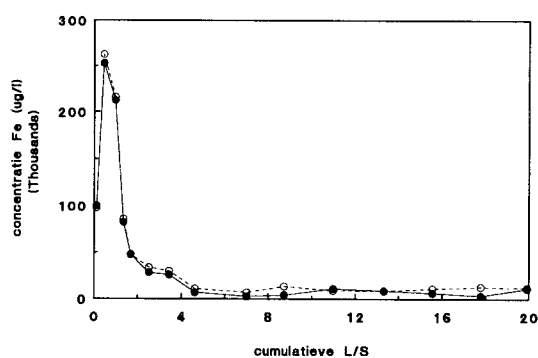
Tijdens beluchten van het staalslakpercolaat werd door CO_2 -opname continue CaCO_3 gevormd. Tijdens het beluchten van het staalslakpercolaat daalde de pH echter niet (ca. 12.5), zodat de pH vermoedelijk gereguleerd werd door Ca(OH)_2 . De invoeroplossing voor de niet beluchte grondkolommen had daarmee dezelfde pH als die voor de beluchte grondkolommen. Net als in de fosforslakproef is onder staalslak het verloop van de pH in de grondpercolaten van de beluchte kolomproeven vergelijkbaar met dit verloop in de niet beluchte kolomproeven.

Uit de grafieken waarin de redoxpotentiaal in de percolaten van de fosforslak- en staalslakproef is uitgezet tegen de cumulatieve L/S (bijlage 1 en 2) blijkt dat het redoxverloop in de grondpercolaten van de niet beluchte kolomproeven weinig verschilde van de beluchte kolomproeven. In de fosforslakproef waren de bodememissies van de meeste metalen in de niet beluchte kolomproeven, waaronder de redoxgevoelige metalen Fe en Mn, dan ook vergelijkbaar met de emissies in de beluchte kolomproeven. De metalen As en Sb vormden hierop een uitzondering. Het gehalte van deze redoxgevoelige elementen in Filosofendal bovengrond was relatief hoog. De emissie van As en Sb uit deze grond was onder niet beluchte condities hoger dan onder beluchte condities (bijlage 1). In de staalslakproef waren de bodememissies van As, Fe en Mn in de niet beluchte kolomproeven iets hoger dan in de beluchte kolomproeven (bijlage 2), bij identiek redoxverloop in de grondpercolaten. Mogelijk was de redoxpotentiaal in de eerste lagen van de gronden van de niet beluchte kolomproeven lager dan in de beluchte kolomproeven waardoor de redoxgevoelige metalen meer in oplossing gingen.

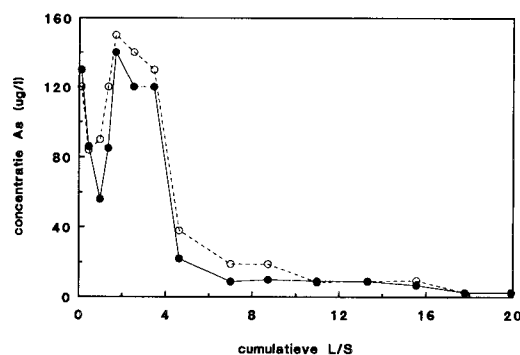
5.5 Deeltjestransport (figuur 2C)

In de fosforslak- en staalslakproef zijn de percolaten van de secundaire grondstoffen en gronden van zowel de niet beluchte als de beluchte kolomproeven gefiltreerd over een 0.05 μm - en een 0.45 μm -filter met als doel onderscheid te maken tussen transport van opgeloste stoffen ($< 0.05 \mu\text{m}$) en transport van colloïdale deeltjes (0.05 - 0.45 μm). Kleideeltjes en ijzerbevattende deeltjes (mobiele colloïden) kunnen metalen binden en transporteren [14] en daarmee een verhoogde uitloging veroorzaken.

In de fosforslakproef waren voor de meeste metalen en anionen de concentraties in de 0.05 μm -filtraten net zo hoog als in de 0.45 μm -filtraten. Alleen in de percolaten van Filosofendal bovengrond waren de concentraties van Al, As, Fe en Sb in de 0.05 μm -frakties enigszins lager dan in de 0.45 μm -frakties (bijlage 1). Als voorbeeld zijn in figuur 17 en 18 van de beluchte kolomproef de Fe- respectievelijk As-concentraties in de Filosofendal bovengrond percolaten uitgezet tegen de cumulatieve L/S.



Figuur 17. Fe-concentraties in Filosofendal bovengrond percolaatfrakties versus cum-L/S waarin 0.05 μm -(\bullet) en 0.45 μm -(\circ) filtraties.



Figuur 18. As-concentraties in Filosofendal bovengrond percolaatfrakties versus cum-L/S waarin 0.05 μm -(\bullet) en 0.45 μm -(\circ) filtraties.

Uit figuur 17 en 18 valt af te leiden dat de relatieve concentratie toename in de 0.45 μm -fraktie van Fe klein is ten opzichte van As. Kwantitatief gezien bleef er op het 0.05 μm -filter echter meer Fe achter dan As. Mogelijk was Fe dat op het filter achter bleef drager voor As. De uitloging van As kan door binding aan ijzerbevattende deeltjes verhoogd worden [8]. De As-uitloging door transport van As aan colloïdale deeltjes (0.05 - 0.45 μm) is echter laag ten opzichte van transport van As als opgeloste stof ($< 0.05 \mu\text{m}$). Merk op, dat het concentratieverloop van Fe als functie van de L/S-verhouding een verhoging vertoont in de eerste frakties (initiële verhoging) terwijl de uitloging van As een maximum vertoont bij een hogere L/S-verhouding (piekuitloging) dan Fe.

In de staalslakproef waren in ca. 3 frakties van de grondpercolaten de concentraties van Al, Cr, Cu, Fe en Pb in de 0.05 µm-filtraten iets lager dan in de 0.45 µm-filtraten (bijlage 2). De mate van facilitated transport van deze metalen is echter te verwaarlozen ten opzichte van transport als opgeloste stof. De andere onderzochte metalen vertoonden vrijwel geen verschil in concentraties tussen de 0.05 µm- en de 0.45 µm-frakties.

Zowel in de fosforlakproef als in de staalslakproef blijkt in het algemeen het transport van metalen en anionen aan colloïdale deeltjes verwaarloosbaar te zijn ten opzichte van transport als opgeloste stof.

6 CONCLUSIES

Door middel van kolomproeven is onderzoek verricht naar het uitlooggedrag van metalen en anionen uit een drietal alkalische secundaire grondstoffen en de effecten daarvan op de onderliggende bodems. In het onderzoek zijn fosforslak, staalslak respectievelijk verouderde (1.5 jaar oud) AVI-bodemas uitgelooft met pH4 water. Met de percolaten van de secundaire grondstoffen zijn verschillende type bodems uitgelooft. Aan de hand van dit onderzoek kunnen de volgende algemene conclusies getrokken worden:

- *De stoffen Ba, Mo, F, Cu en Sb worden gebonden in de bodem, SO₄ niet*

De uitloging uit reststoffen van Ba (staalslak), F (fosforslak), F, Mo, Sb, en Cu (AVI-bodemas) overschrijdt veelal de in het Bouwstoffenbesluit gestelde bodemnormen (kritische componenten). Na uitloging uit de reststof blijken deze componenten in meer of mindere mate te worden vastgelegd in de onderliggende bodem. Sulfaat uit de reststoffen wordt niet gebonden in de bodems, hetgeen de normstelling voor SO₄, welke gerelateerd is aan de grondwaterkwaliteit, onderbouwt.

- *Binding reststofcomponenten in de bodem gerelateerd aan bodemeigenschappen*

Naast bovengenoemde componenten wordt ook Ca uit de reststoffen gebonden in de gronden. De mate van binding van Ca uit de reststoffen is linear gecorreleerd met het organisch koolstofgehalte van de gronden. Binding van F en Ba uit de reststoffen is linear gecorreleerd met het oxalaat extraheerbaar Al+Fe-gehalte van de gronden. Koper en Sb uit de reststof (met name AVI-bodemas) worden volledig in de gronden vastgelegd, waardoor geen relatie met bodemeigenschappen kan worden gelegd. In eerder onderzoek [3] is vastgesteld dat Cu-uitloging gerelateerd is aan het organisch koolstof gehalte van de bodem.

- *Meer mobilisatie van 'bodem-eigen' Zn, As en Sb en minder mobilisatie van Cu onder invloed van reststofpercolaat*

Alkalisch reststofpercolaat mobiliseert meer bodemgebonden Zn dan 'natuurlijk' pH4 water. Dit wordt veroorzaakt door hoge Ca concentraties in de reststofpercolaten. Een uitzondering vormt staalslakpercolaat dat minder Zn mobiliseert dan pH4-water, hetgeen samenhangt met de extreem hoge pH in het staalslakpercolaat. Alkalisch reststofpercolaat mobiliseert minder bodemgebonden Cu dan 'natuurlijk' pH4-water. In tegenstelling tot is waarschijnlijk het immobiliserend effect van de verhoogde pH op Cu sterker dan het mobiliserend effect van de hoge Ca concentraties. Voor overige 'bodem-eigen' componenten (Pb, Cd) kon er geen eenduidig verschil tussen de uitloging met het reststofpercolaat en pH4 water worden vastgesteld. Door de lage redoxpotentiaal mobiliseert het reststofpercolaat meer bodemgebonden Sb en As (hoewel in geringe hoeveelheden aanwezig) dan pH4 water.

- *pH buffering in de bodem gerelateerd aan organische koolstof gehalte*

De reststoffen leggen de onderliggende gronden een hoge pH op. De mate van pH-buffering in de bodems neemt toe met het organisch koolstofgehalte van de bodems.

- *Colloïdaal transport van geringe belang*

Tijdens het uitloggen van zowel de secundaire grondstoffen als de bodems is het transport van metalen en anionen aan colloïdale deeltjes (0.05-0.45µm) te verwaarlozen ten opzichte van het transport van opgeloste stoffen (<0.05µm)

Slotbeschouwing

In dit onderzoek zijn een aantal lineaire correlaties aangetoond tussen de binding in de bodem van kritische reststofcomponenten en bodemeigenschappen als organisch koolstof gehalte en oxide gehalte. Om de verspreiding van deze componenten in bodem, richting grondwater, te kunnen kwantificeren moeten de deze verbanden worden omgezet tot bindings(sorptie)vergelijkingen. In *deelrapport-2* wordt dit aspect uitgewerkt, waarbij tevens rekening wordt gehouden met het effect van de pH. De afgeleide bindingsvergelijkingen worden in *deelrapport-2* geïmplementeerd in het geo-chemisch model ECOSAT en getoetst op de hier besproken experimenten.

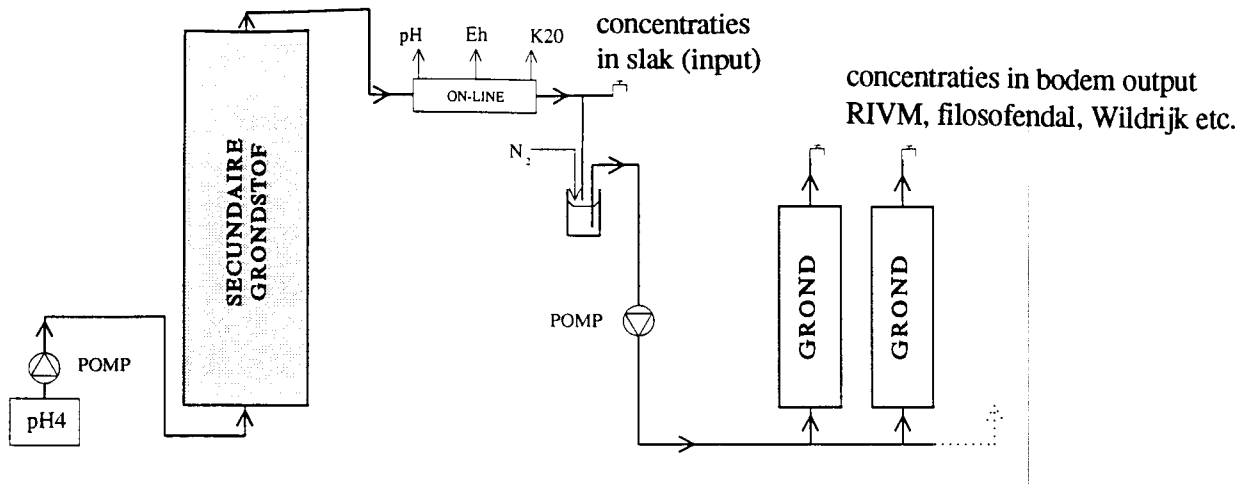
REFERENTIES

1. Aalbers, Th.G. et al, Milieuhygiënische kwaliteit van primaire en secundaire bouwmaterialen in relatie tot hergebruik en bodem- en oppervlaktewaterenbescherming, RIVM rapport 771402006, 1993
2. Keizer, M.G., W.H. van Riemsdijk, ECOSAT, A computer program for the calculation of Speciation and Transport in soil-water systems, Landbouwniversiteit Wageningen, vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding, version 3.4, 1994
3. De Wilde, P.G.M., Beoordeling van gereinigde grond, I. Uitloogkarakteristieken en chemische samenstelling van referentiegronden, RIVM rapport 216402001, 1992
4. Van Lagen, B., Manual for chemical Soil Analyses, Department of Soil Science and Geology, Agricultural University Wageningen, 1993
5. Van Riemsdijk, W.H., L.J.M. Bouwmans, F.A.M. de Haan, Phosphate sorption by soils, I. A diffusion-precipitation model for the reaction of phosphate with metal oxides in soil, Soil Sci. Soc. Am. Journal 48: 541-544, 1984
6. NEN 7343, Bepaling van de uitloogkarakteristieken van anorganische componenten uit korrelvormige bouwmaterialen en afvalstoffen.
7. Redox potential measurement in natural waters, Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 339: 445 - 462, 1991
8. TAUW Infra Consult bv, Rol van facilitated transport bij de verspreiding van relatief slecht in water oplosbare componenten, fase 2. Oriënterend laboratoriumonderzoek, rapport nr. 3198499, 1993
9. Donkers, H.W.J., Samenhang tussen twee of meer variabelen, SOS, 1989
10. Wesselink, L.G., P.M. Dekker en Th.G. Aalbers, Chemical Processes Controlling the Mobility of Waste Material Contaminants in Soils, Section 2: Environmental Aspects, Studies in Environmental Science 60, ISBN 0-444-81853-7, 1994
11. Wesselink, L.G., P.M. Dekker, Verspreiding van emissies uit secundaire grondstoffen in bodems, Deel 2, Modellering, RIVM rapport 771402018 (in preparation).
12. De Vries, W., Average critical loads for nitrogen and sulfur and its use in acidification abatement policy in the Netherlands, Water and Soil Pollution 68: 399-434, 1993
13. Viellard, P., F. Rassinoux, Thermodynamic and geochemical modelling of the alternation of two cement matrices, Applied Geochemistry, Suppl. Issue No.1, p. 125-136, 1992
14. TAUW Infra Consult bv, Rol van drager-gebonden transport bij de verspreiding van relatief slecht in water oplosbare componenten, fase 1, rapport nr. 3154270, 1991

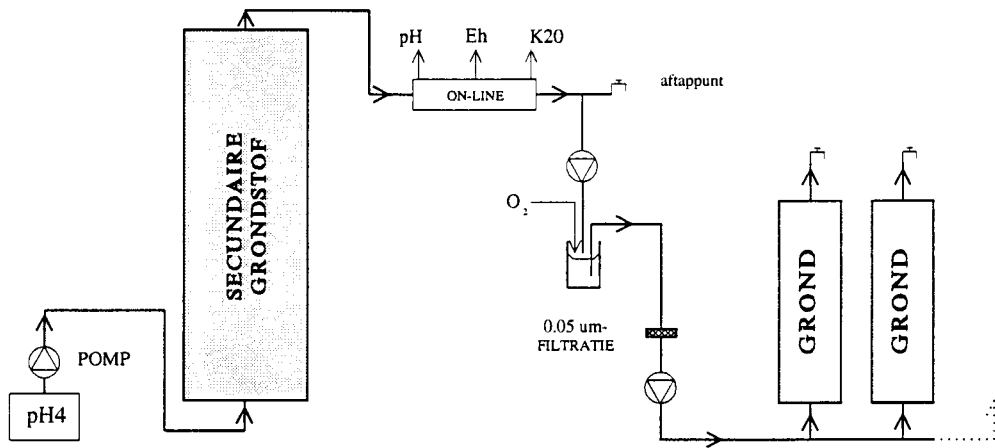
BIJLAGE 1

resultaten fosforslakproef

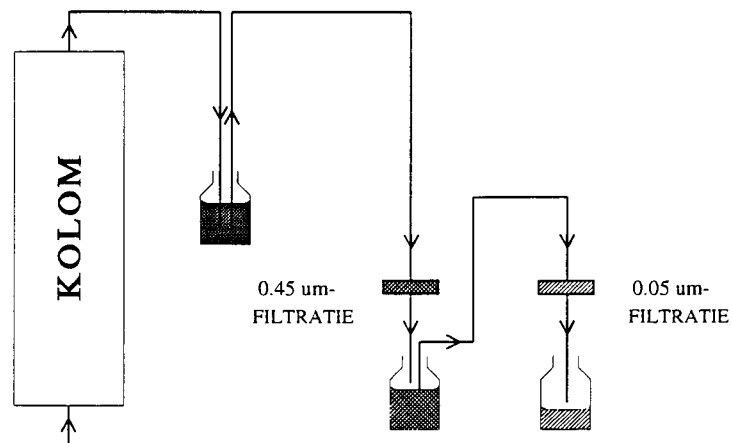
Schematische weergave kolomproef, niet belucht.



Schematische weergave kolomproef, belucht.



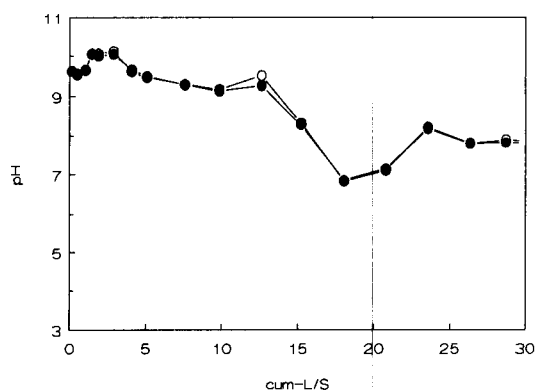
Schematische weergave filtratie percolaten.



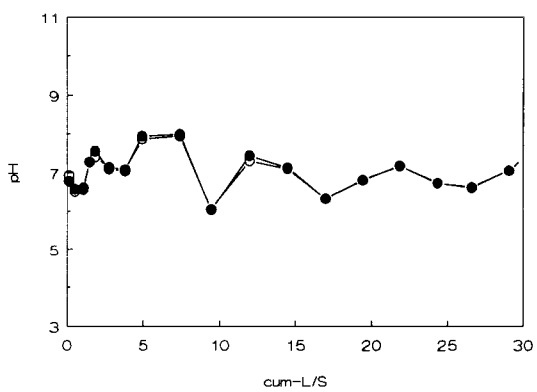
pH percolaat na filtreren

- ○ — 0.45 μ m-filter
- ● — 0.05 μ m-filter

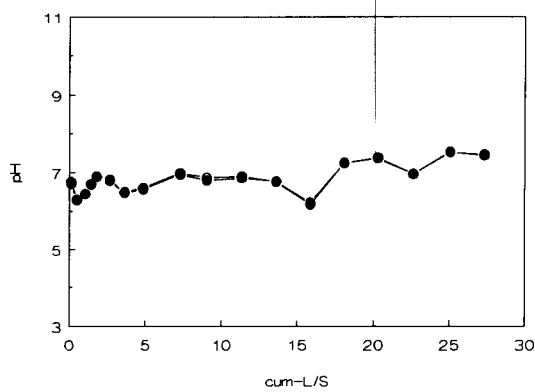
Fosforslak (input)



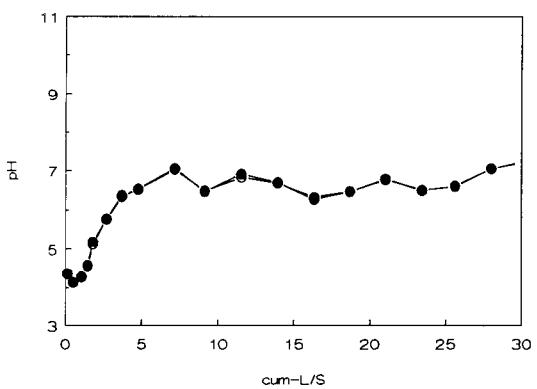
RIVM
(niet belucht)



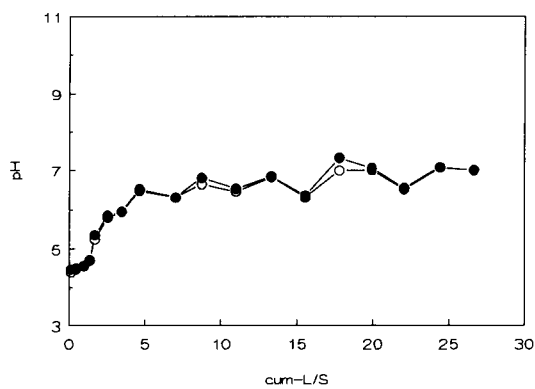
RIVM
(belucht)



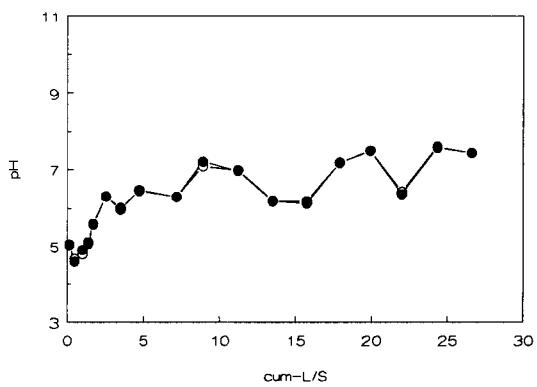
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



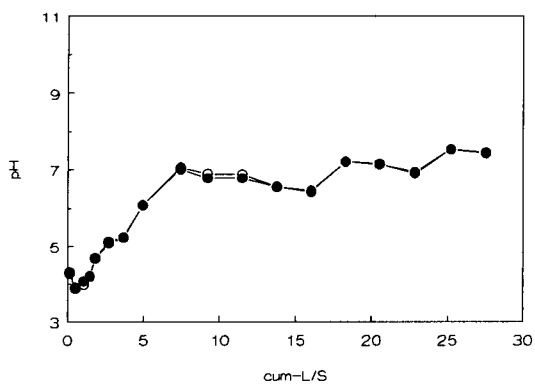
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)

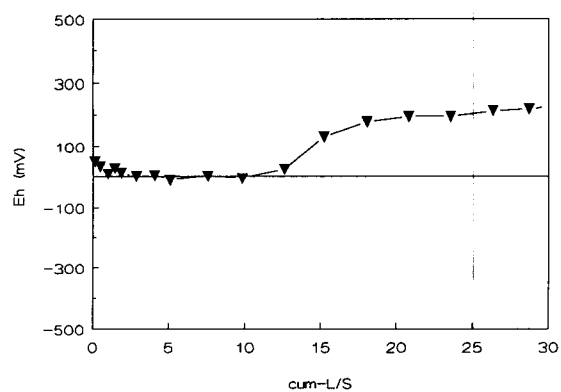


Wildrijk
(belucht)

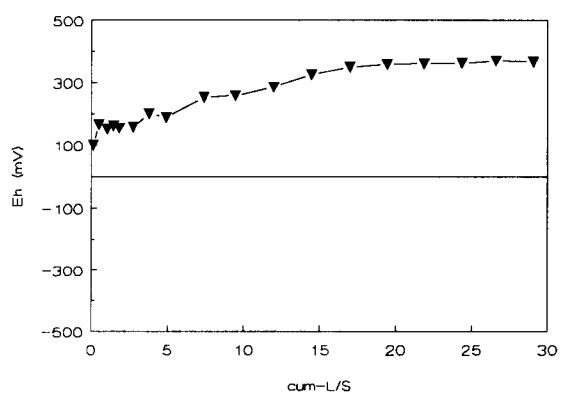


Redoxpotentiaal percolaat
ON-LINE (mV)

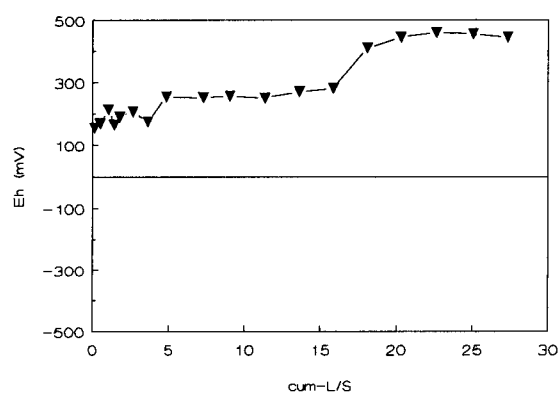
Fosforslak (input)



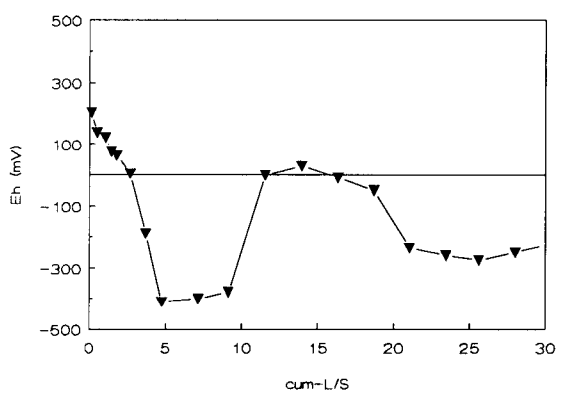
RIVM
(niet belucht)



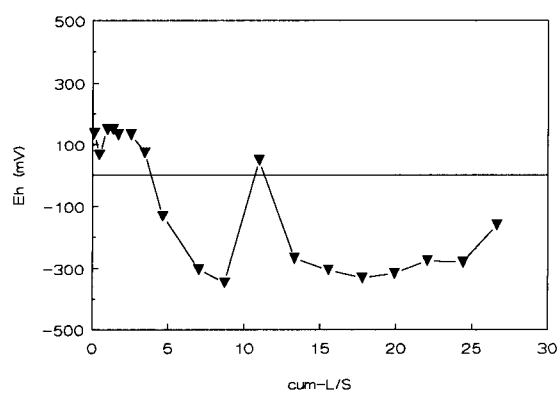
RIVM
(belucht)



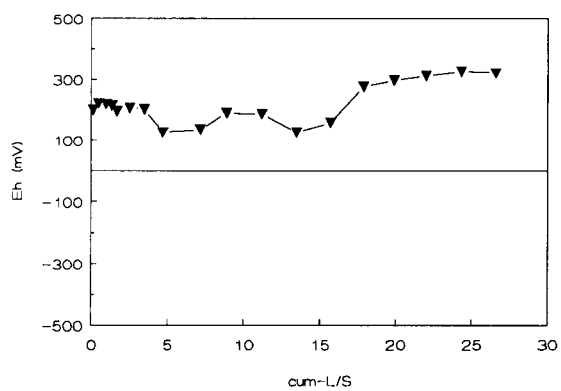
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



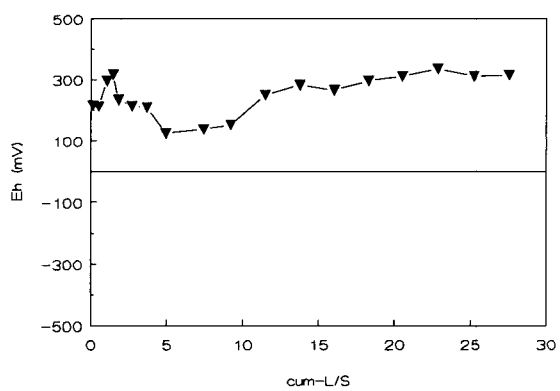
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



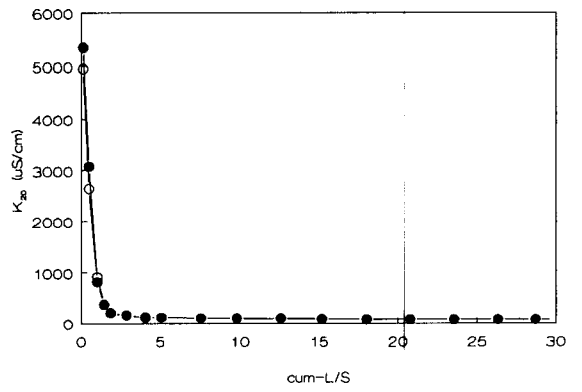
Wildrijk
(belucht)



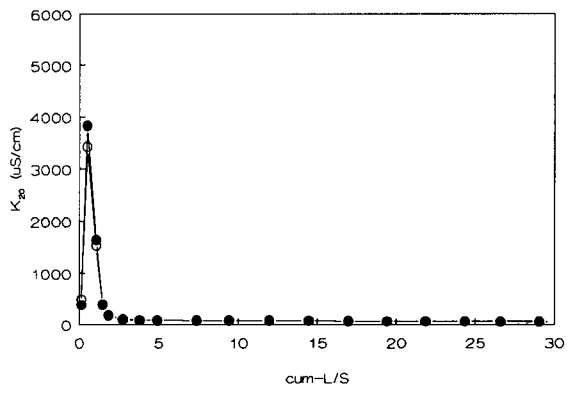
Geleidbaarheid percolaat
na filtreren (uS/cm)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

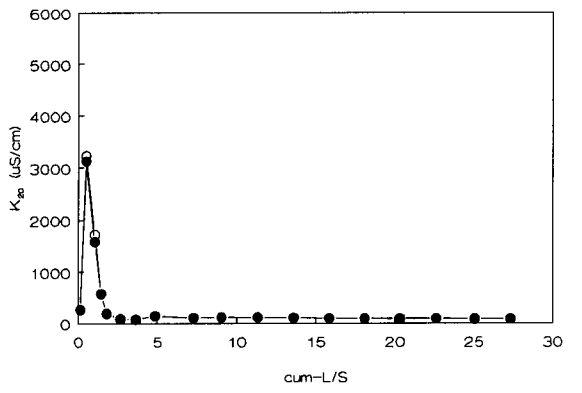
Fosforstak (input)



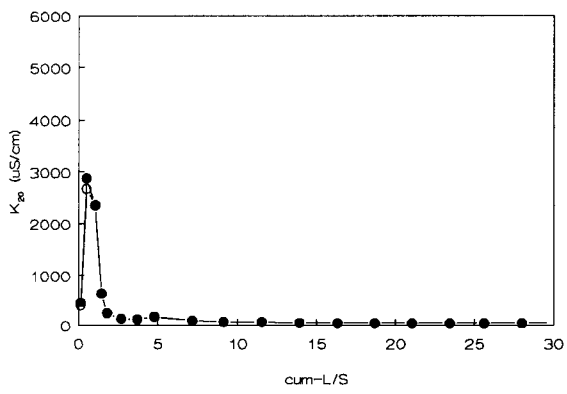
RIVM
(niet belucht)



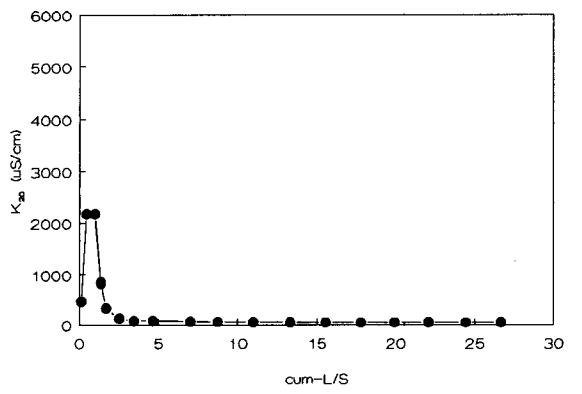
RIVM
(belucht)



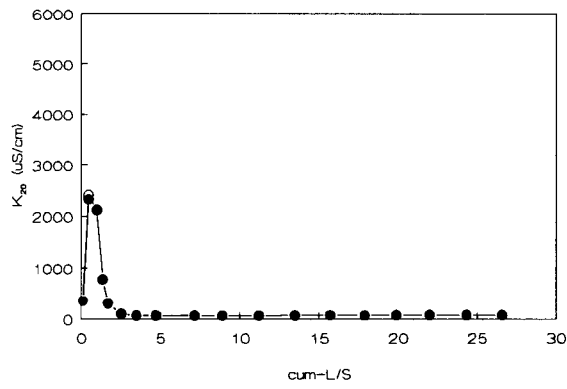
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



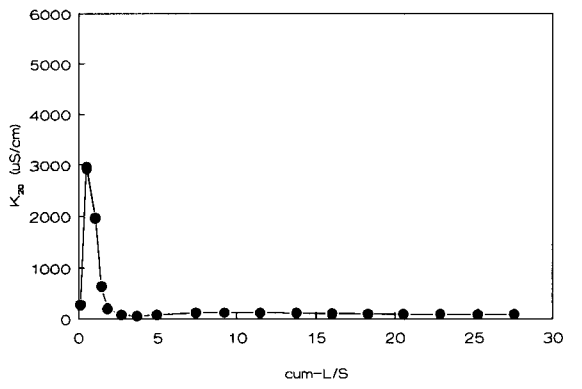
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



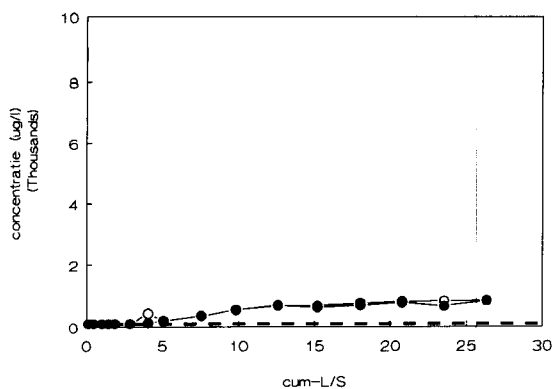
Wildrijk
(belucht)



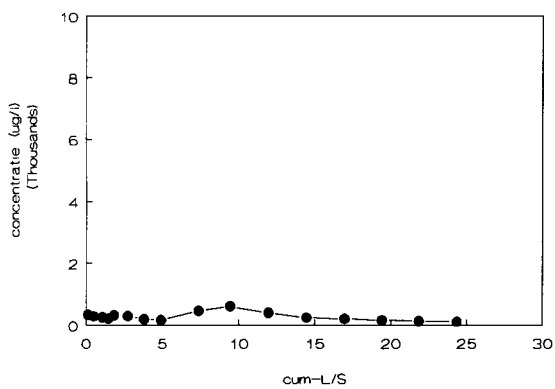
Concentratie aluminium (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

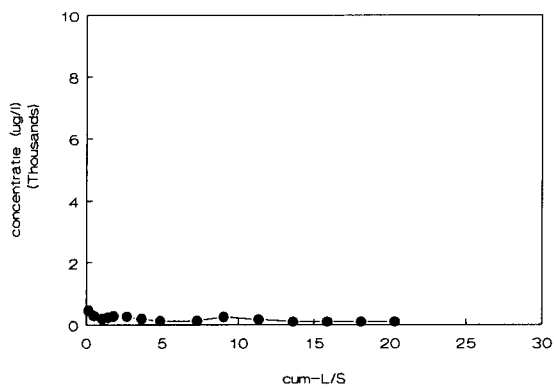
Fosforstak (input)



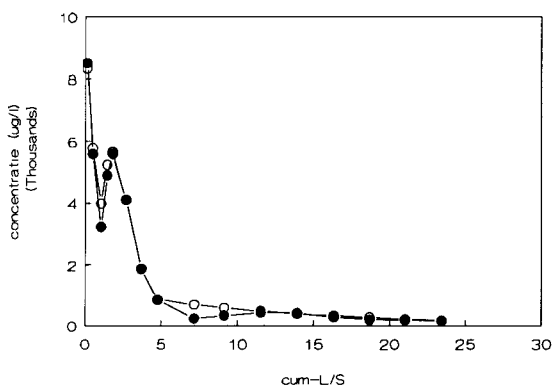
RIVM
(niet belucht)



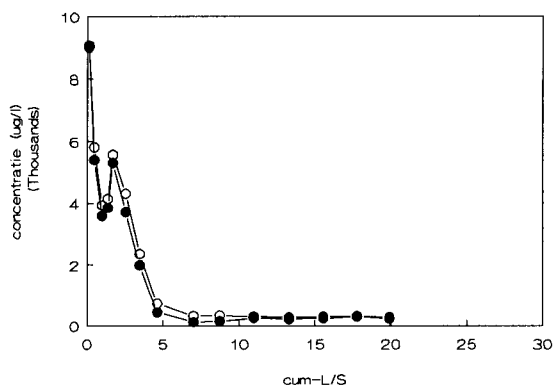
RIVM
(belucht)



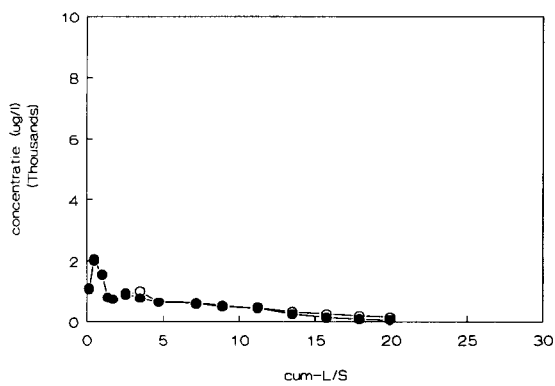
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



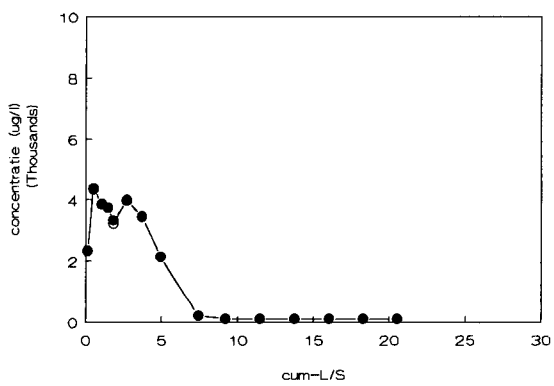
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)

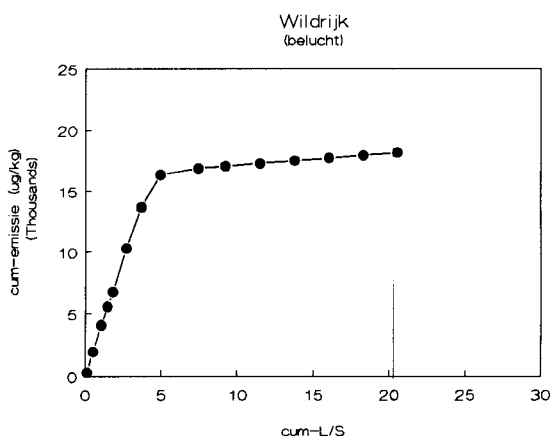
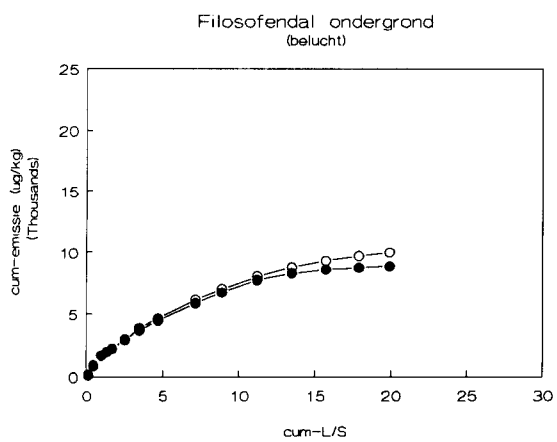
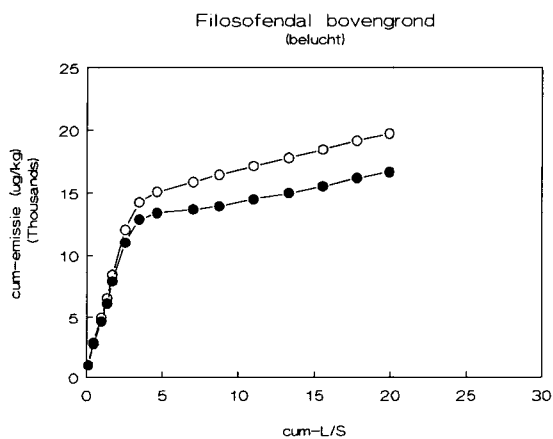
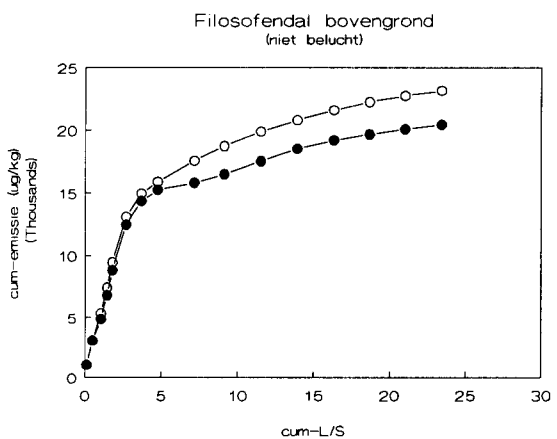
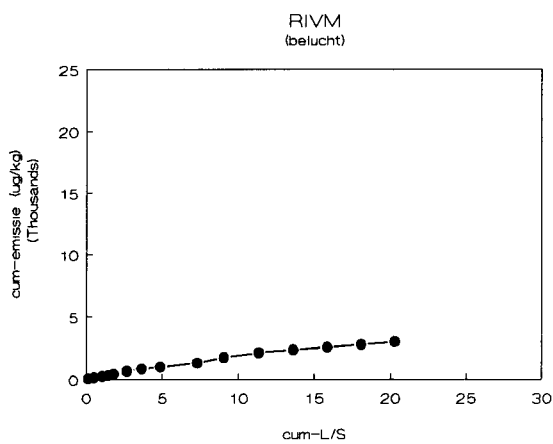
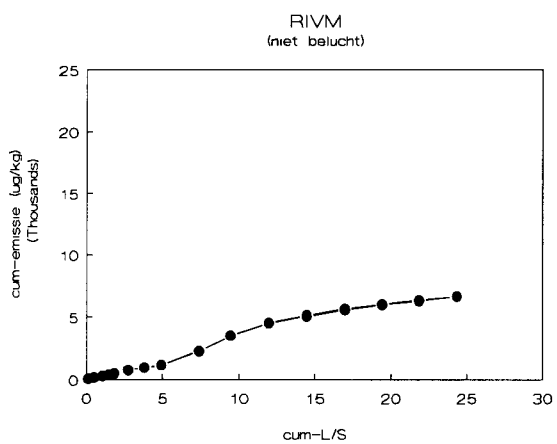
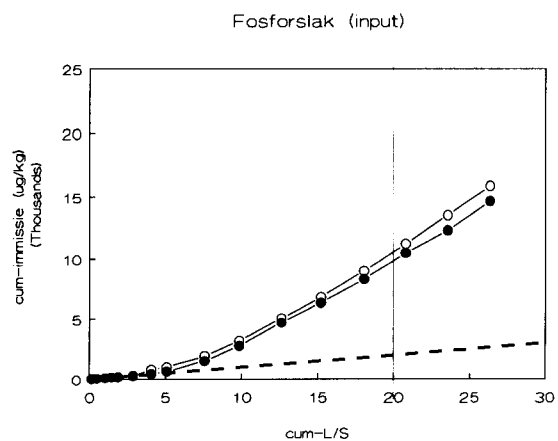


Wildrijk
(belucht)



Cumulatieve emissie en immissie aluminium ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

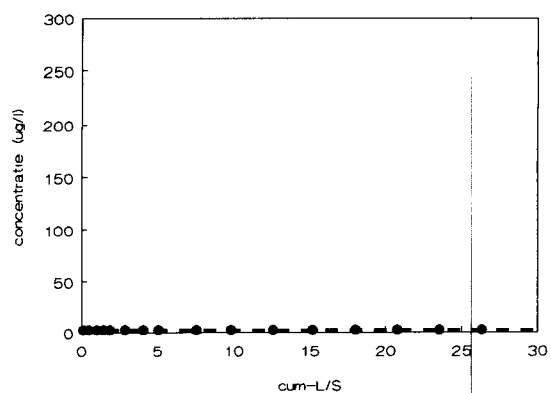
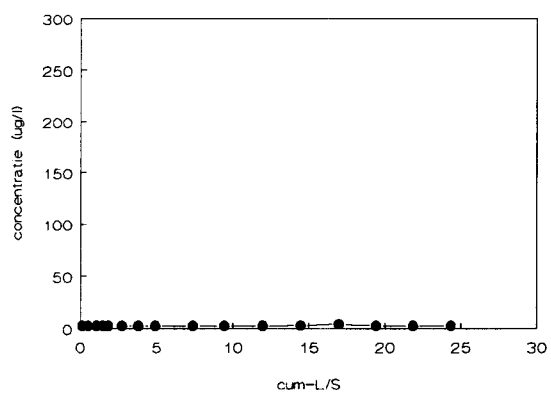
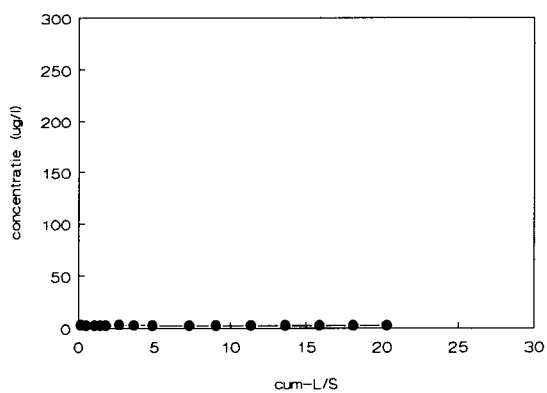
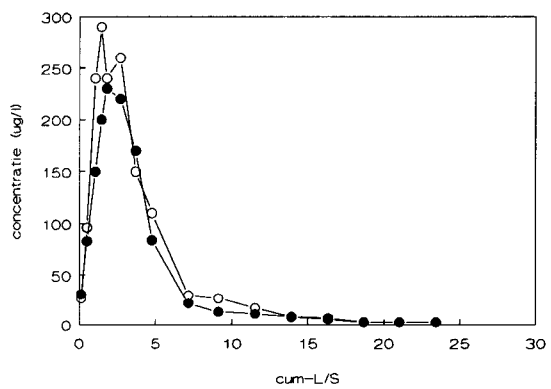
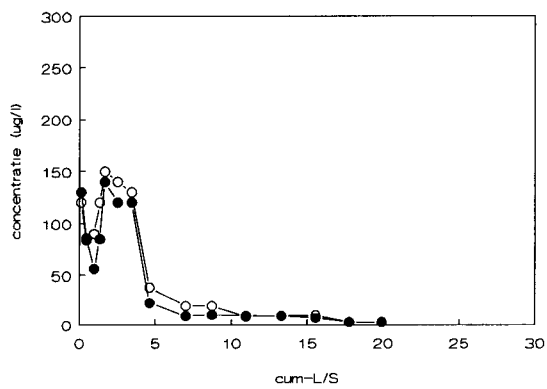
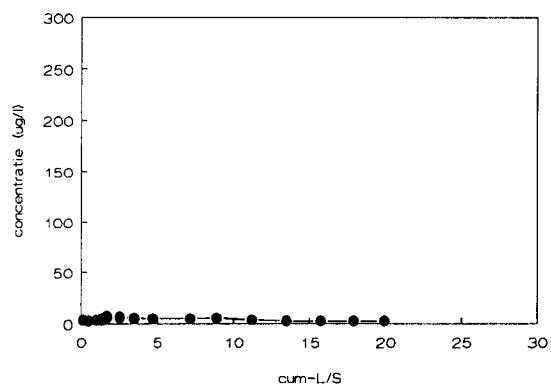
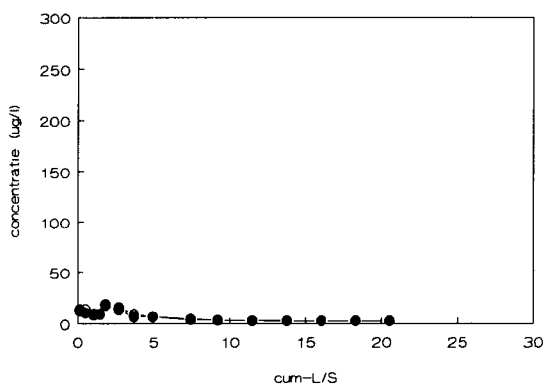
- ○ — 0.45 μm -filter
 — ● — 0.05 μm -filter



Concentratie arseen (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
 — ● — 0.05 um-filter

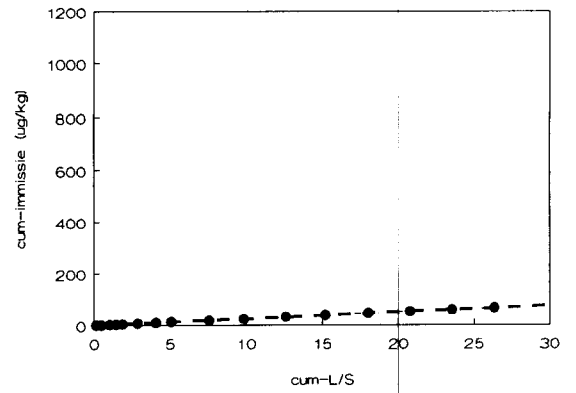
Fosforslak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

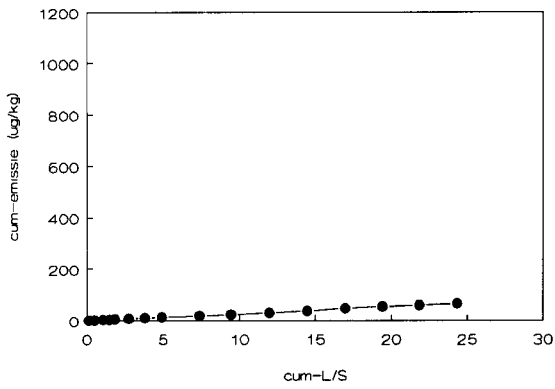
Cumulatieve emissie en immissie arseen (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

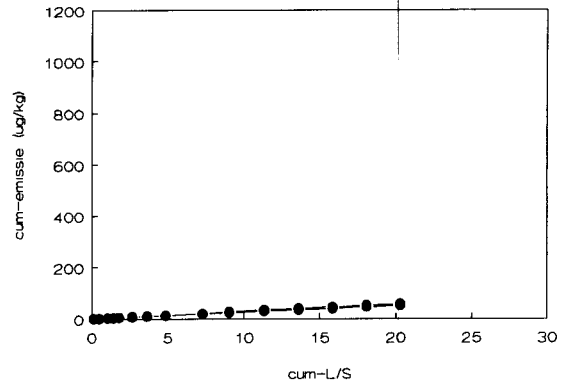
Fosforslak (input)



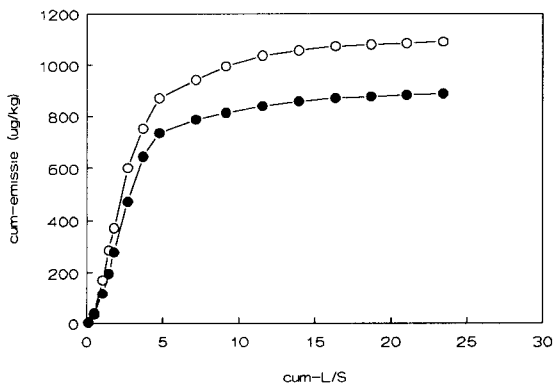
RIVM (niet belucht)



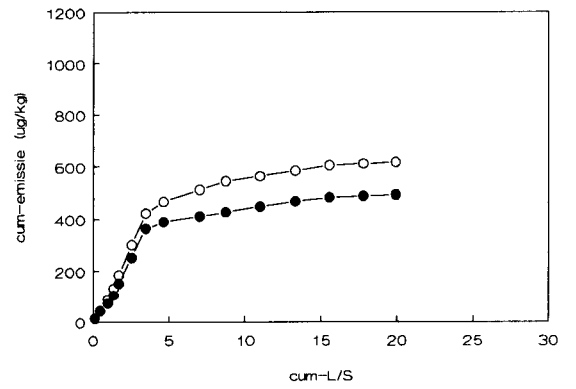
RIVM (belucht)



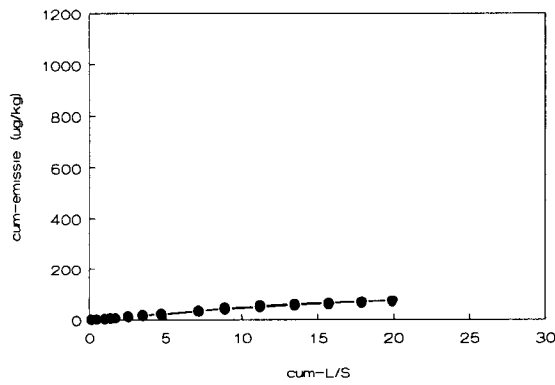
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



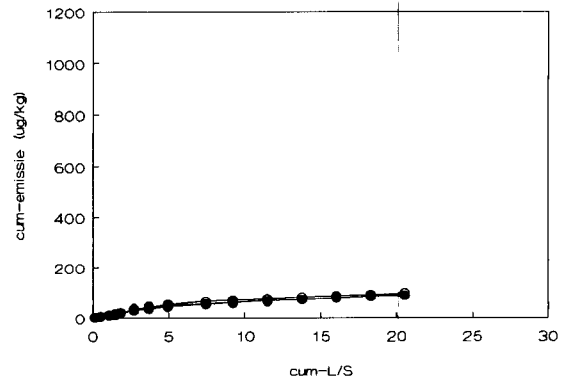
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



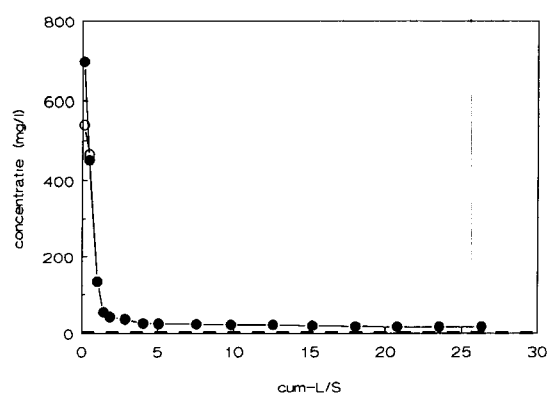
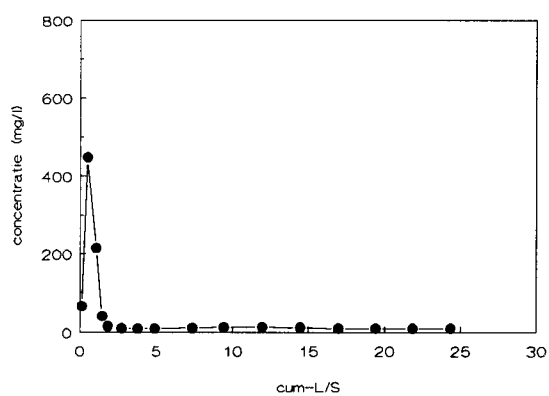
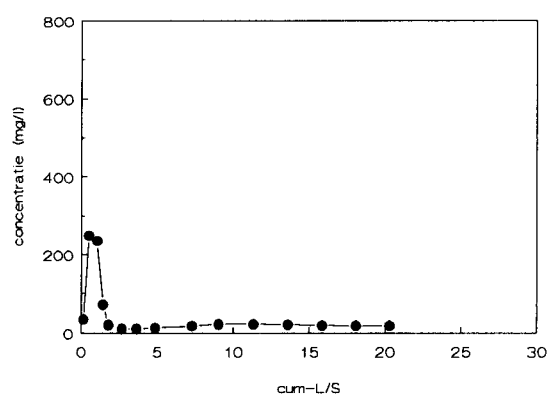
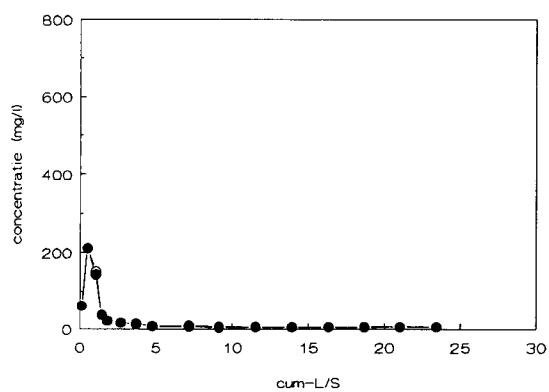
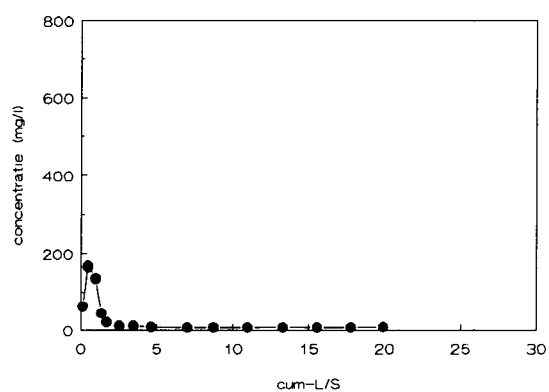
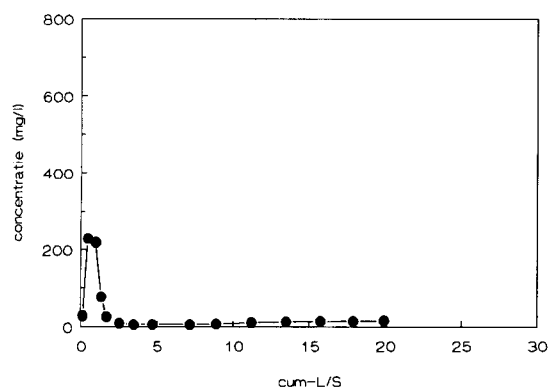
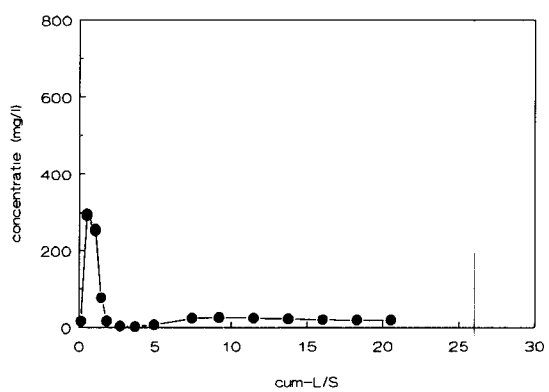
Wildrijk (belucht)



Concentratie calcium (mg/l)

- ○ — 0.45 μ m-filter
 — ● — 0.05 μ m-filter

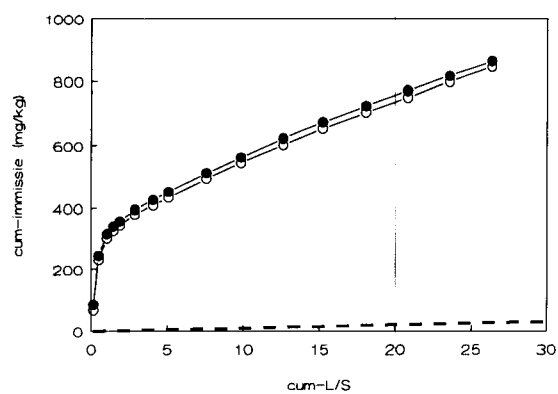
Fosforslak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

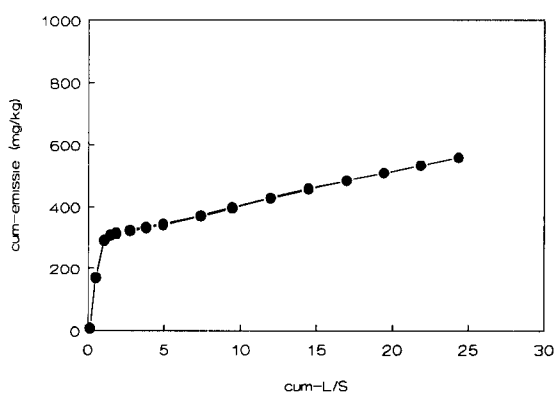
Cumulatieve emissie en immissie calcium (mg/kg)

- ○ — 0.45 μ m-filter
 — ● — 0.05 μ m-filter

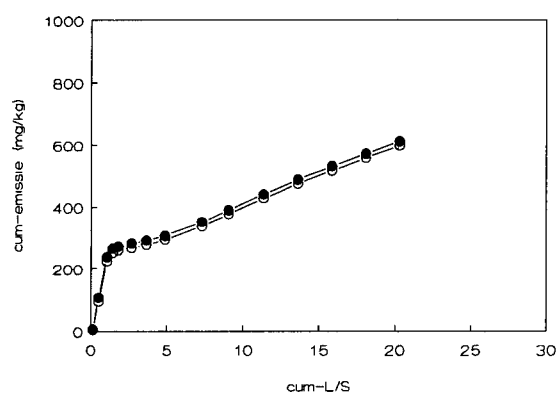
Fosforslak (input)



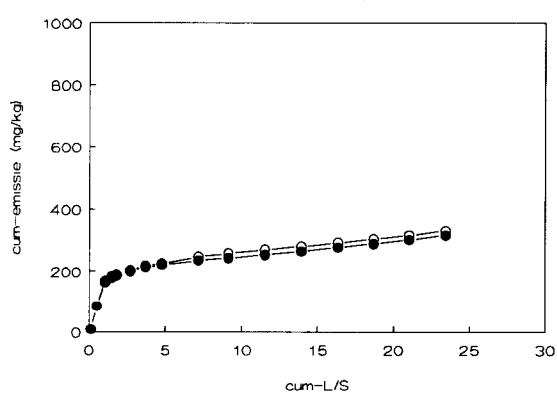
RIVM
(niet belucht)



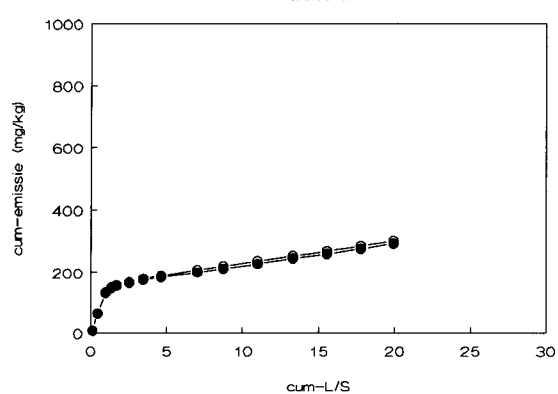
RIVM
(belucht)



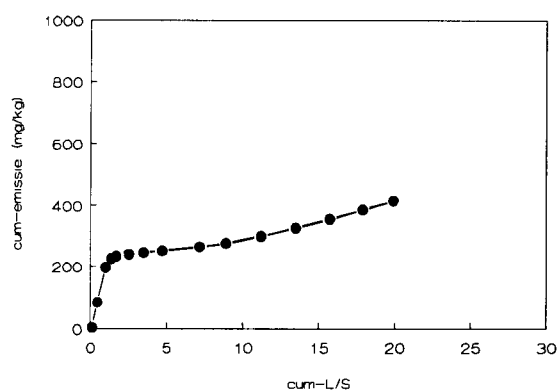
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



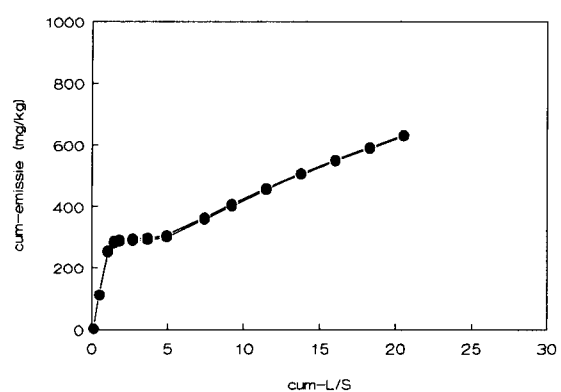
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



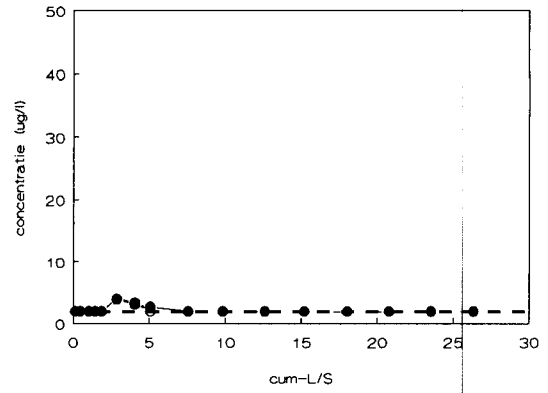
Wildrijk
(belucht)



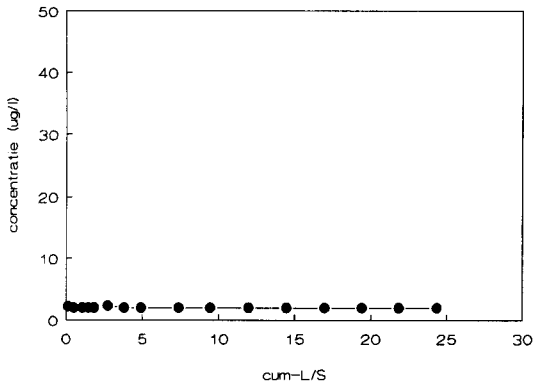
Concentratie chroom (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

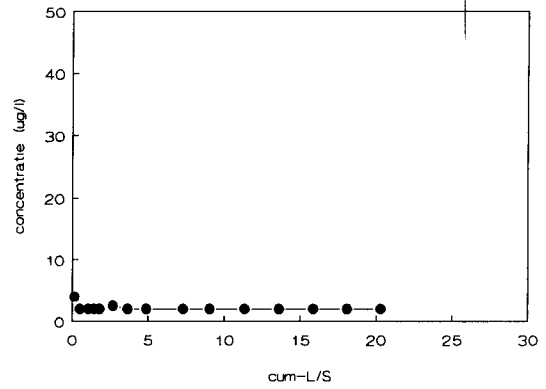
Fosforslak (input)



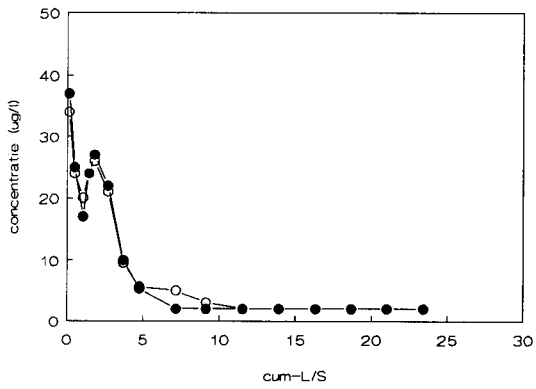
RIVM
(niet belucht)



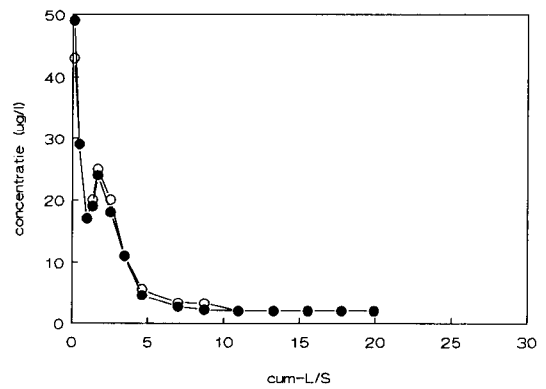
RIVM
(belucht)



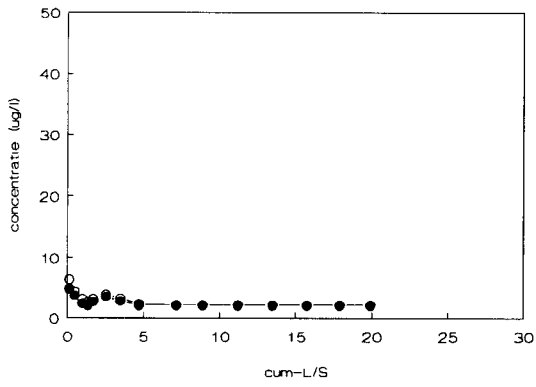
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



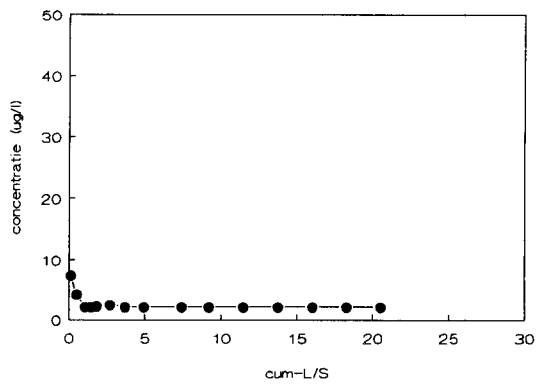
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



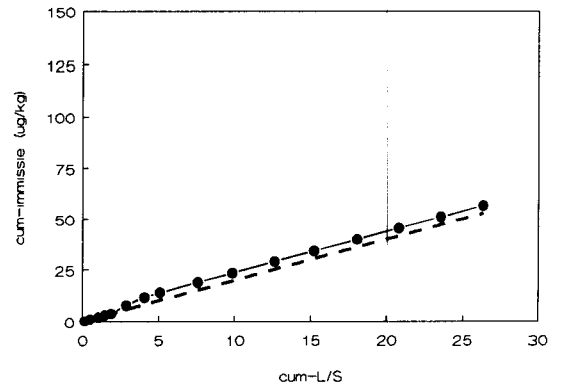
Witdriek
(belucht)



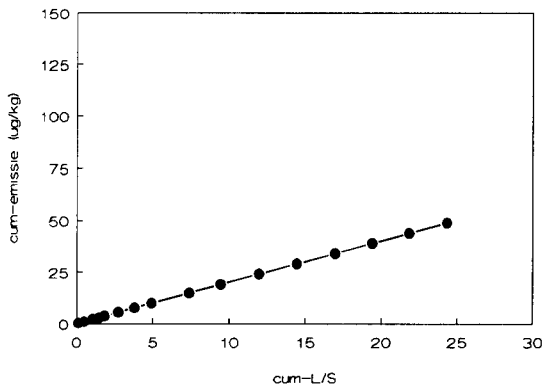
Cumulatieve emissie en immissie
chromium (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

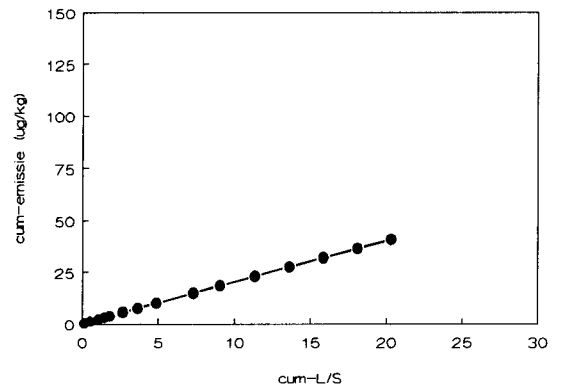
Fosforslak (input)



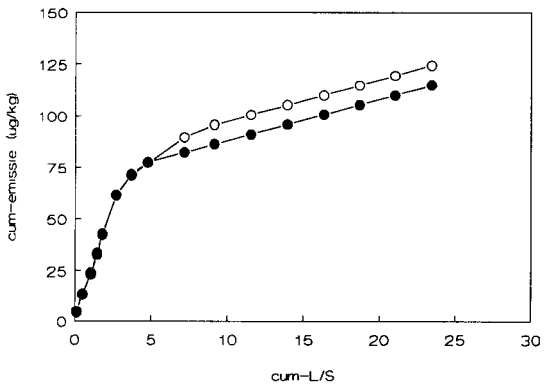
RIVM
(niet belucht)



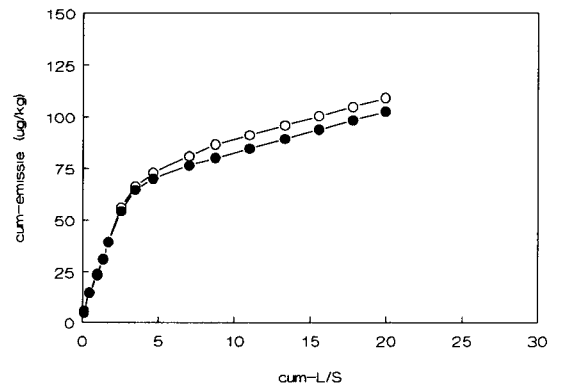
RIVM
(belucht)



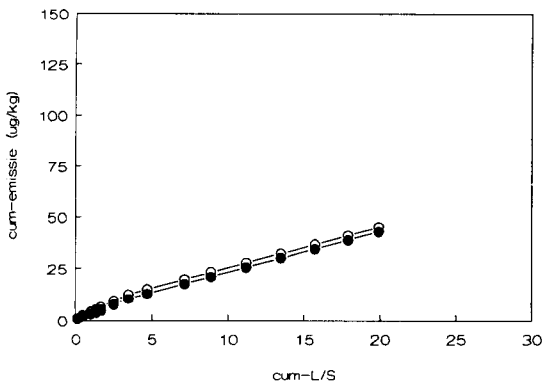
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



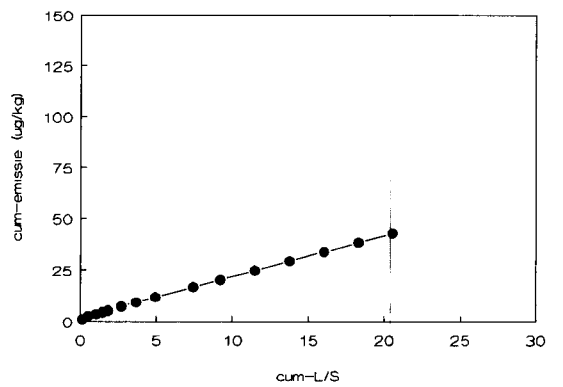
Filosofendal bovengrond
(belucht)

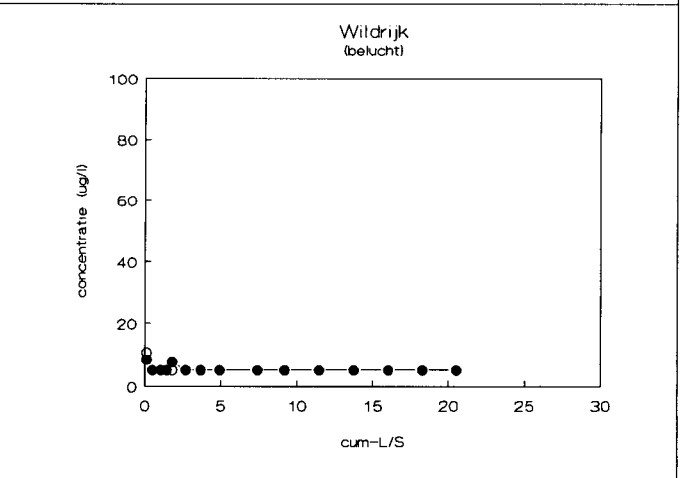
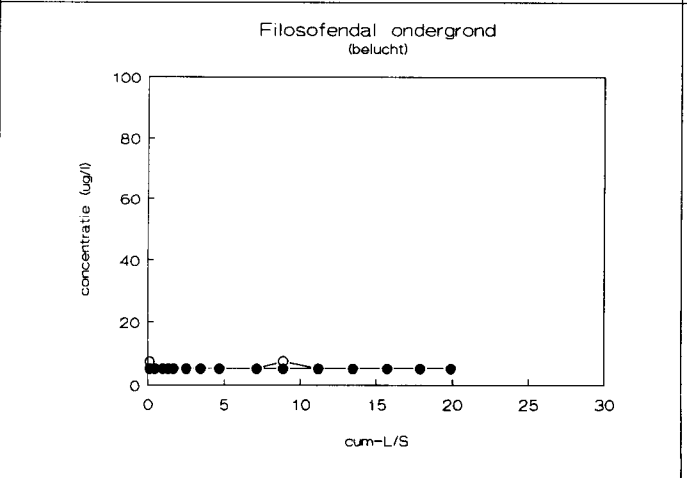
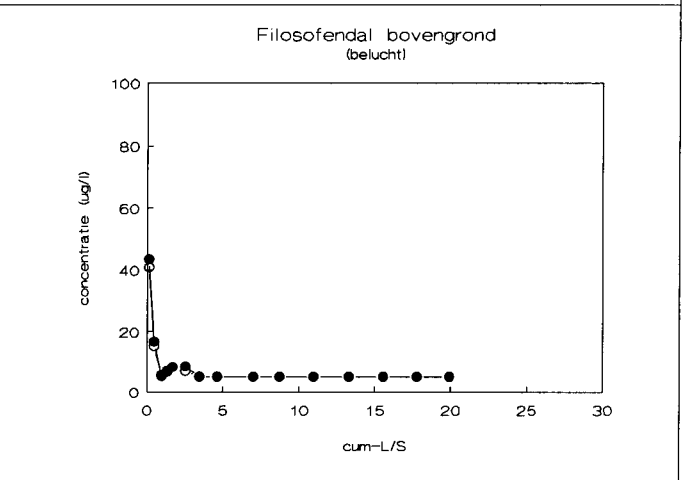
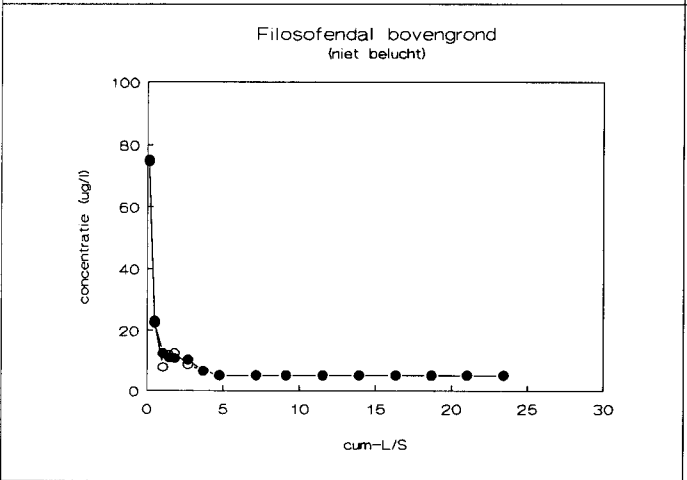
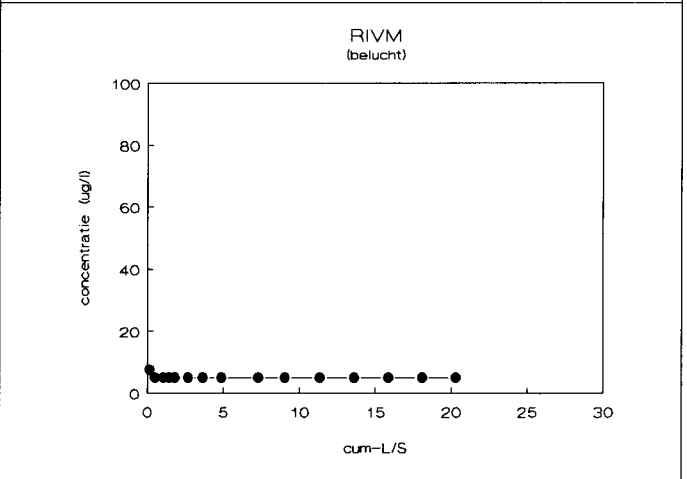
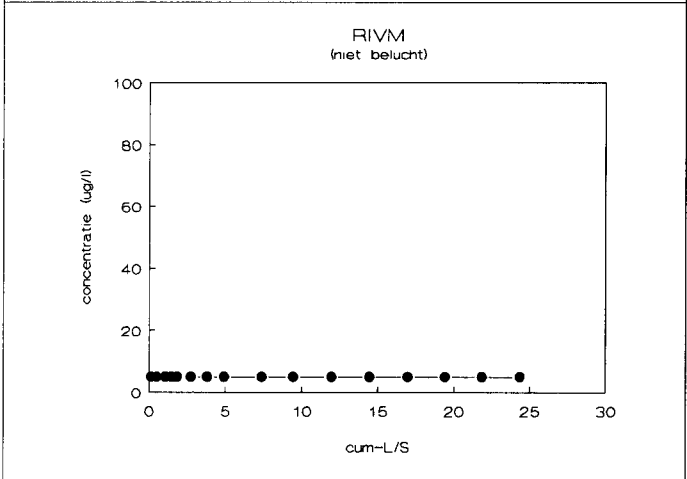
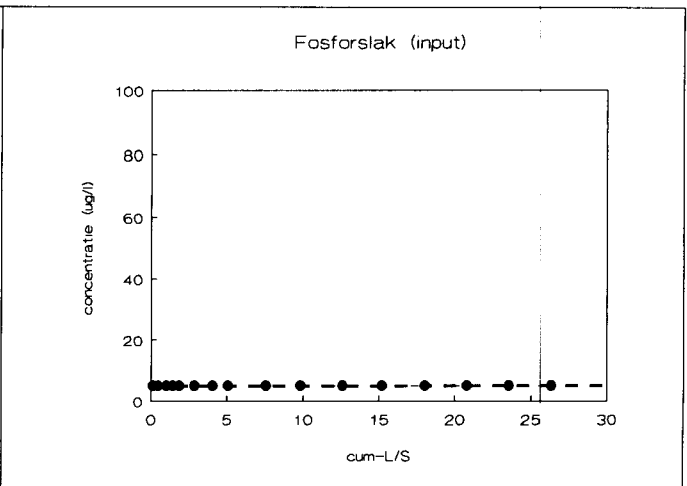
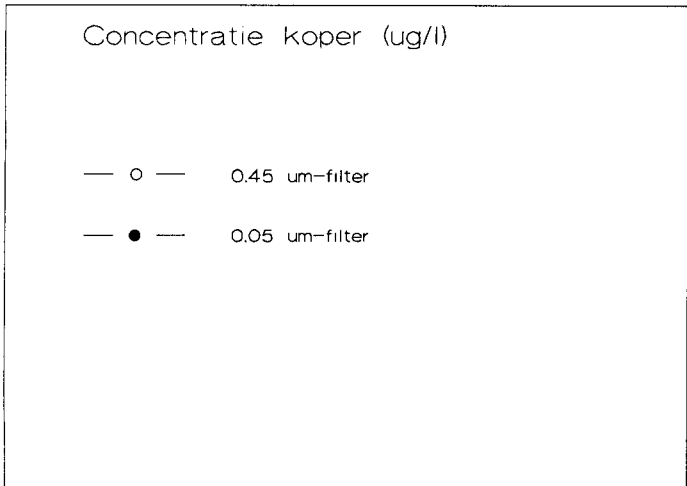


Filosofendal ondergrond
(belucht)



Wildrijk
(belucht)

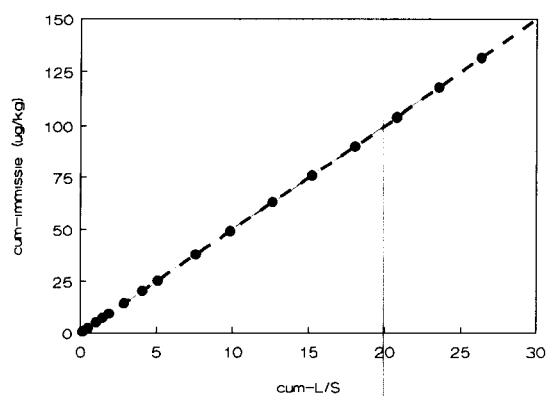




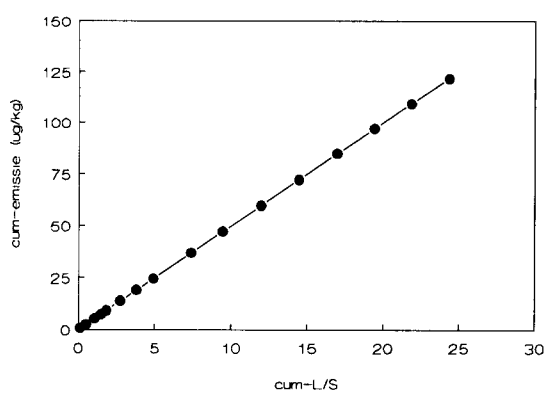
Cumulatieve emissie en immissie koper (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
 — ● — 0.05 um-filter

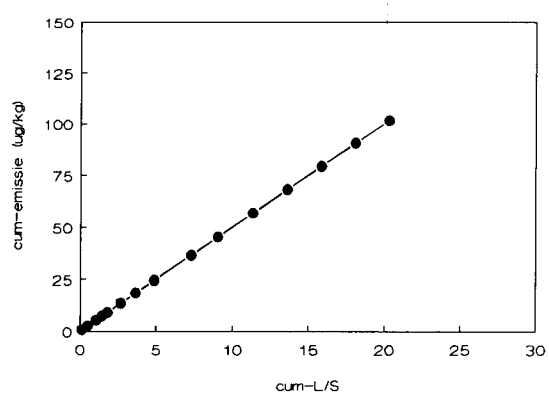
Fosforslak (input)



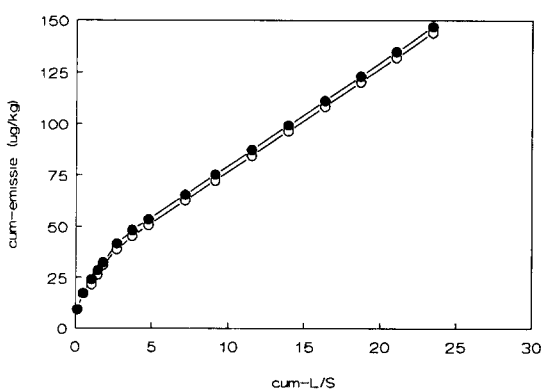
RIVM
(niet belucht)



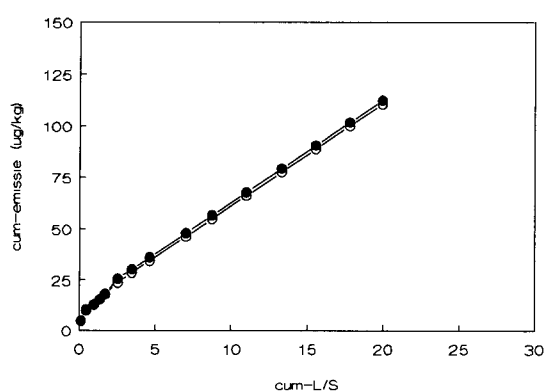
RIVM
(belucht)



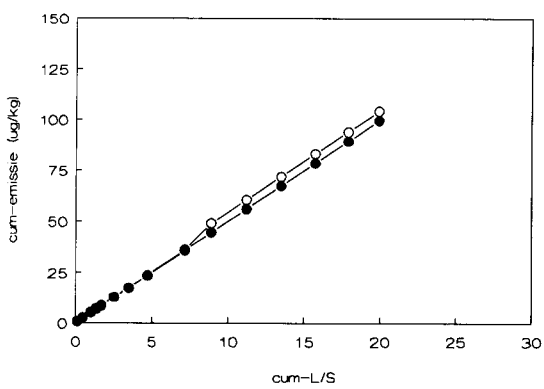
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



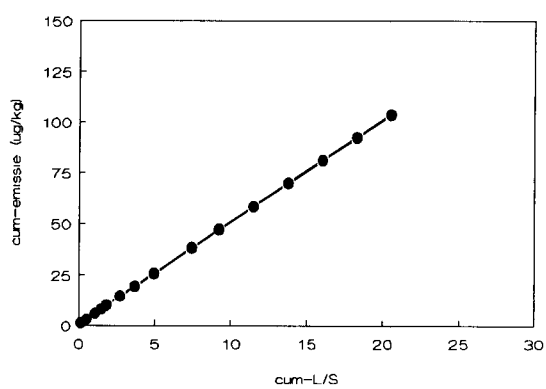
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



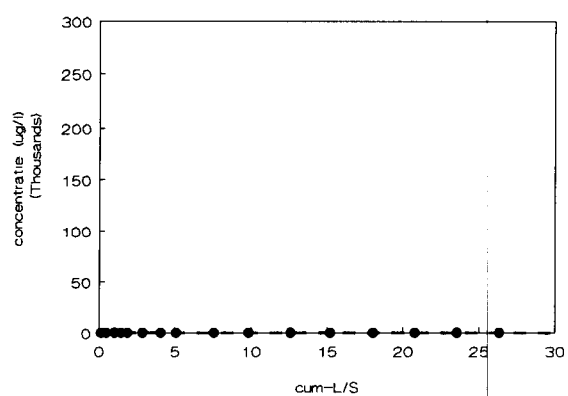
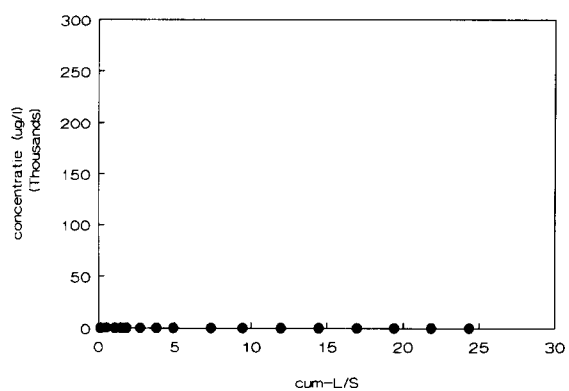
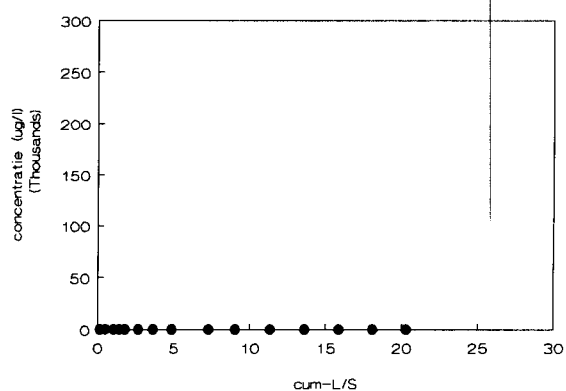
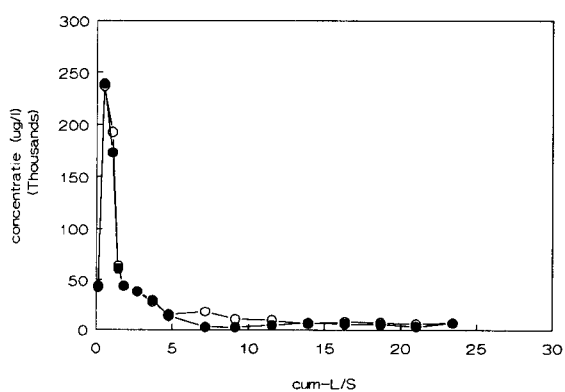
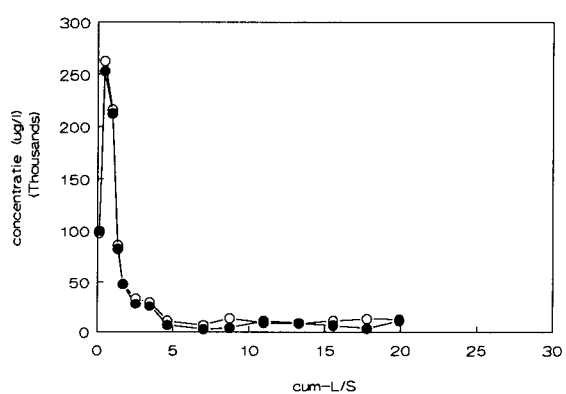
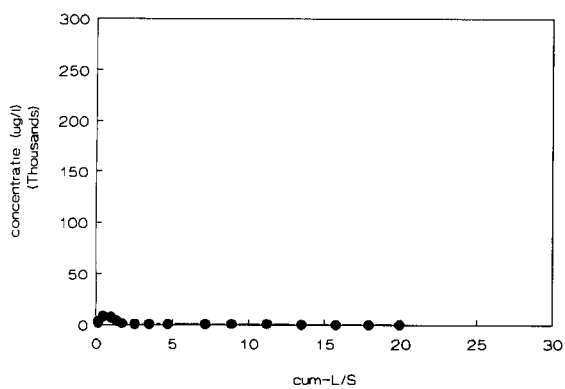
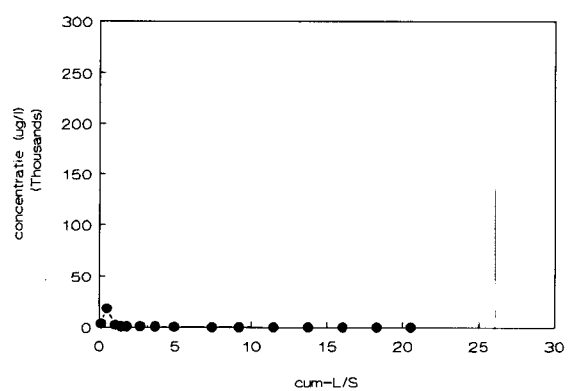
Wildrijk
(belucht)



Concentratie ijzer (ug/l)

— ○ — 0.45 um-filter
 — ● — 0.05 um-filter

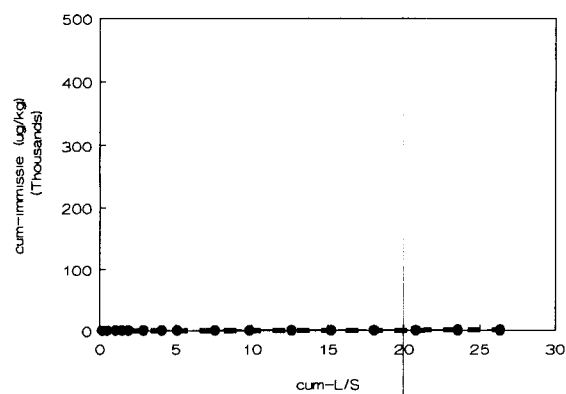
Fosforlak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

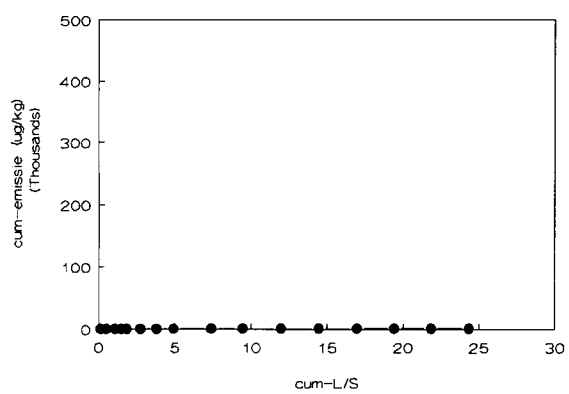
Cumulatieve emissie en immissie
ijzer (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
— ● — 0.05 um-filter

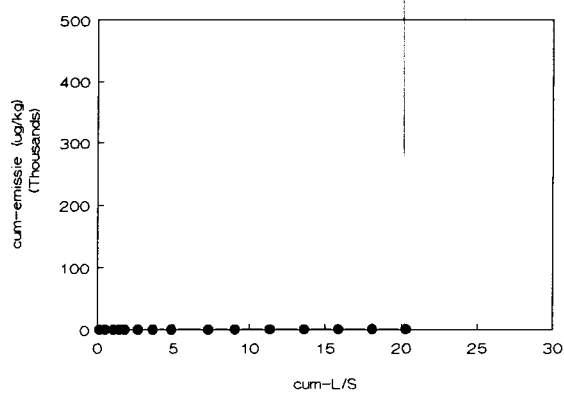
Fosforslak (input)



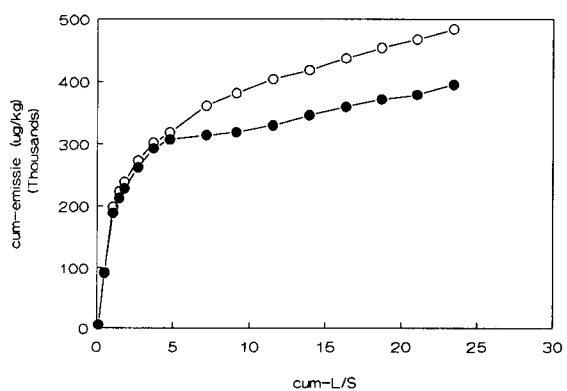
RIVM
(niet belucht)



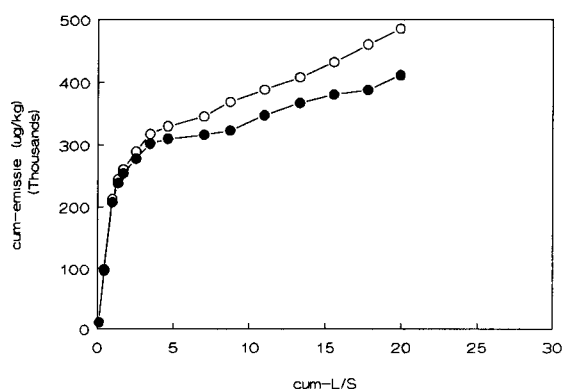
RIVM
(belucht)



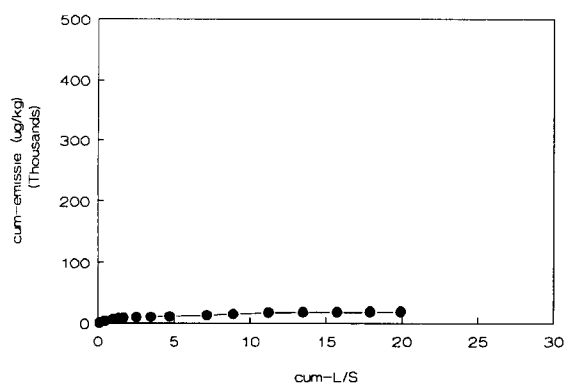
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



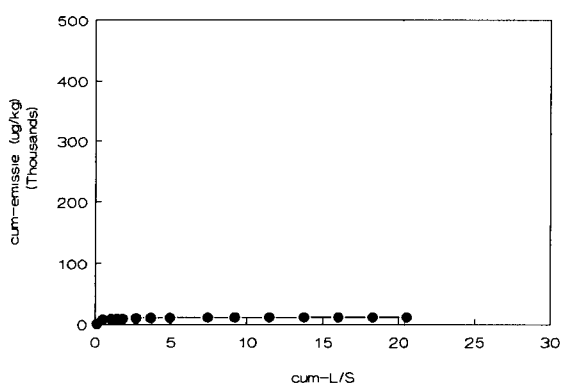
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



Wildrijk
(belucht)



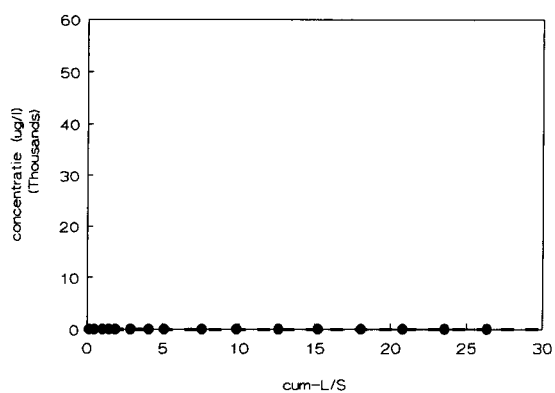
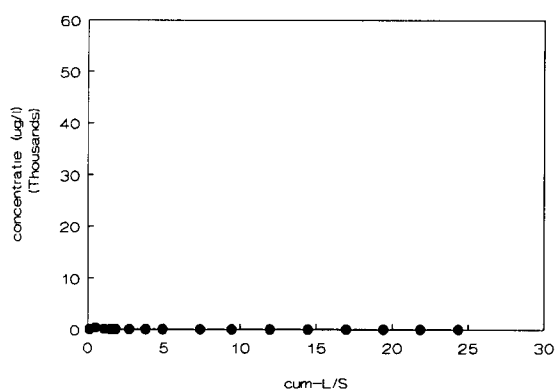
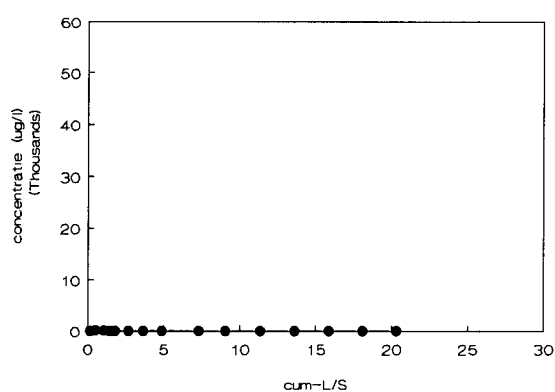
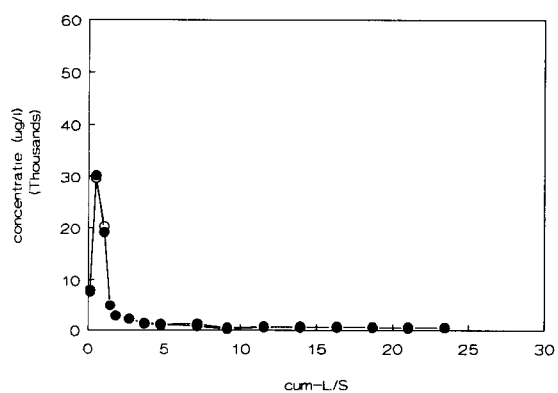
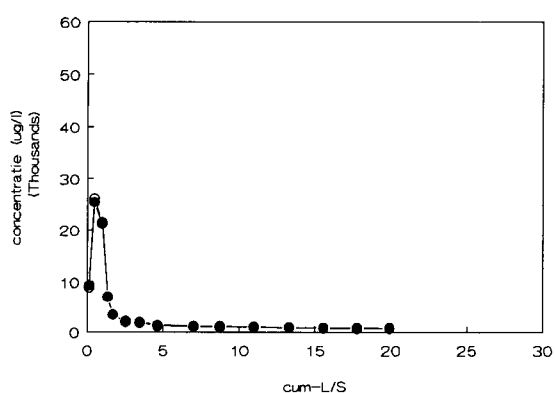
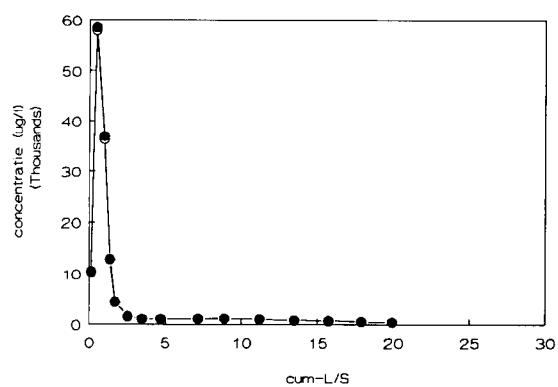
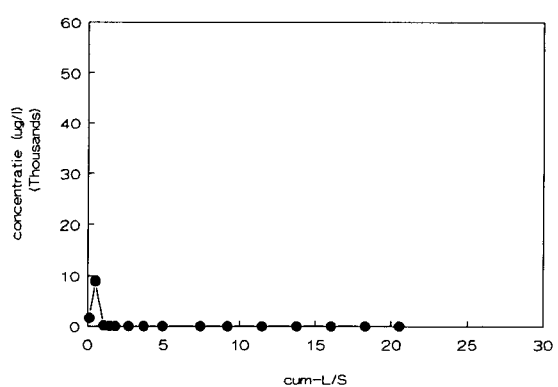
11

12

Concentratie mangaan ($\mu\text{g/l}$)

- ○ — 0.45 μm -filter
 — ● — 0.05 μm -filter

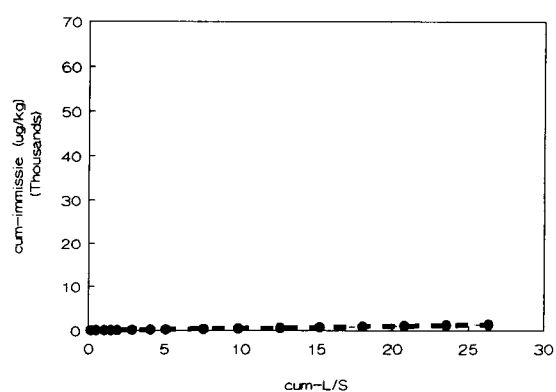
Fosforslak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

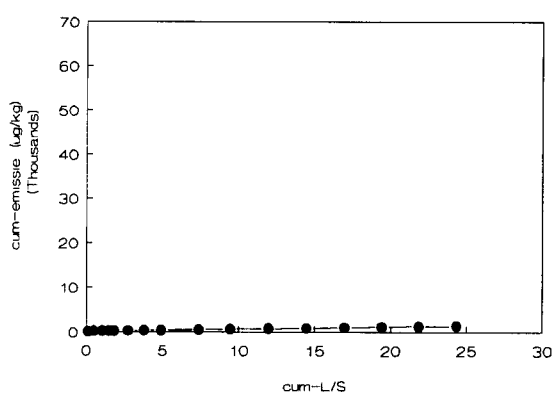
Cumulatieve emissie en immissie
mangaan ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

- ○ — 0.45 μm -filter
— ● — 0.05 μm -filter

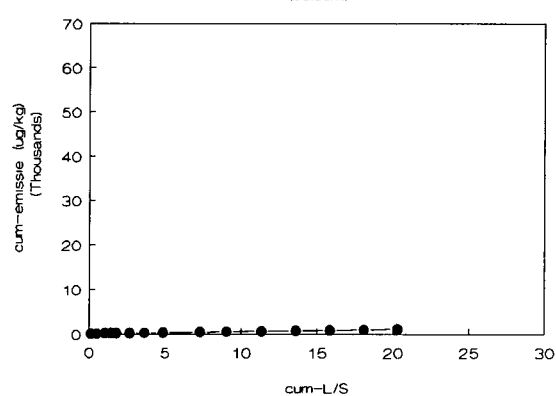
Fosforslak (input)



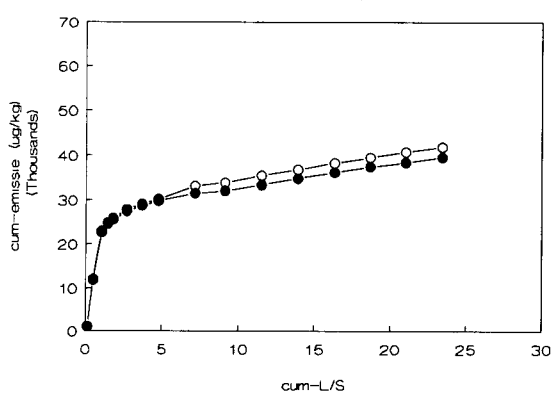
RIVM
(niet belucht)



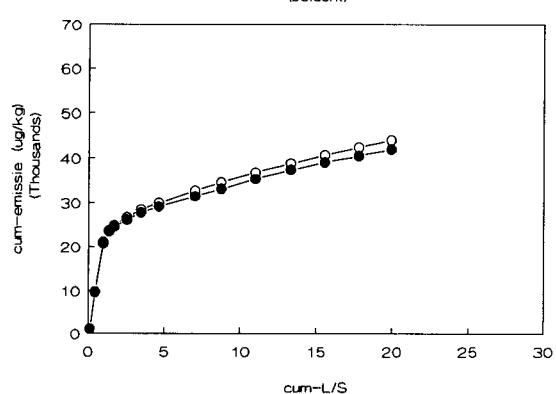
RIVM
(belucht)



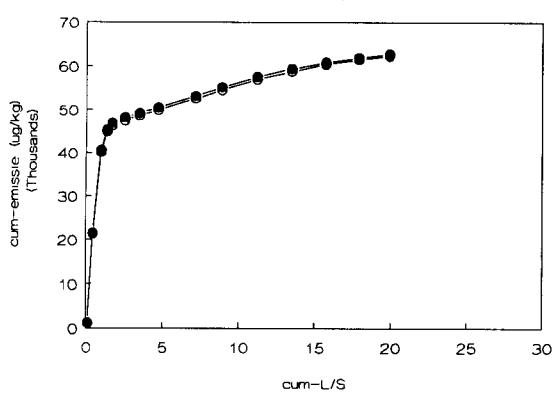
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



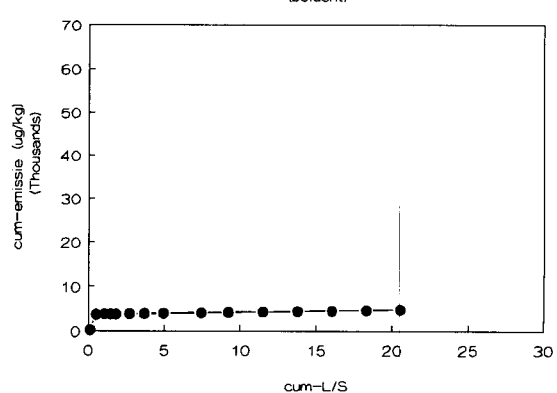
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



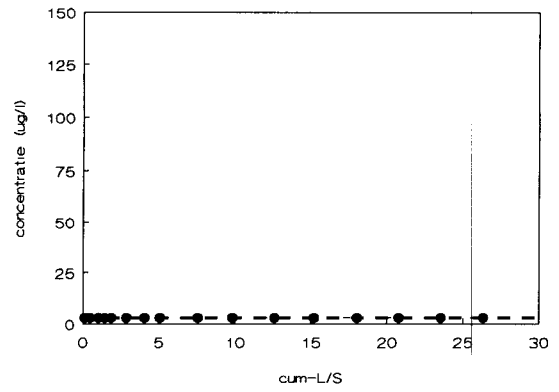
Wildrijk
(belucht)



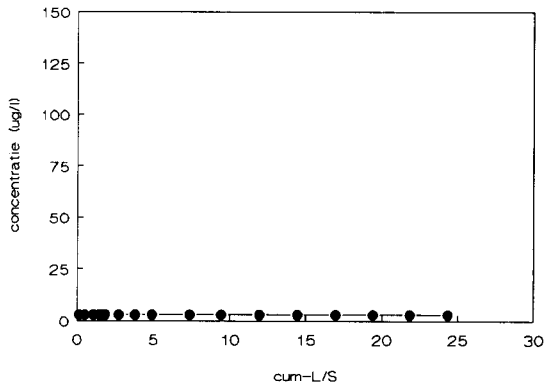
Concentratie lood (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

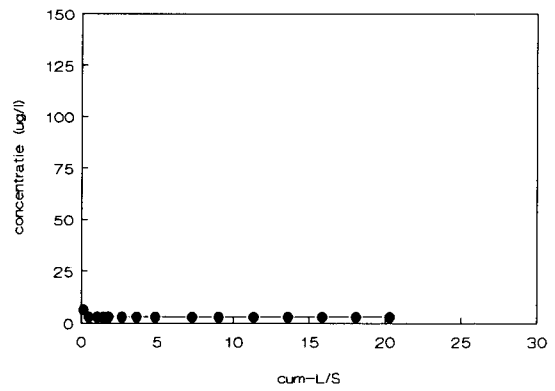
Fosforstik (input)



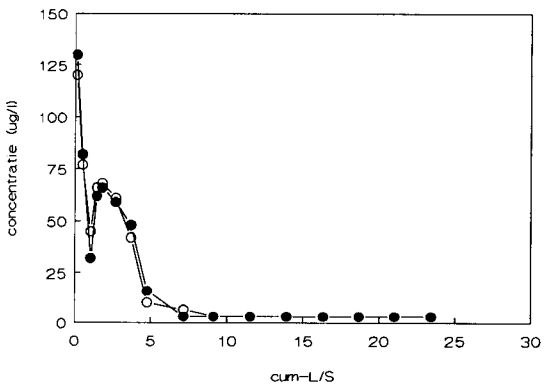
RIVM
(niet belucht)



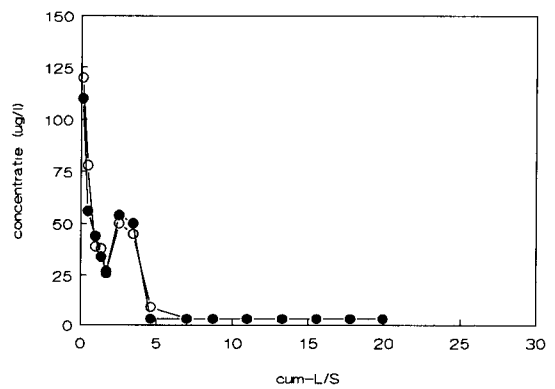
RIVM
(belucht)



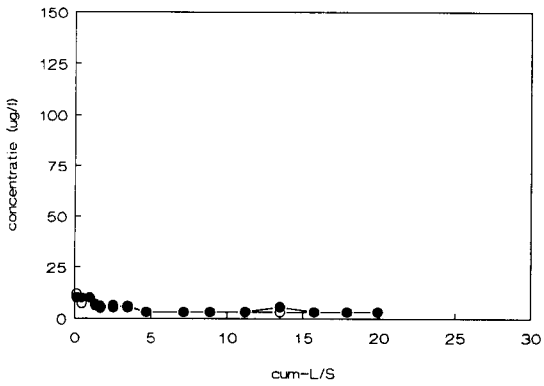
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



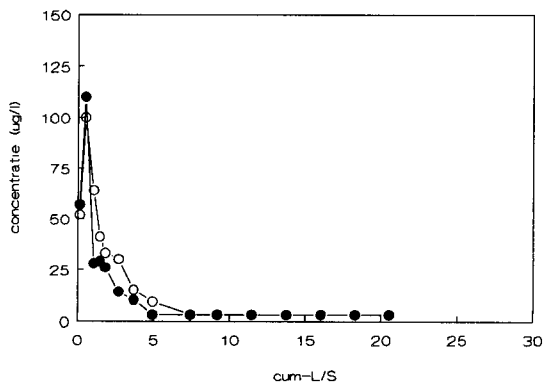
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



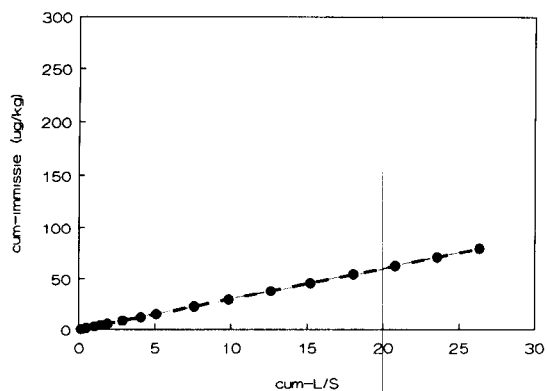
Wildrijk
(belucht)



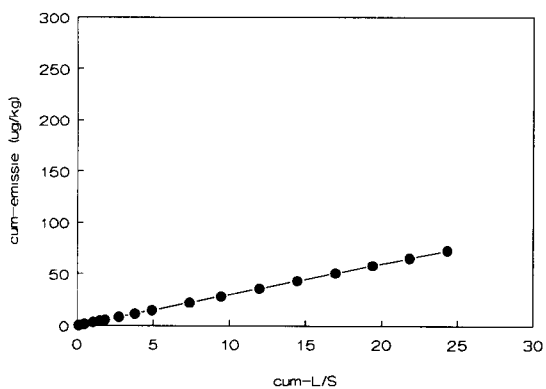
Cumulatieve emissie en immissie lood (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

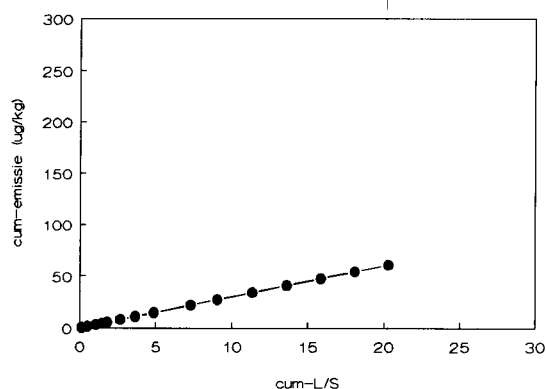
Fosforslak (input)



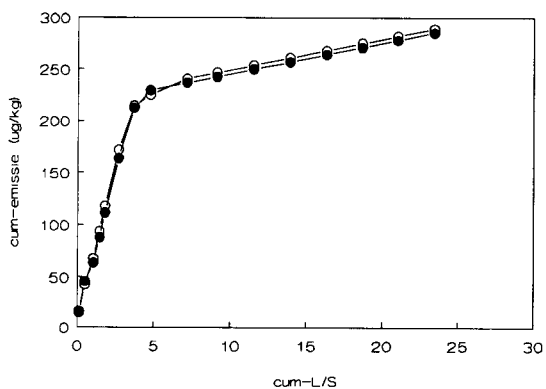
RIVM (niet belucht)



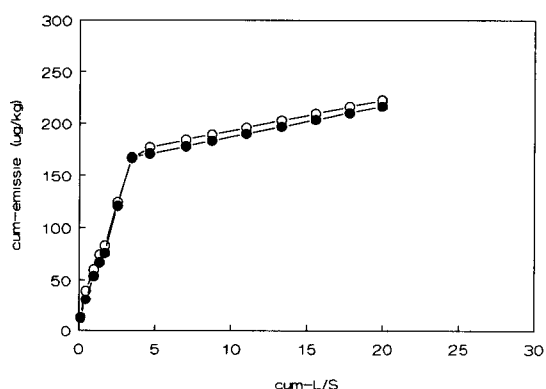
RIVM (belucht)



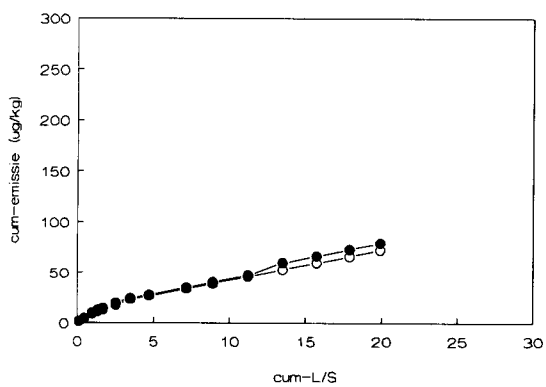
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



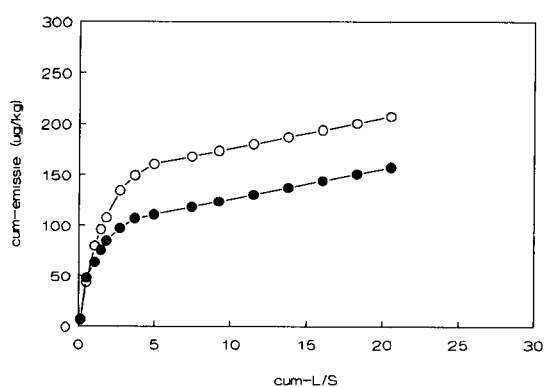
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



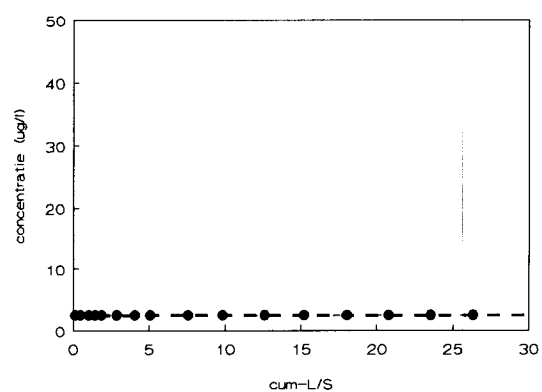
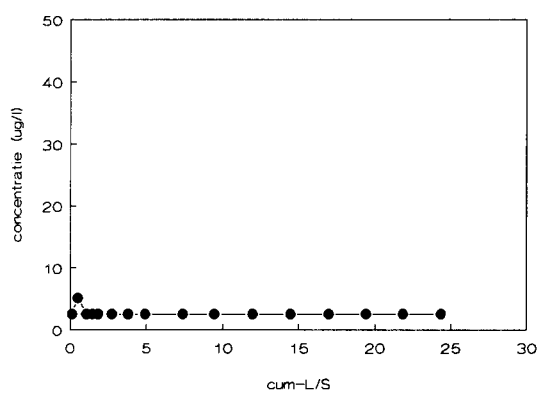
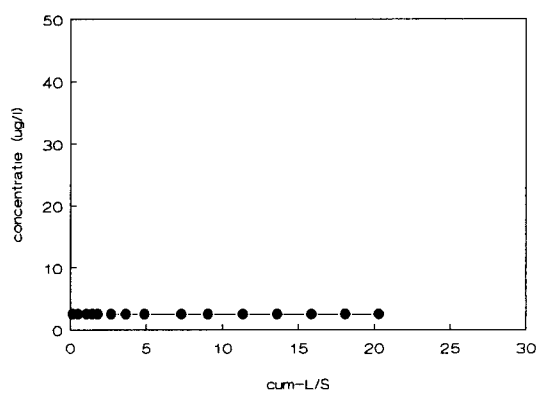
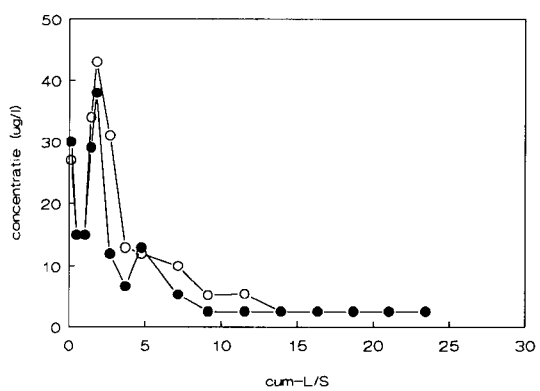
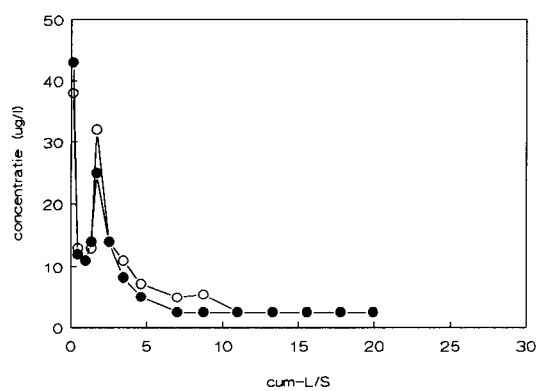
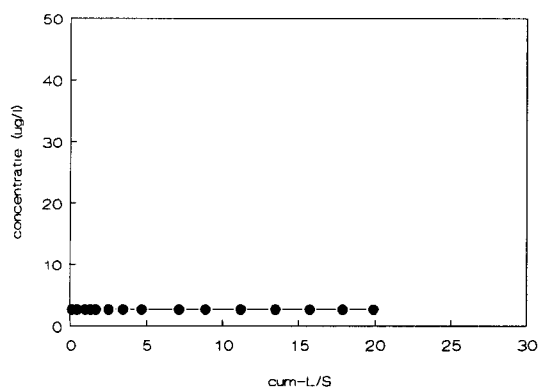
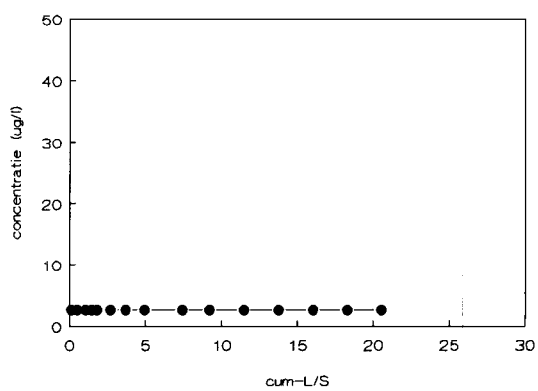
Wildrijk (belucht)



Concentratie antimoon (ug/l)

— ○ — 0.45 um-filter
 — ● — 0.05 um-filter

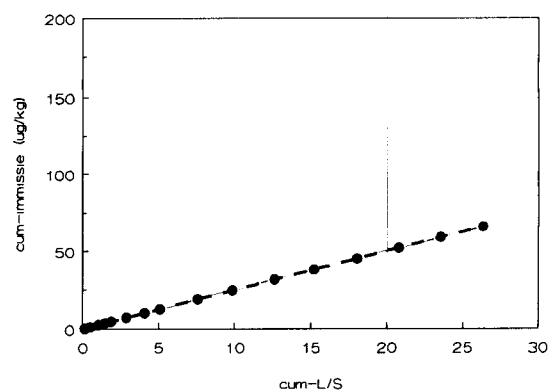
Fosforslak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

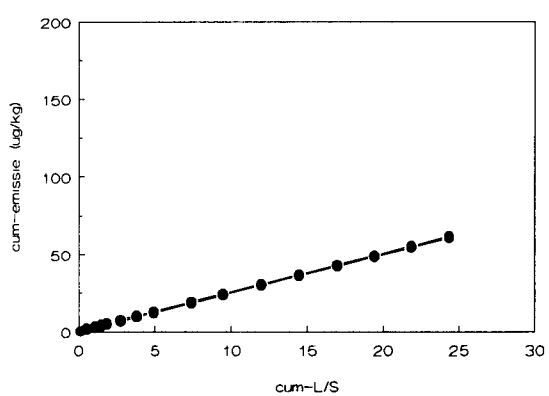
Cumulatieve emissie en immissie
antimoon ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

- ○ — 0.45 μm -filter
— ● — 0.05 μm -filter

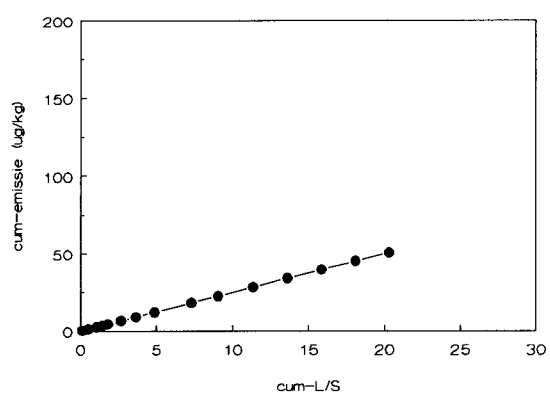
Fosforslak (input)



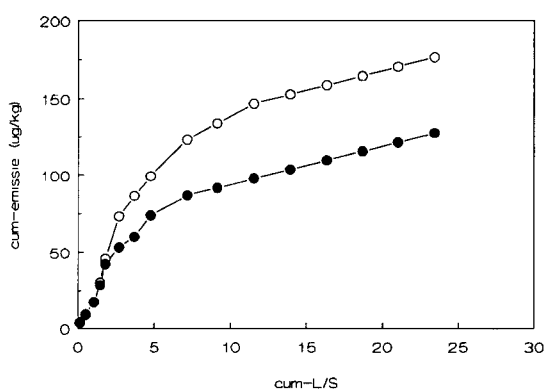
RIVM
(niet belucht)



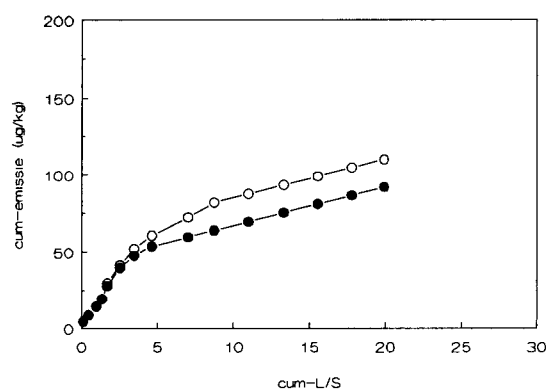
RIVM
(belucht)



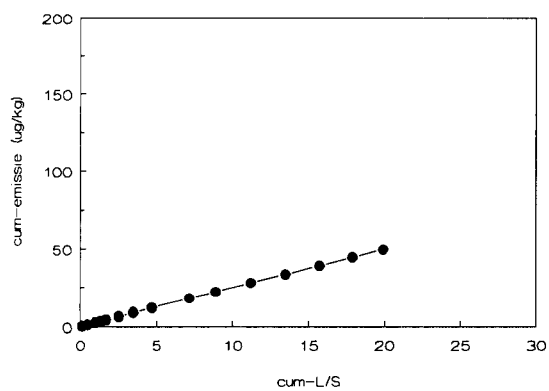
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



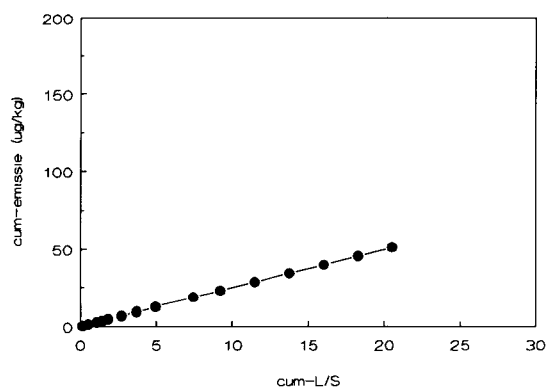
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



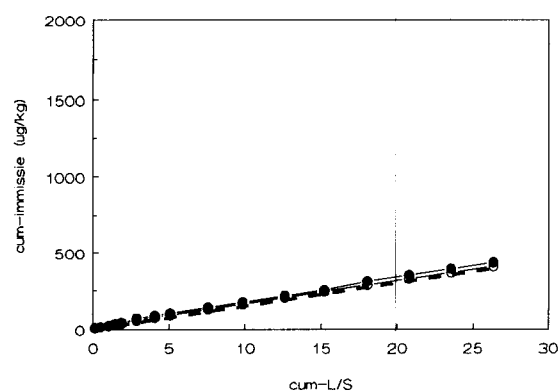
Wildrijk
(belucht)



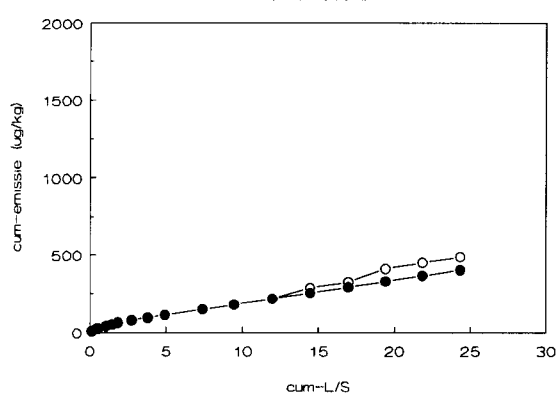
Cumulatieve emissie en immissie
zink (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
— ● — 0.05 um-filter

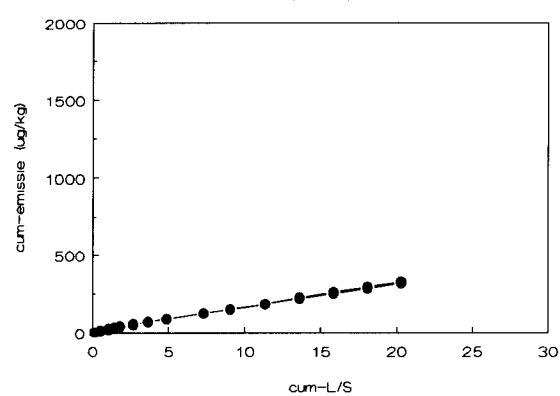
Fosforslak (input)



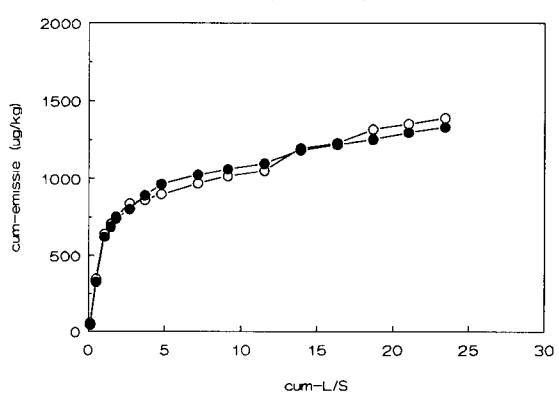
RIVM
(niet belucht)



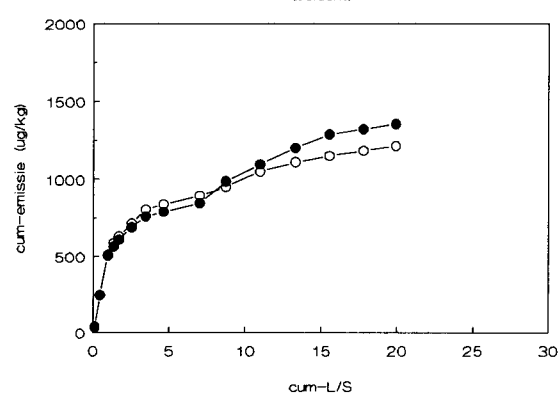
RIVM
(belucht)



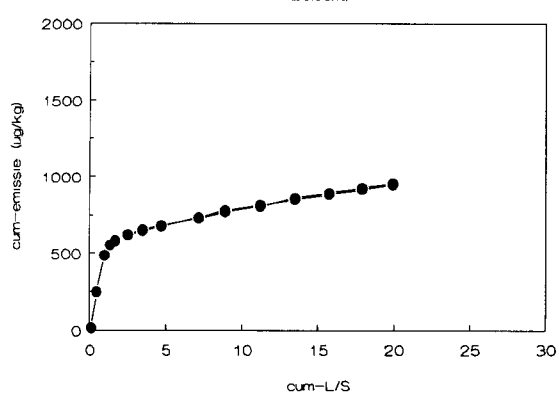
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



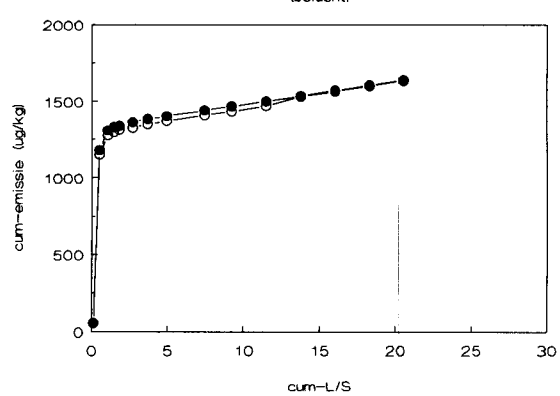
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



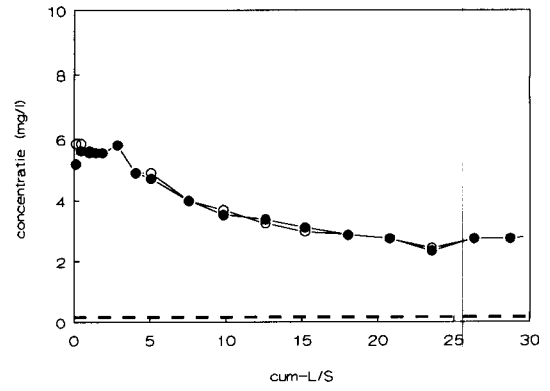
Wildrijk
(belucht)



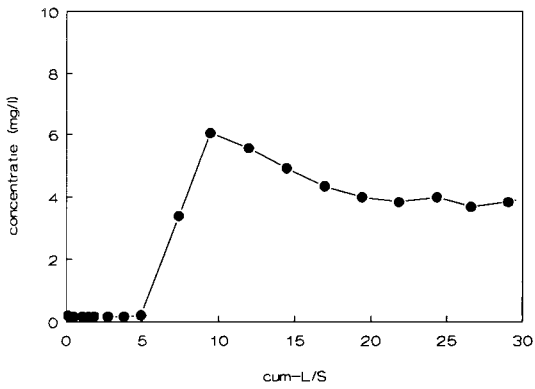
Concentratie fluoride (mg/l)

- ○ — 0.45 μ m-filter
- ● — 0.05 μ m-filter

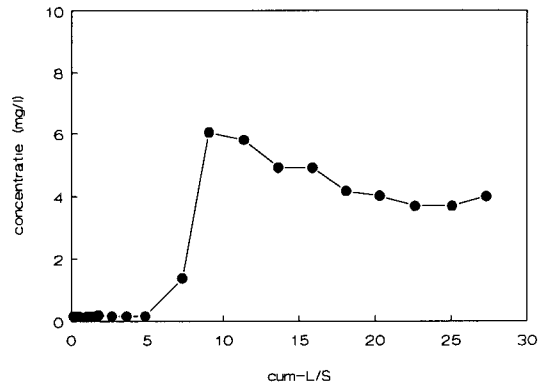
Fosforslak (input)



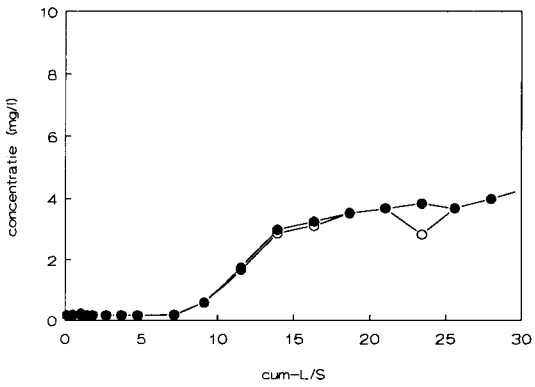
RIVM
(niet belucht)



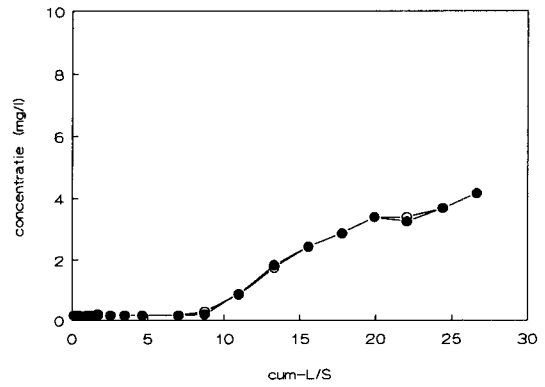
RIVM
(belucht)



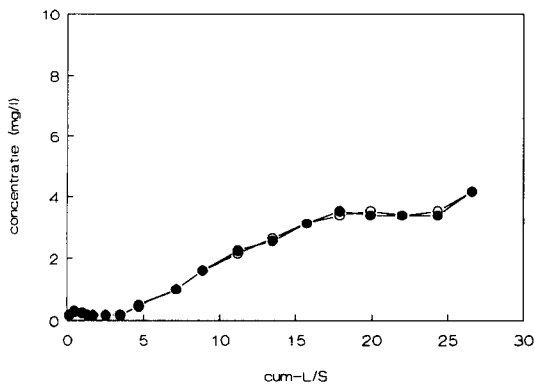
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



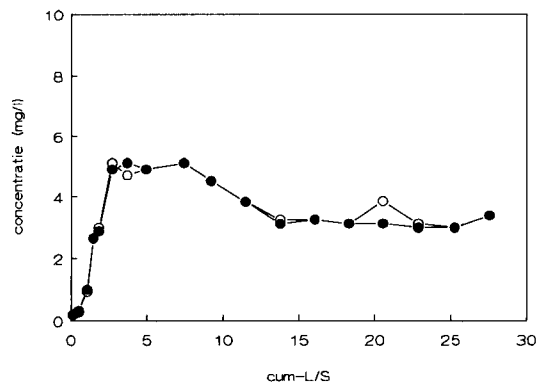
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



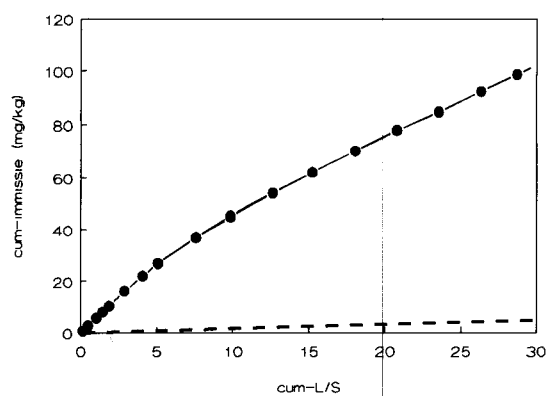
Wildrijk
(belucht)



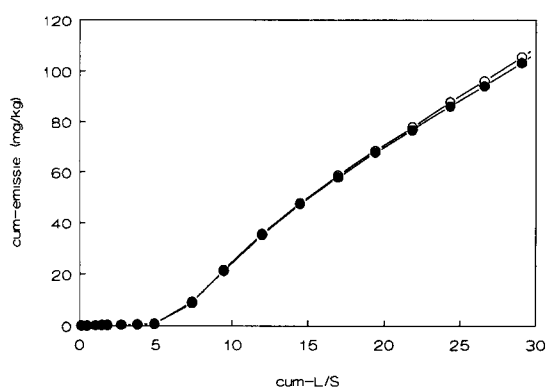
Cumulatieve emissie en immissie fluoride (mg/kg)

- ○ — 0.45 μ m-filter
 — ● — 0.05 μ m-filter

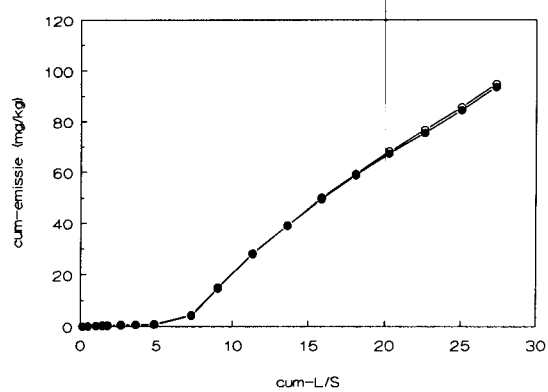
Fosforslak (input)



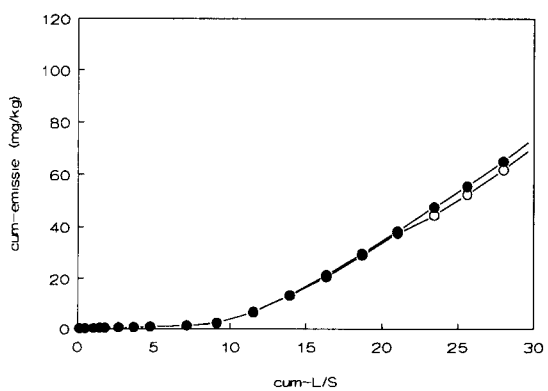
RIVM
(niet belucht)



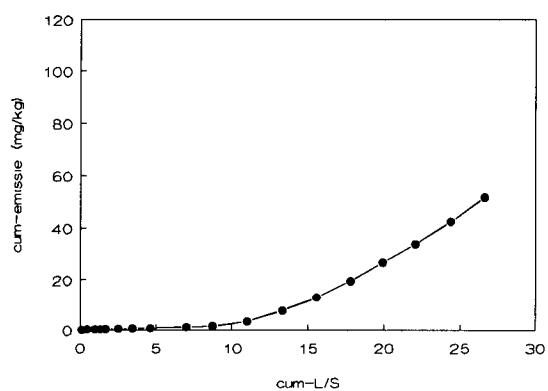
RIVM
(belucht)



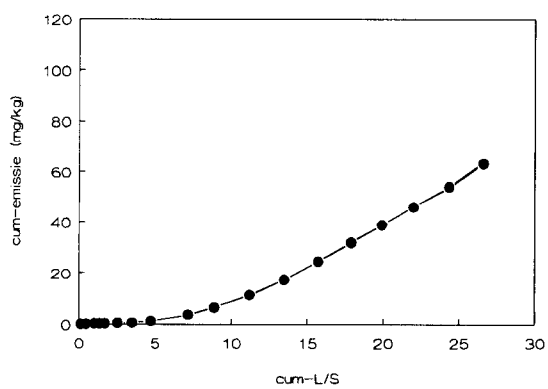
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



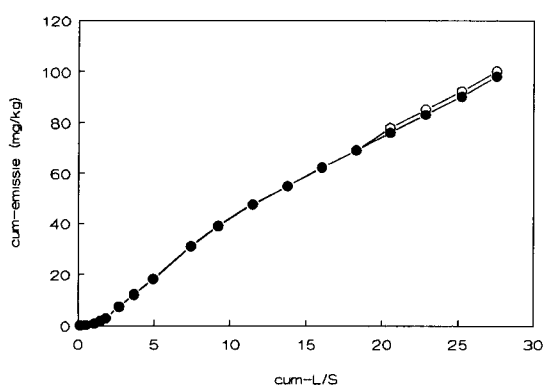
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



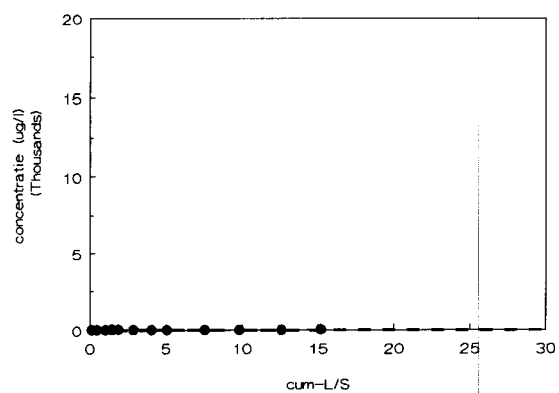
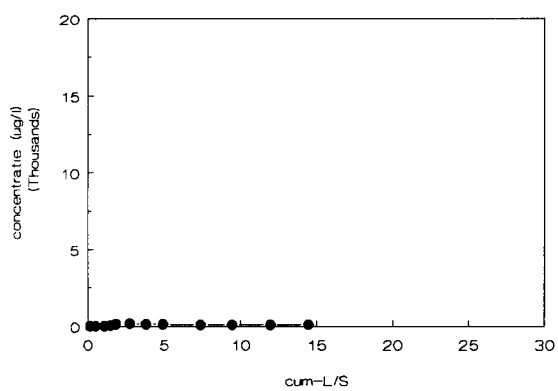
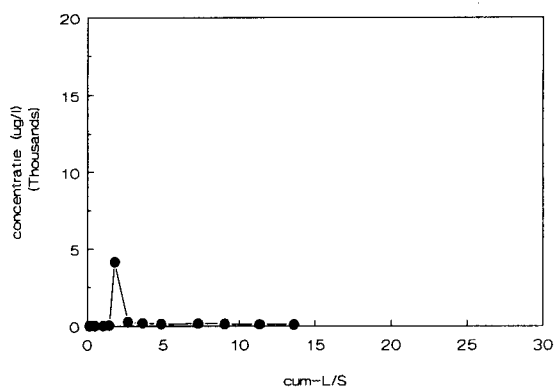
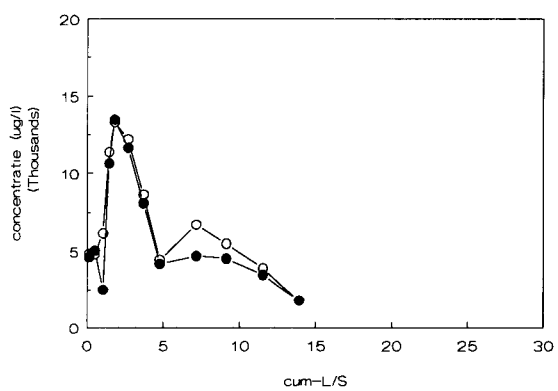
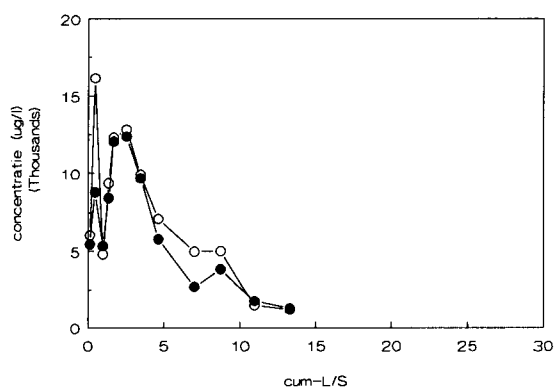
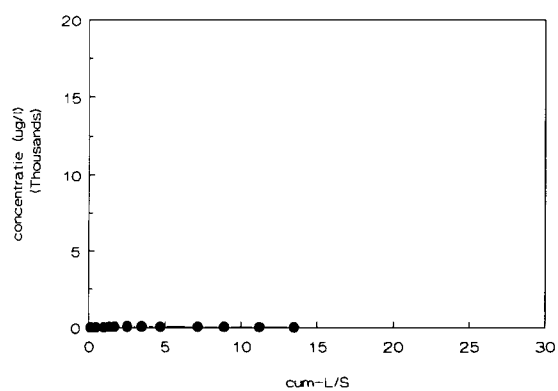
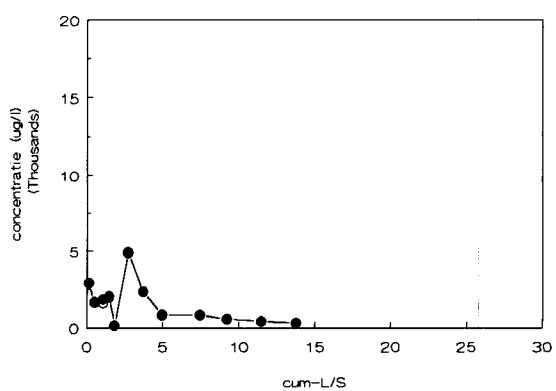
Wildrijk
(belucht)



Concentratie fosfaat ($\mu\text{g/l}$)

- ○ — 0.45 μm -filter
 — ● — 0.05 μm -filter

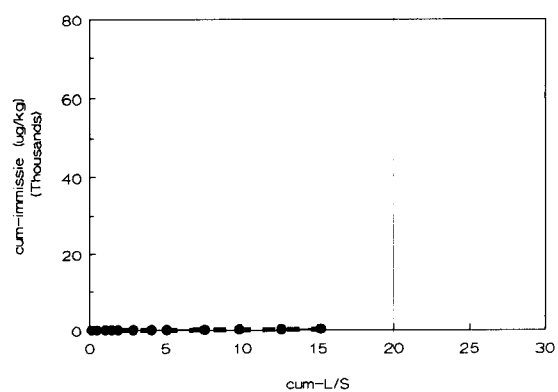
Fosforslak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

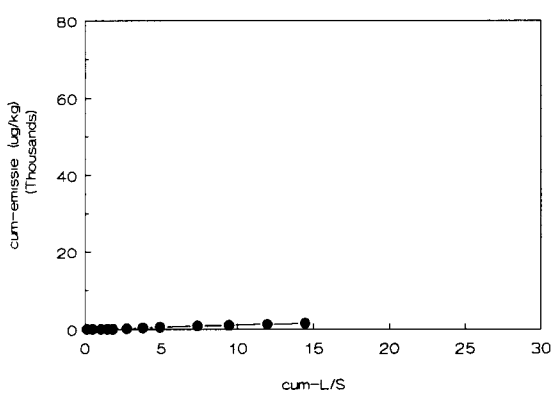
Cumulatieve emissie en immissie
fosfaat ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

- ○ — 0.45 μm -filter
— ● — 0.05 μm -filter

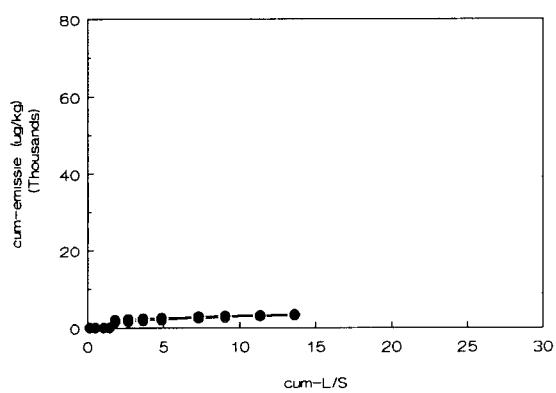
Fosforslak (input)



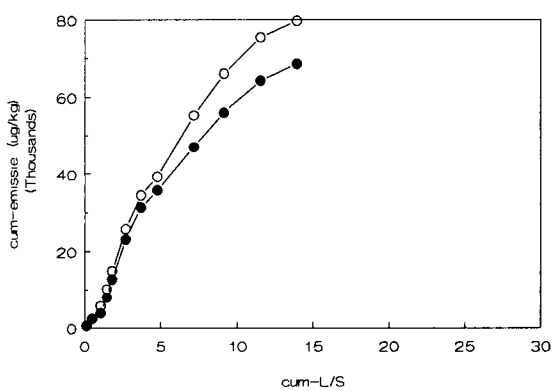
RIVM
(niet belucht)



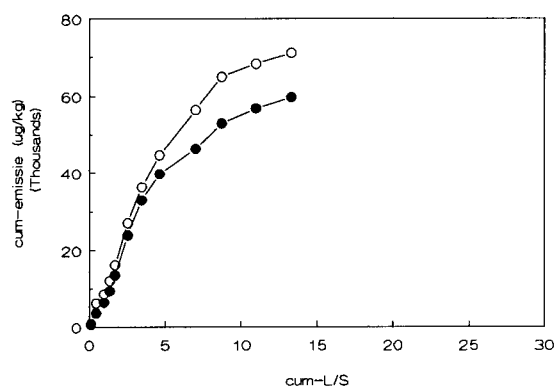
RIVM
(belucht)



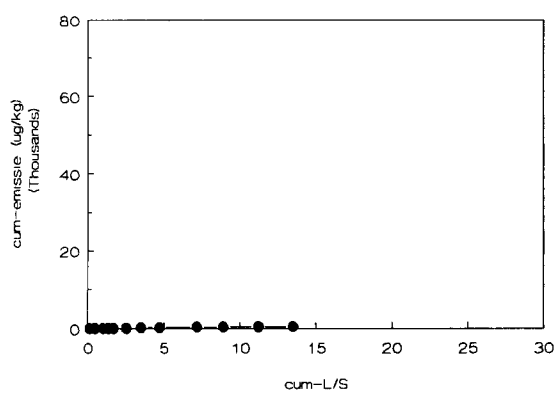
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



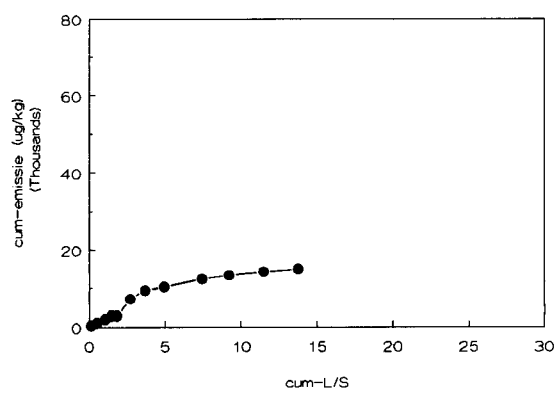
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



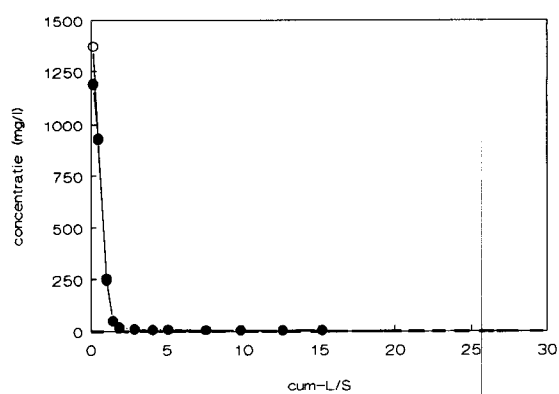
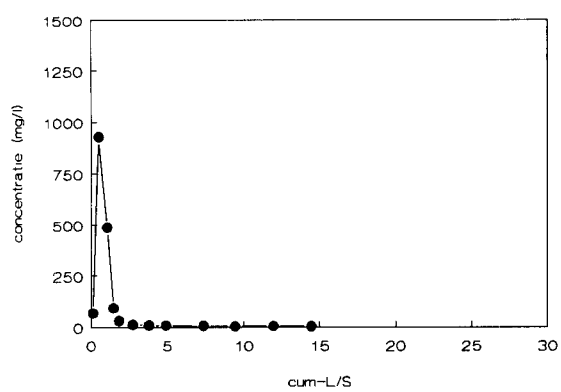
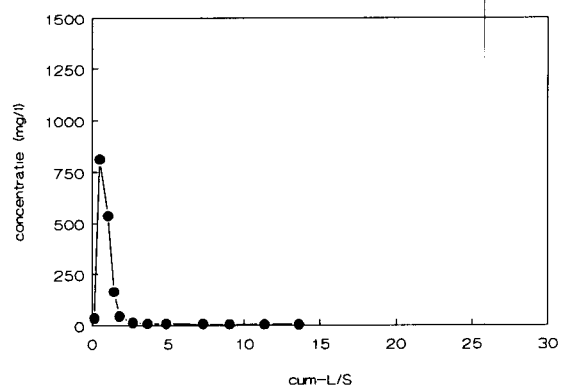
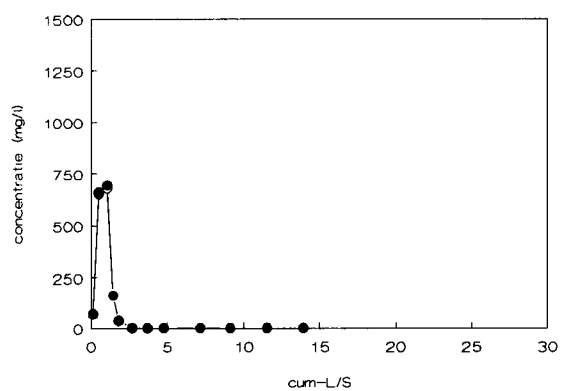
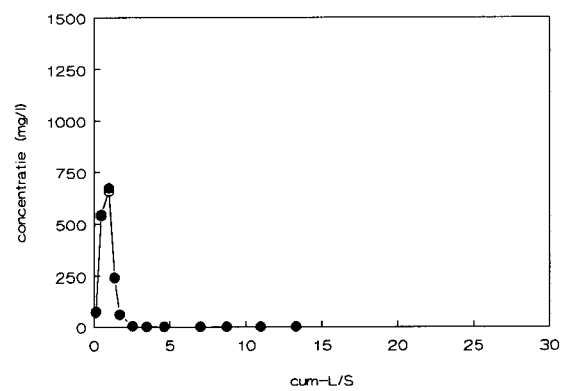
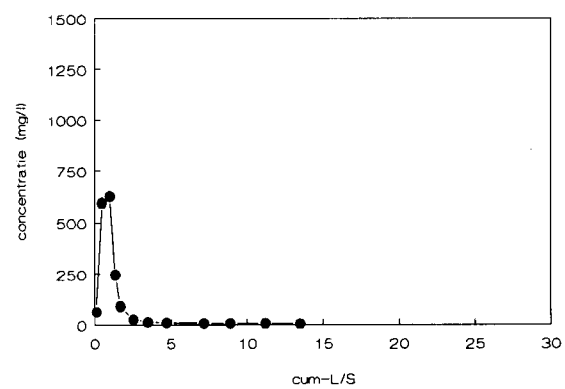
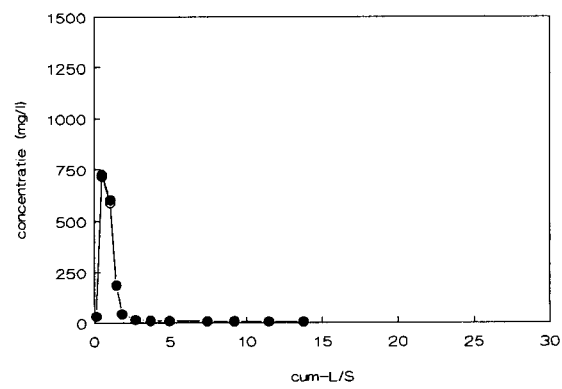
Wildrijk
(belucht)



Concentratie sulfaat (mg/l)

— ○ — 0.45 μ m-filter
 — ● — 0.05 μ m-filter

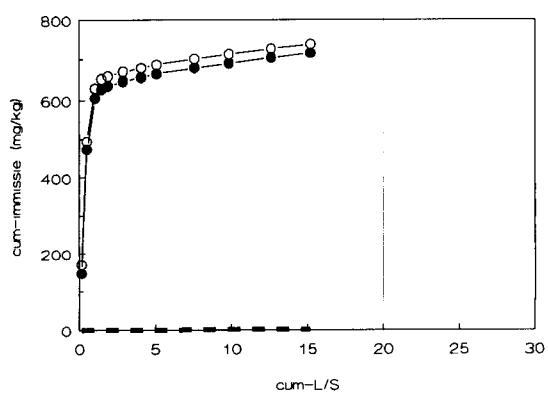
Fosforstak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

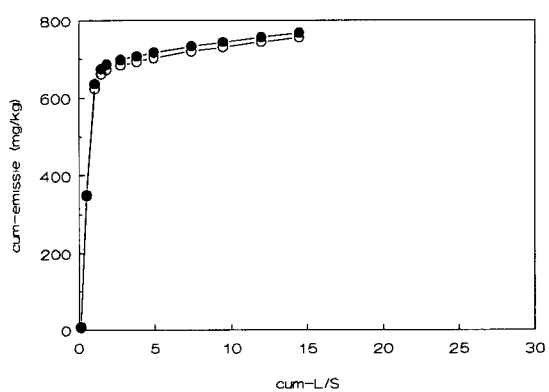
Cumulatieve emissie en immissie
sulfaat (mg/kg)

— ○ — 0.45 μ m-filter
— ● — 0.05 μ m-filter

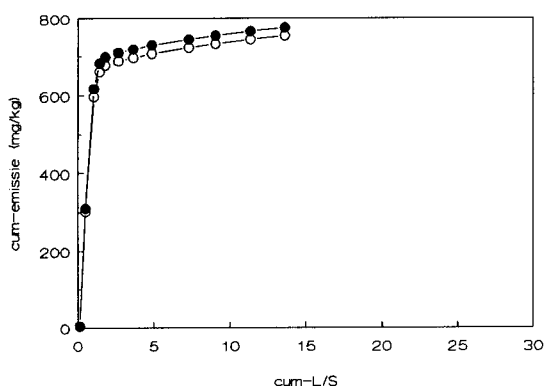
Fosforslak (input)



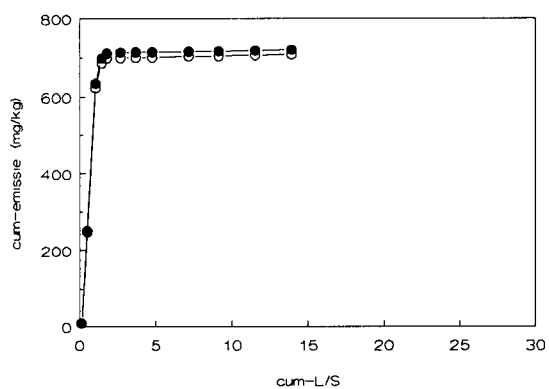
RIVM
(niet belucht)



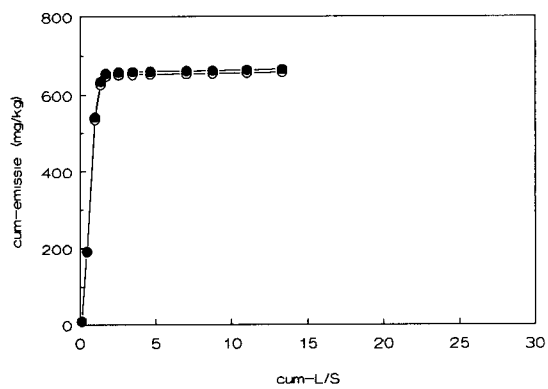
RIVM
(belucht)



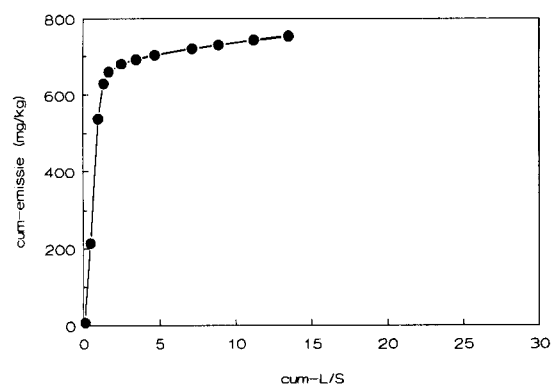
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



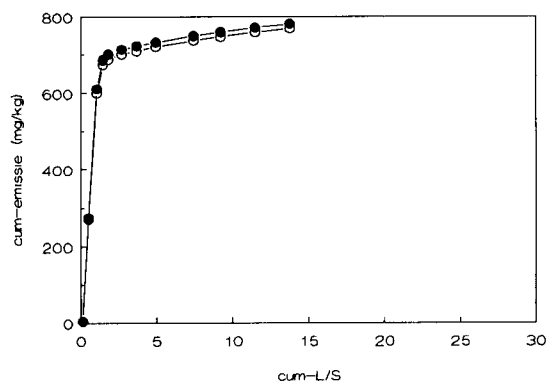
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



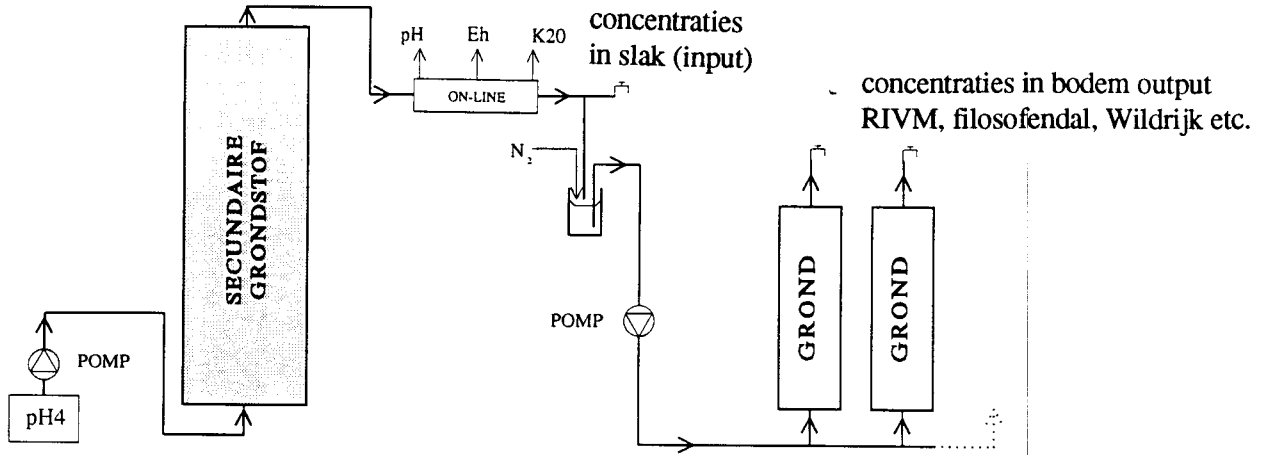
Wildrijk
(belucht)



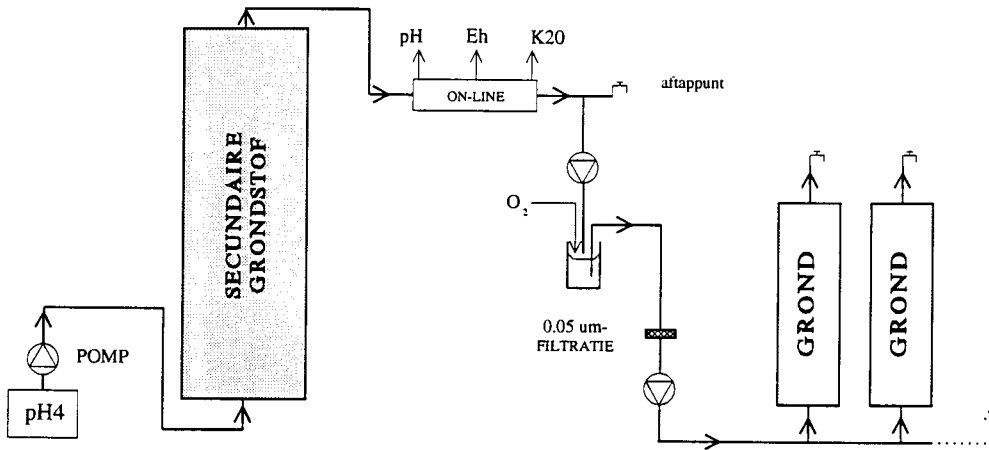
BIJLAGE 2

resultaten staalslakproef

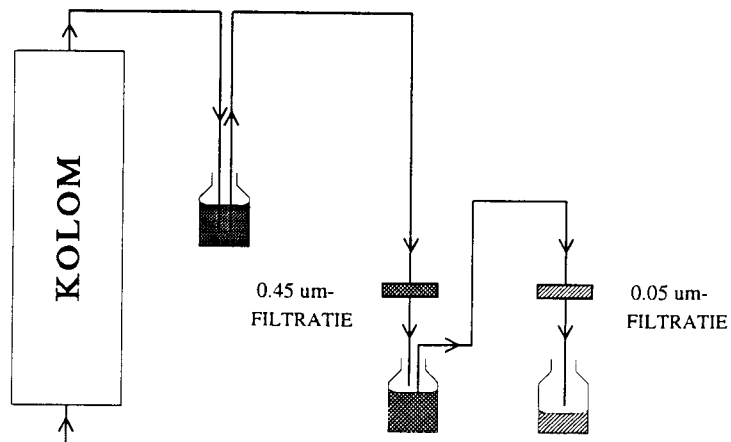
Schematische weergave kolomproef, *niet belucht*.



Schematische weergave kolomproef, *belucht*.



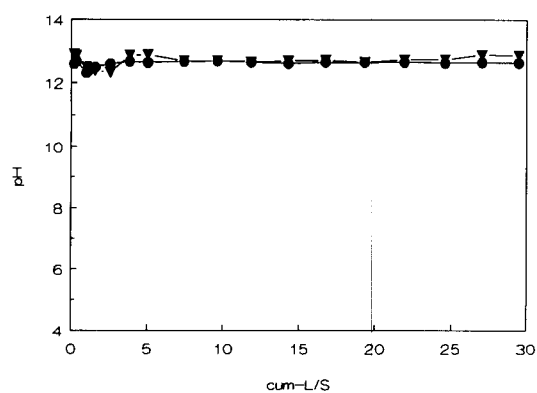
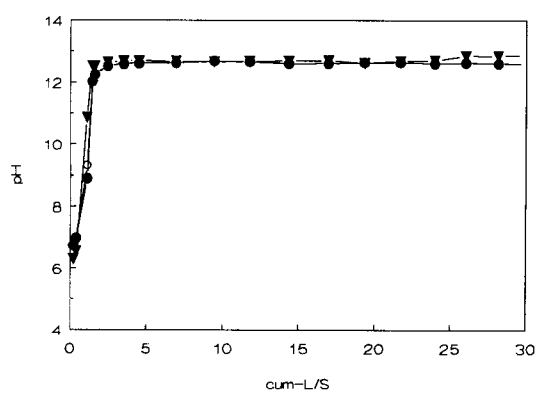
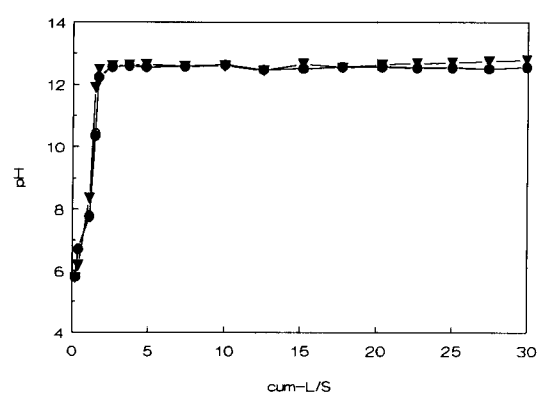
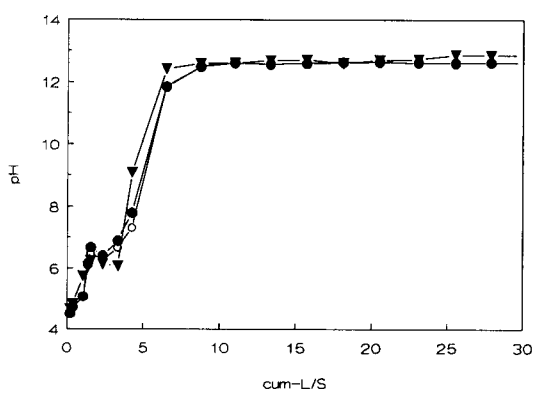
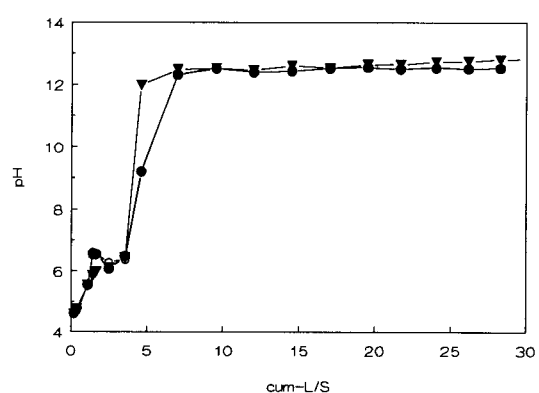
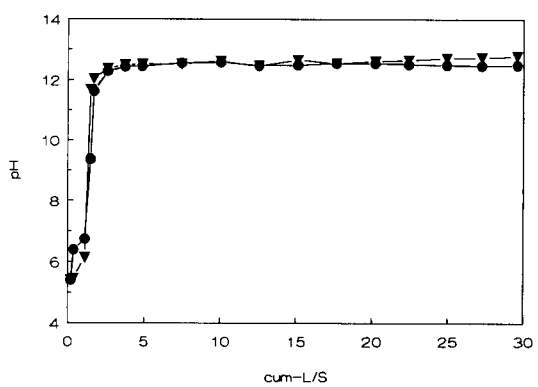
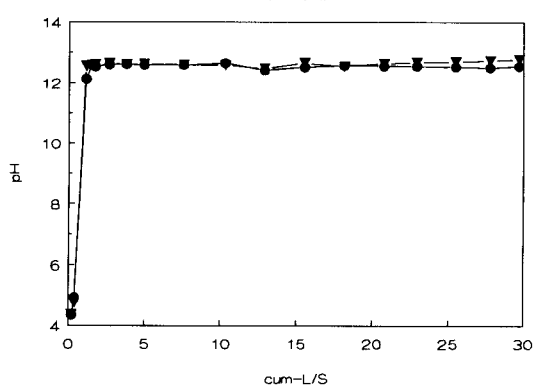
Schematische weergave *filtratie percolaten*.



pH percolaat ON-LINE en na filtreren

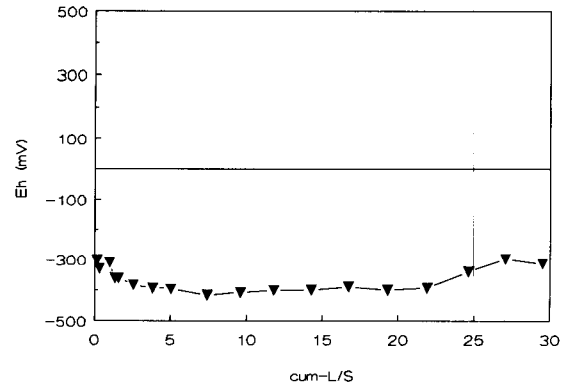
- ▼ — ON-LINE
 — ○ — 0.45 μ m-filter
 — ● — 0.05 μ m-filter

Staalslak (input)

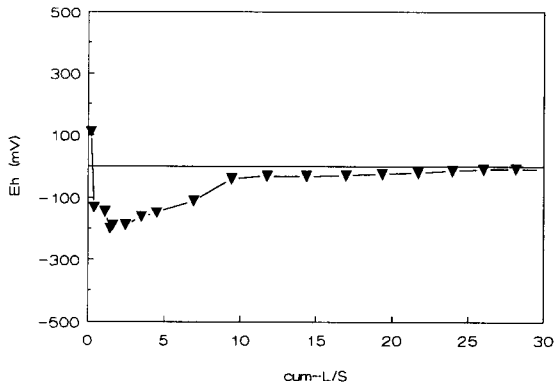
RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

Redoxpotentiaal percolaat
ON-LINE (mV)

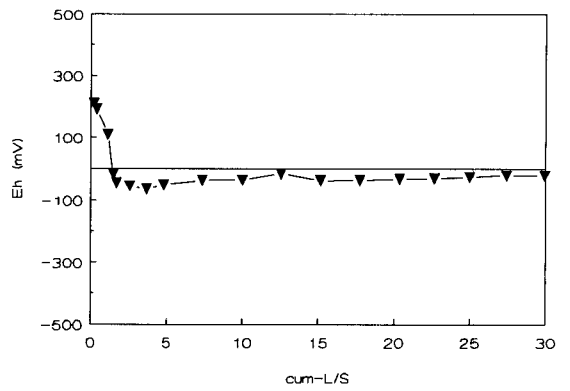
Staa'slak (input)



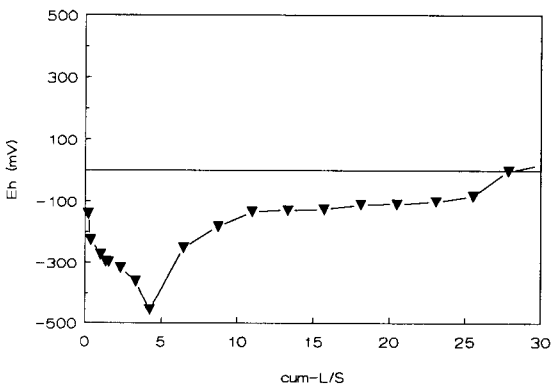
RIVM
(niet belucht)



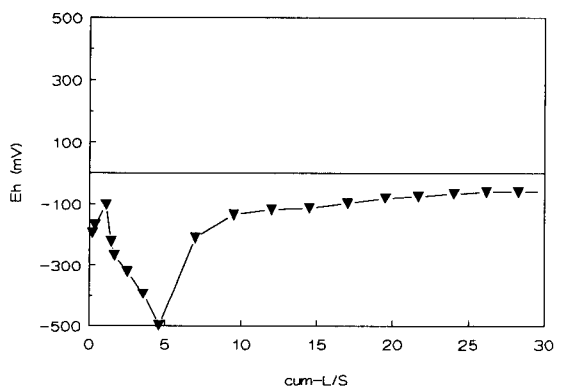
RIVM
(belucht)



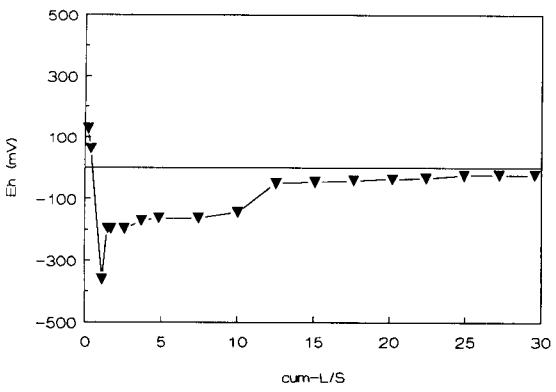
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



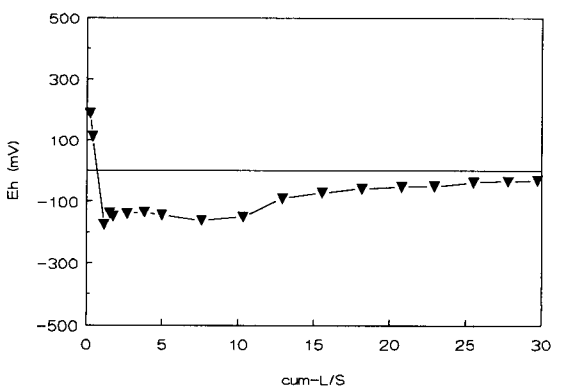
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



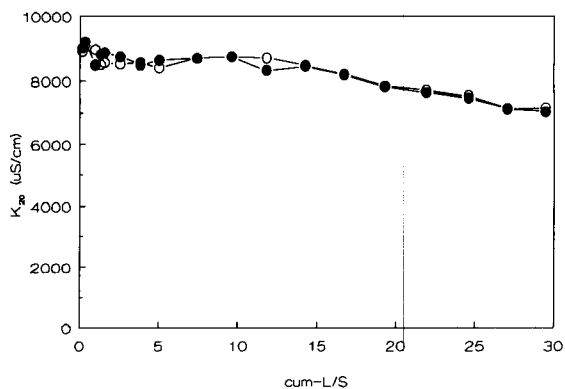
Wildrijk
(belucht)



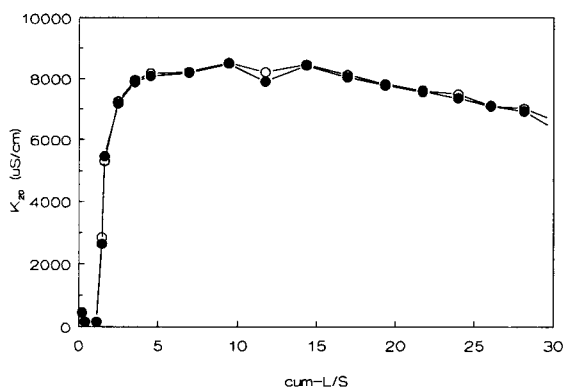
Geleidbaarheid percolaat na filtreren (uS/cm)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

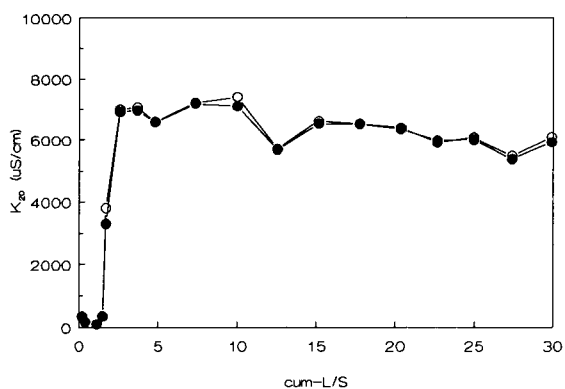
Staalslak (input)



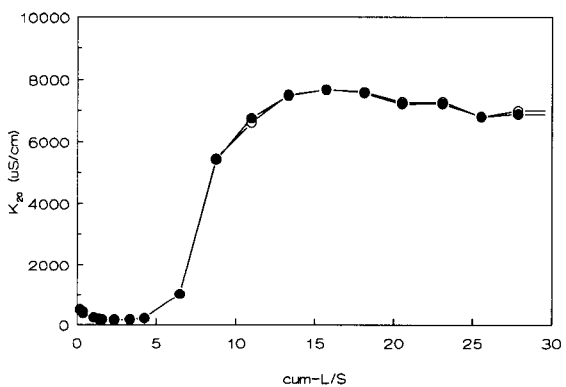
RIVM (niet belucht)



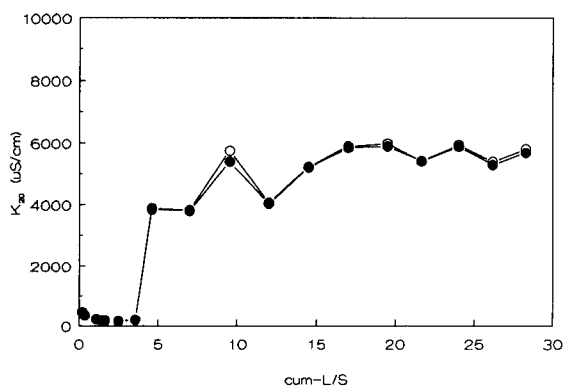
RIVM (belucht)



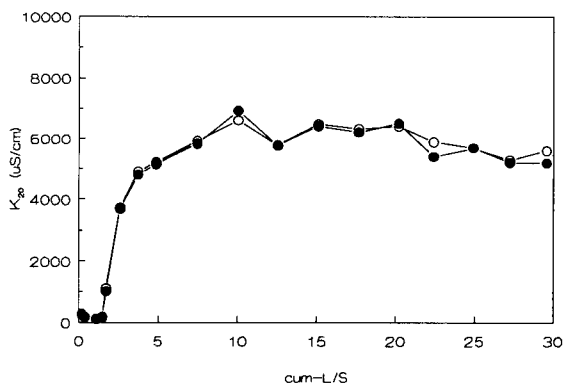
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



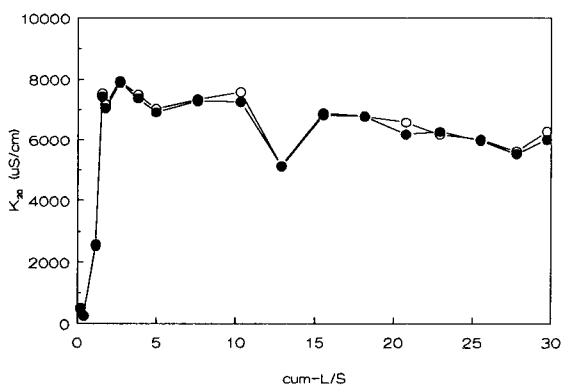
Filosofendal bovengrond (belucht)

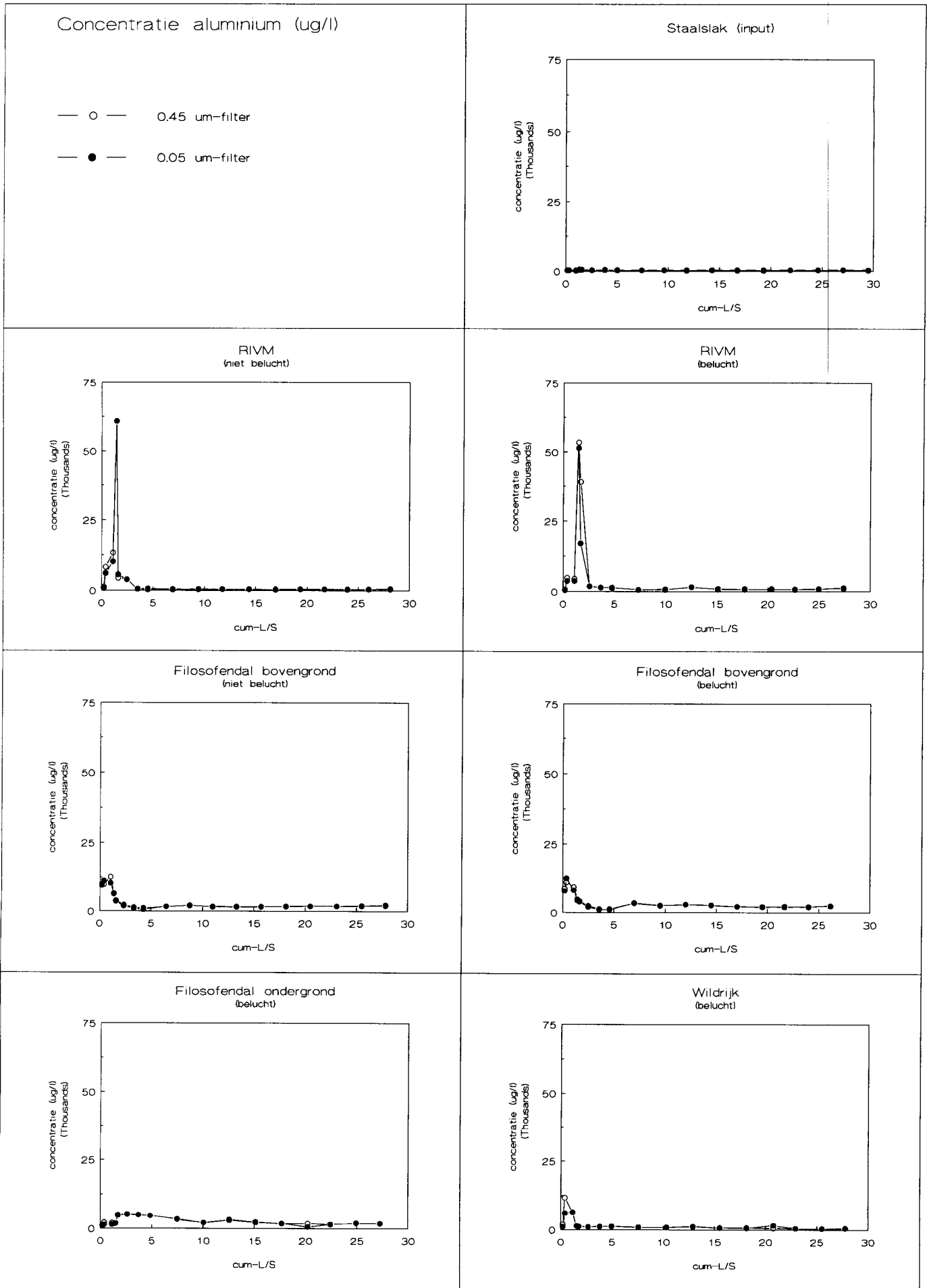


Filosofendal ondergrond (belucht)



Wildrijk (belucht)

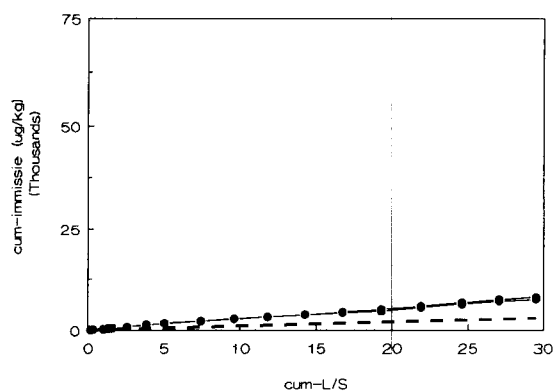




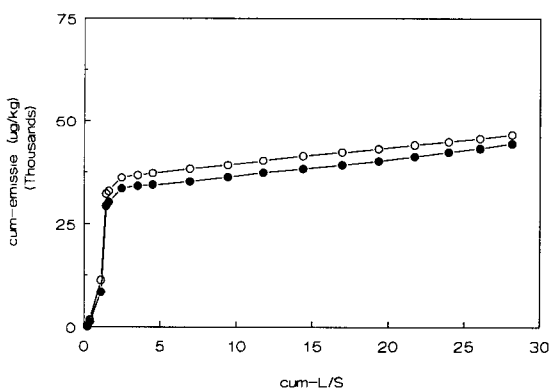
Cumulatieve emissie en immissie aluminium (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
 — ● — 0.05 um-filter

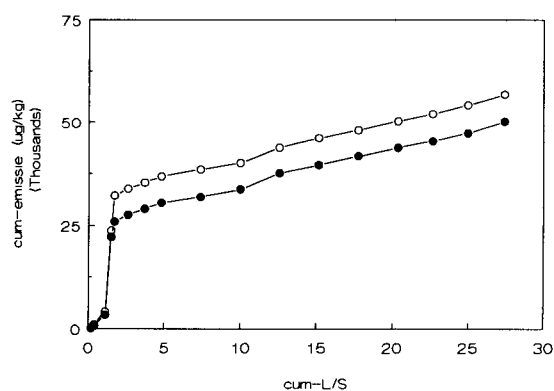
Staalslak (input)



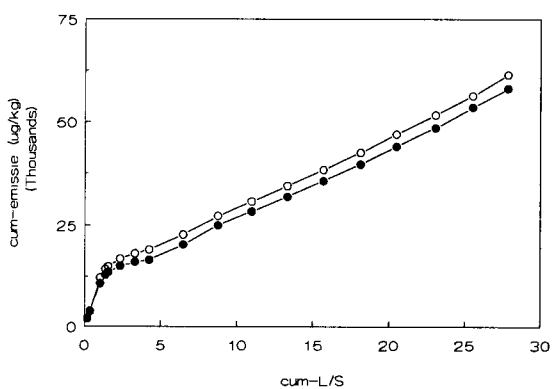
RIVM
(niet belucht)



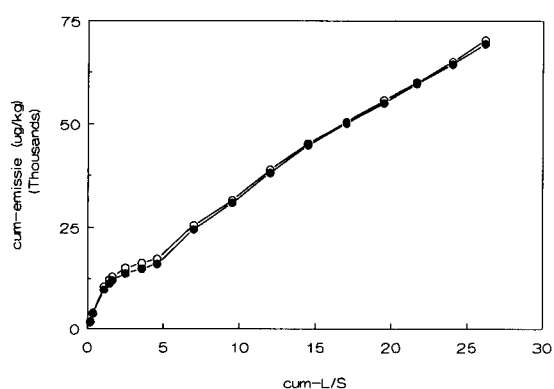
RIVM
(belucht)



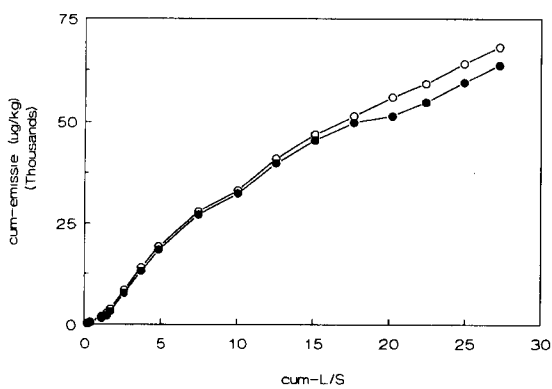
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



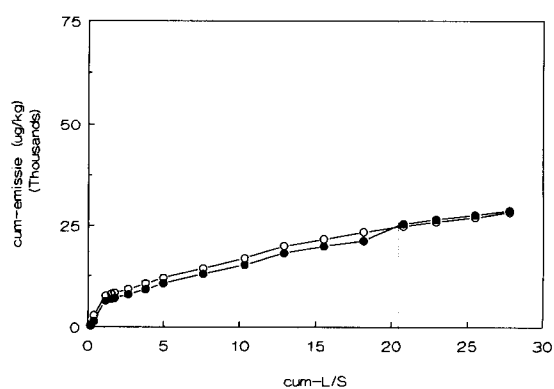
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



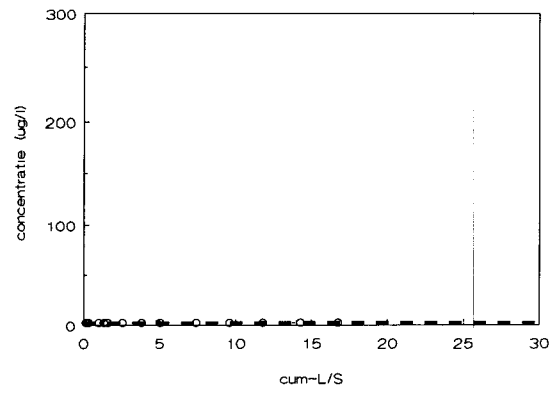
Wildrijk
(belucht)



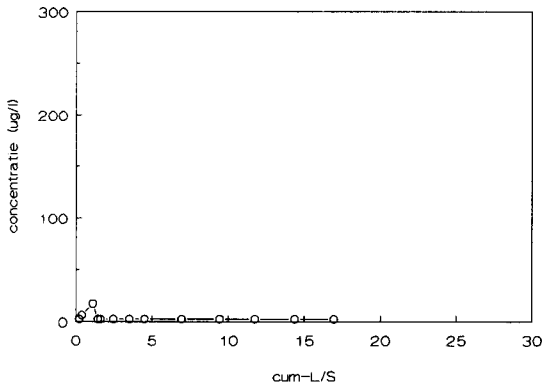
Concentratie arseen (ug/l)

— o — 0.45 um-filter

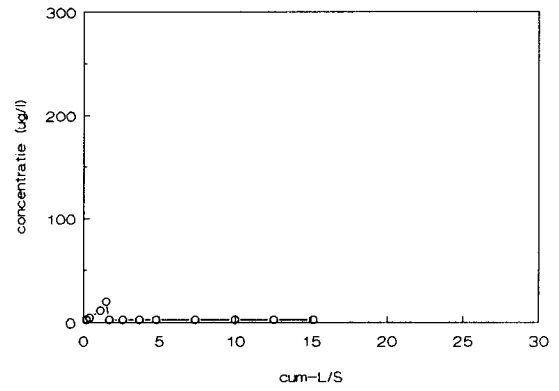
Staalslak (input)



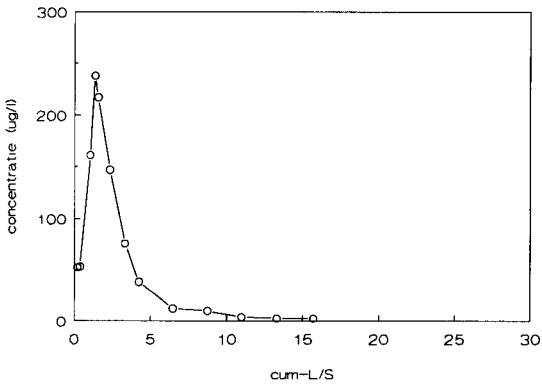
RIVM
(niet belucht)



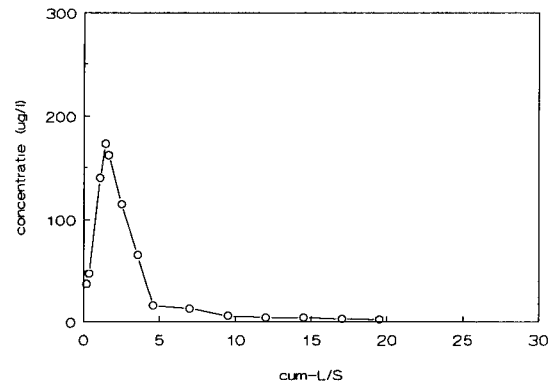
RIVM
(belucht)



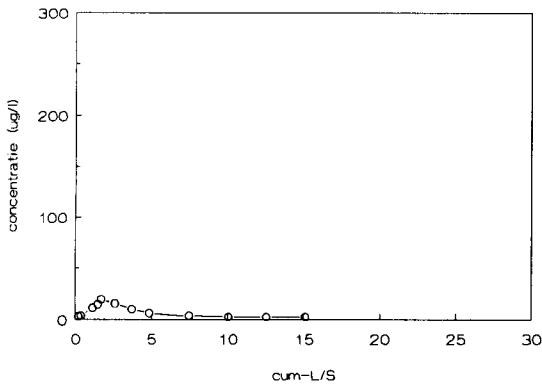
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



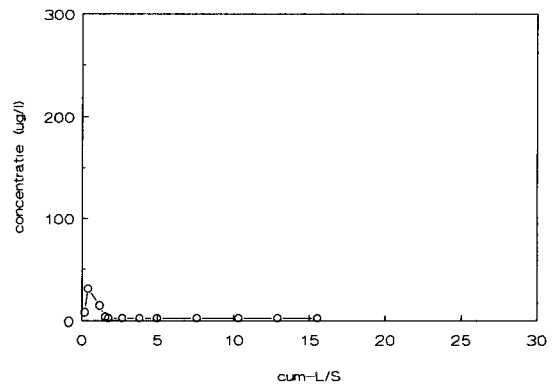
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



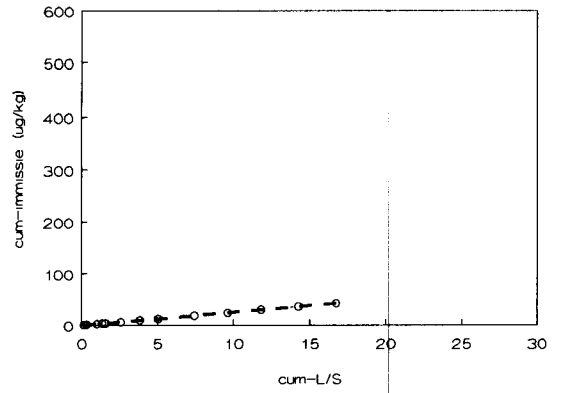
Wildrijk
(belucht)



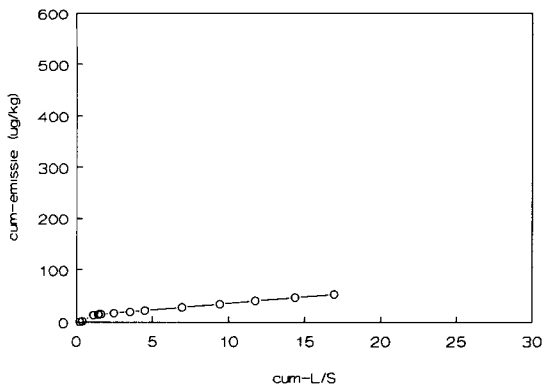
Cumulatieve emissie en immissie
arsen (ug/kg)

— o — 0.45 um-filter

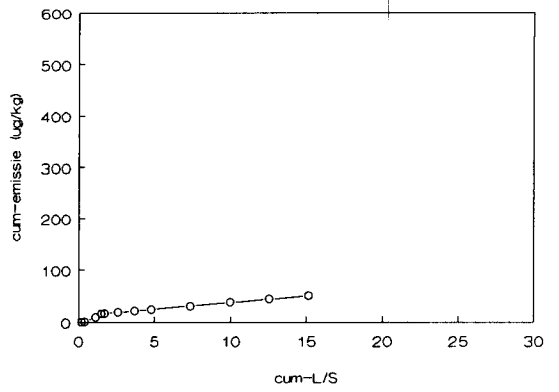
Staalslak (input)



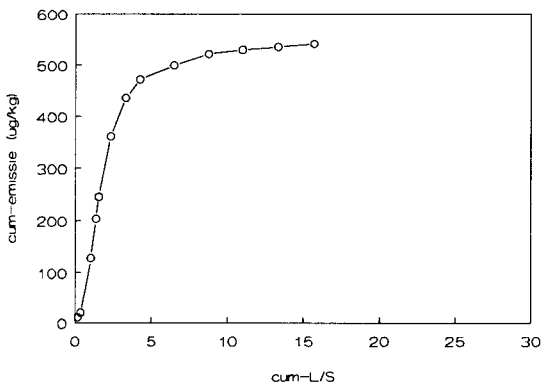
RIVM
(niet belucht)



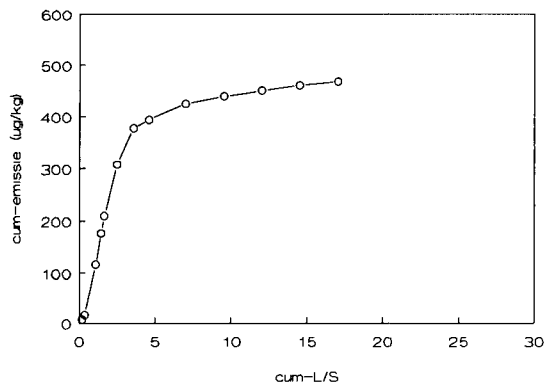
RIVM
(belucht)



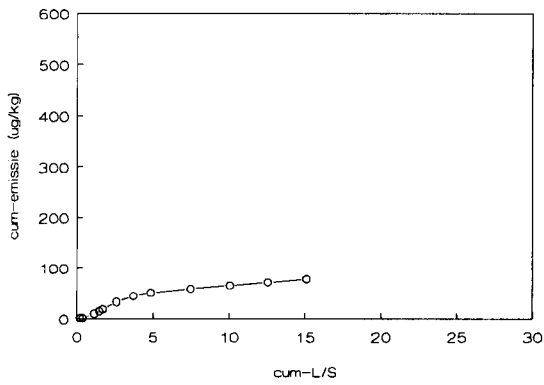
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



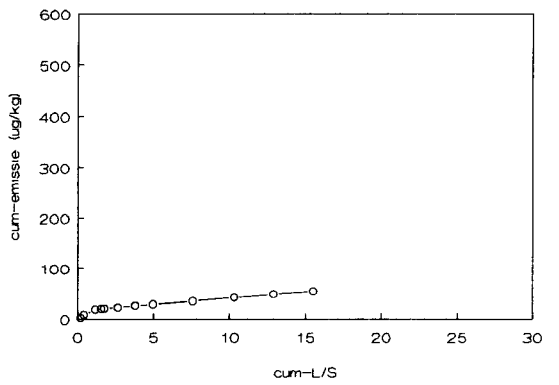
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



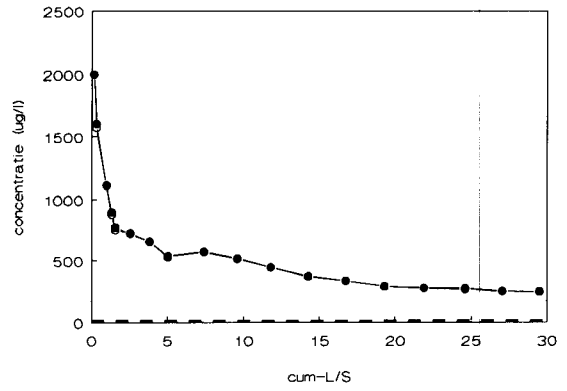
Wildrijk
(belucht)



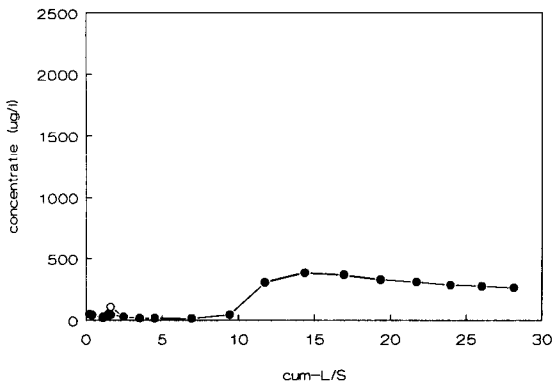
Concentratie barium (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

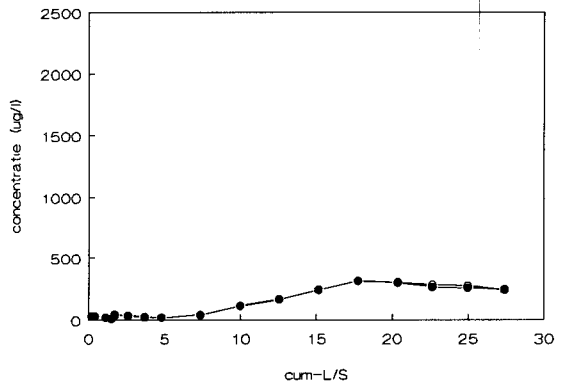
Staalslak (input)



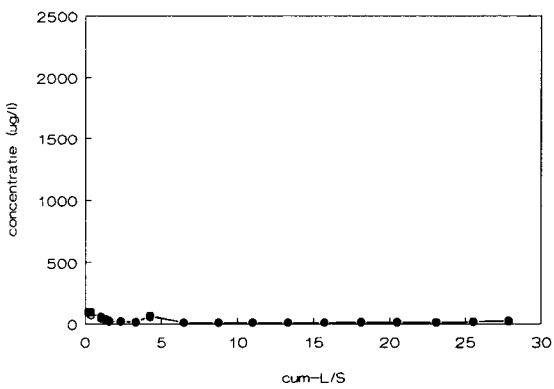
RIVM (niet belucht)



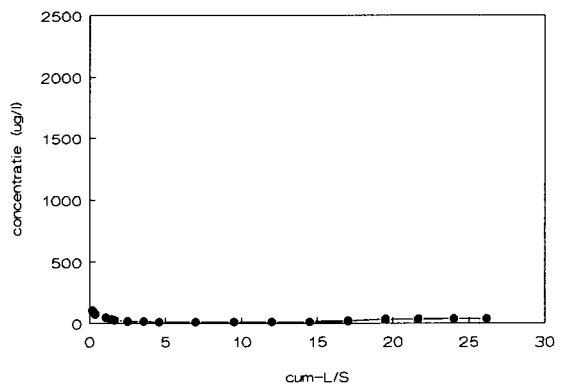
RIVM (belucht)



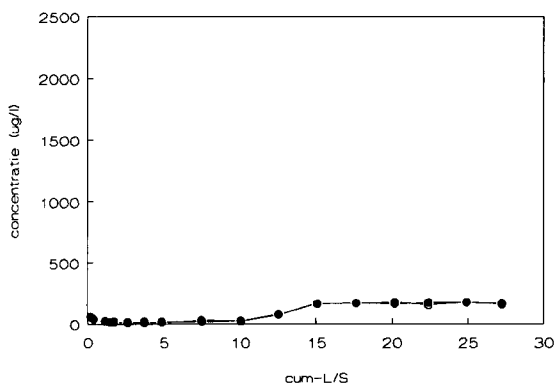
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



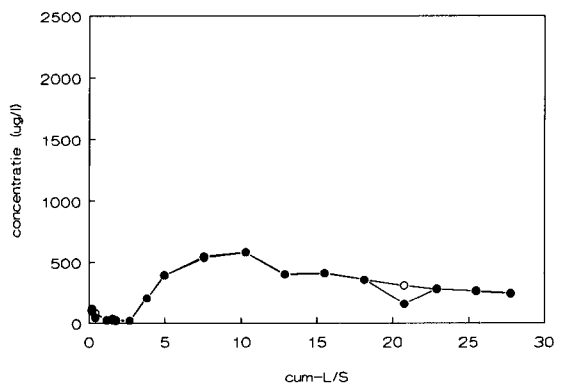
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



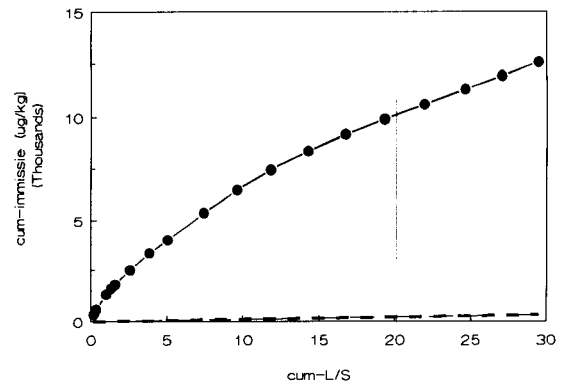
Wildrijk (belucht)



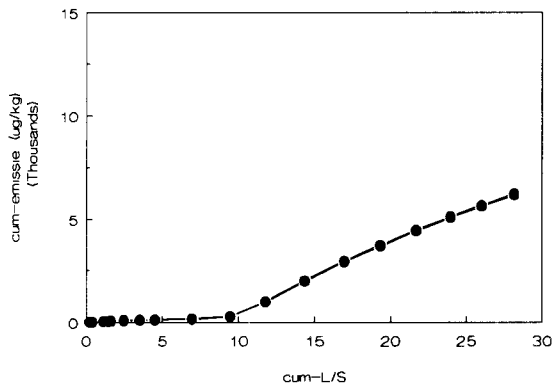
Cumulatieve emissie en immissie barium (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

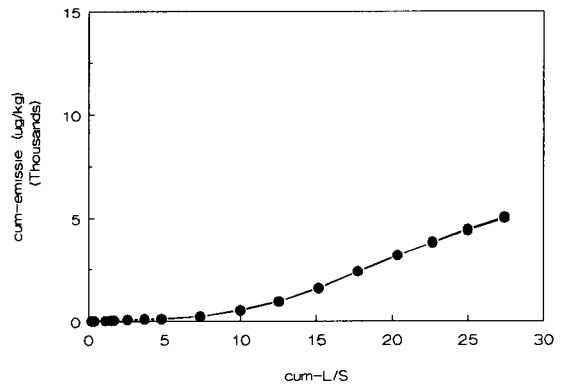
Staalslak (input)



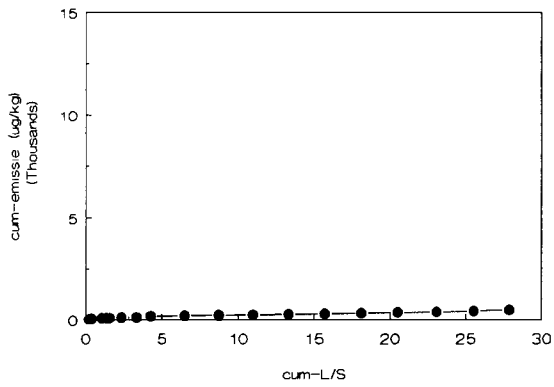
RIVM (niet belucht)



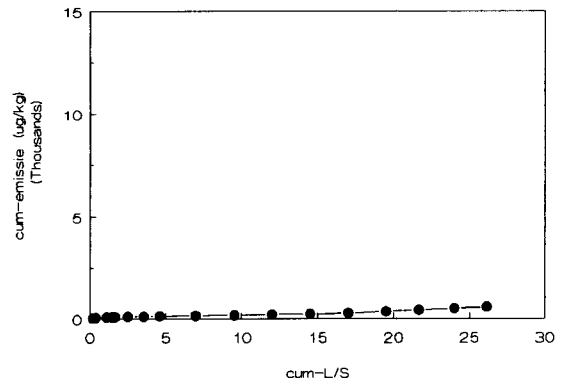
RIVM (belucht)



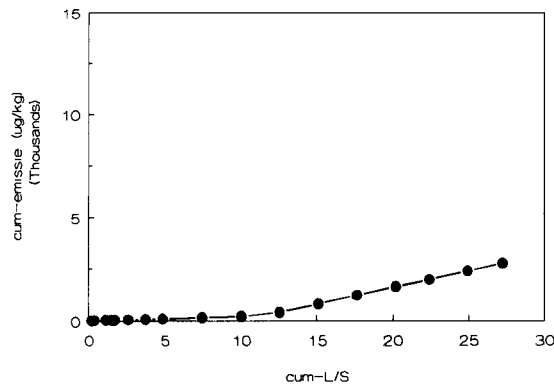
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



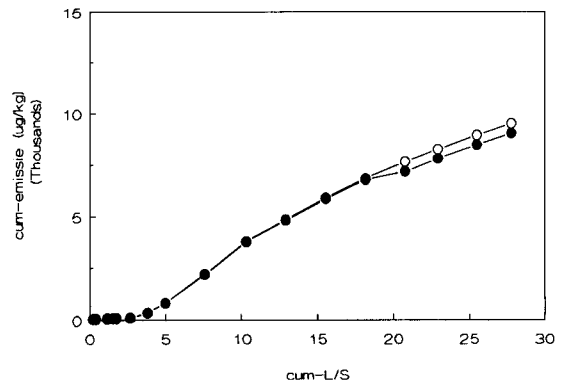
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



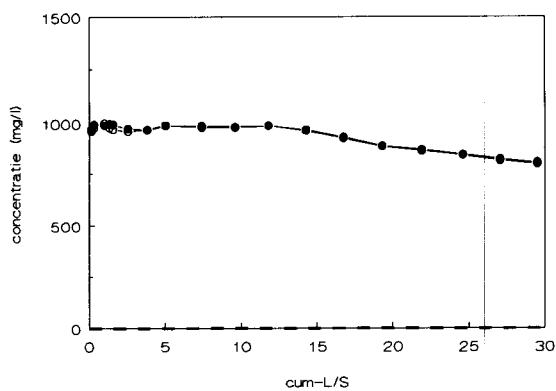
Wildrijk (belucht)



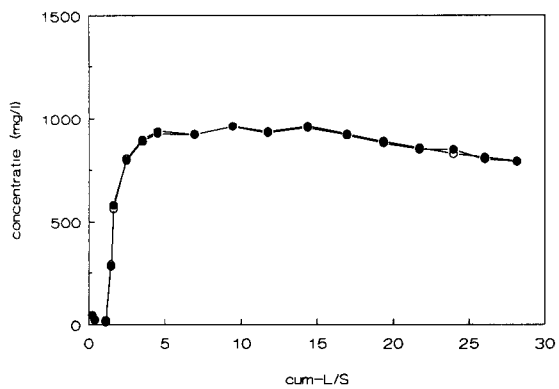
Concentratie calcium (mg/l)

- ○ — 0.45 μ m-filter
- ● — 0.05 μ m-filter

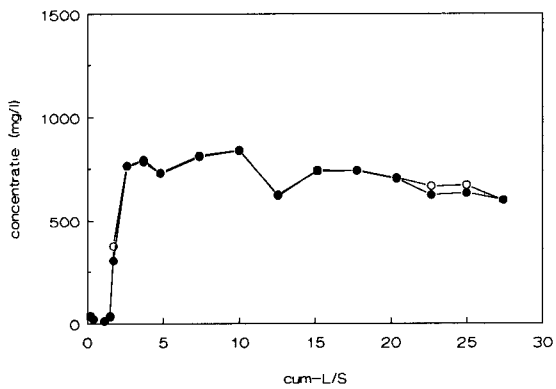
Staalslak (input)



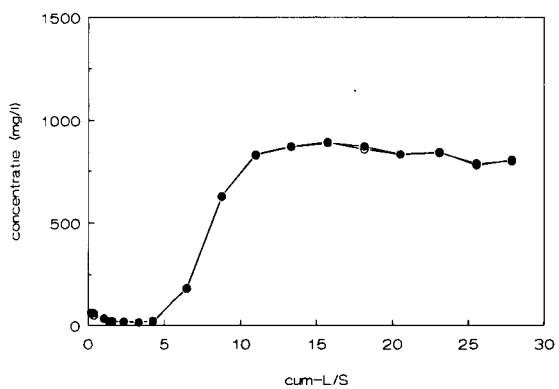
RIVM
(niet belucht)



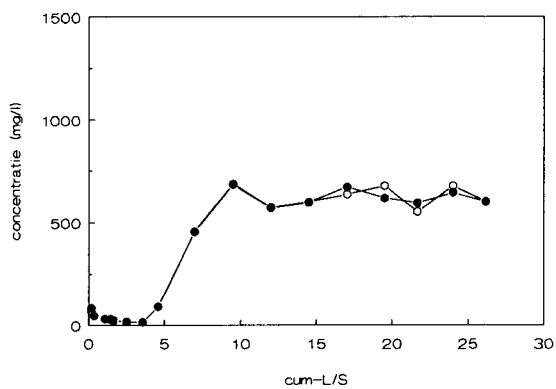
RIVM
(belucht)



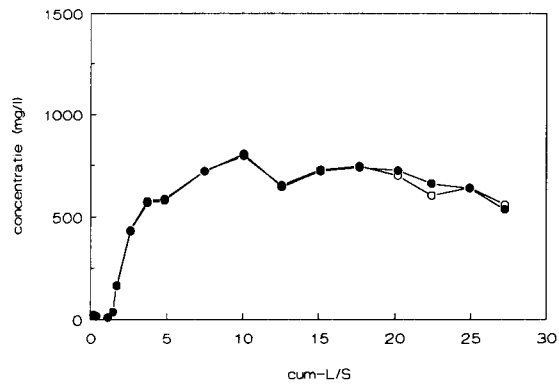
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



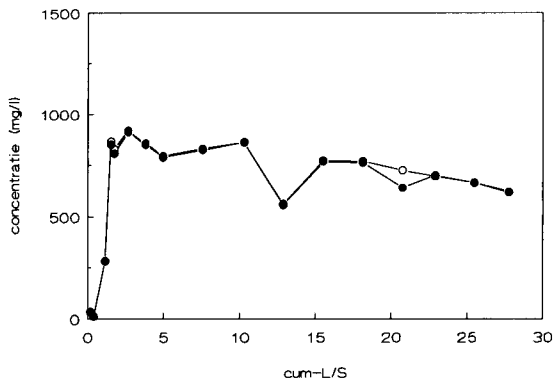
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



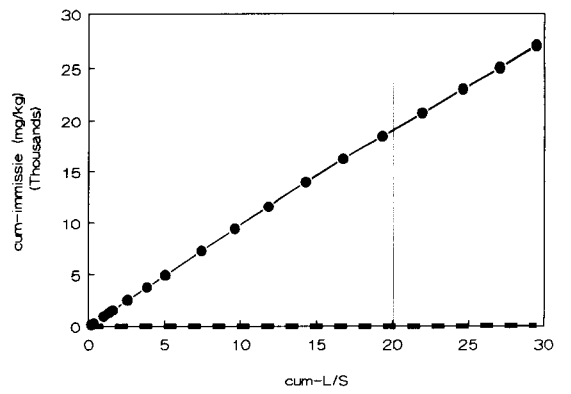
Wildrijk
(belucht)



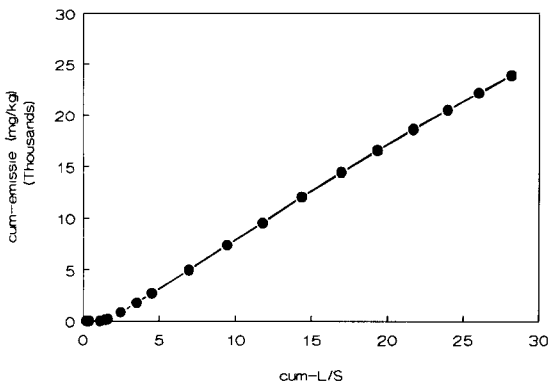
Cumulatieve emissie en immissie calcium (mg/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

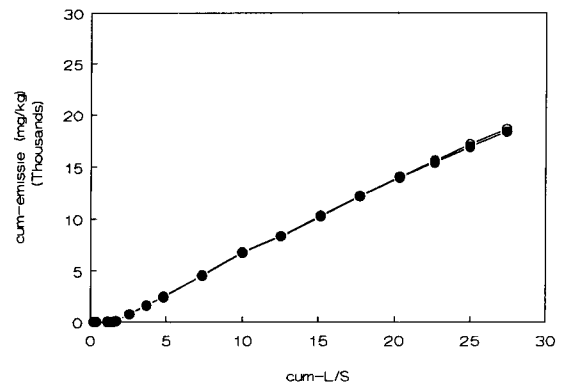
Staalslak (input)



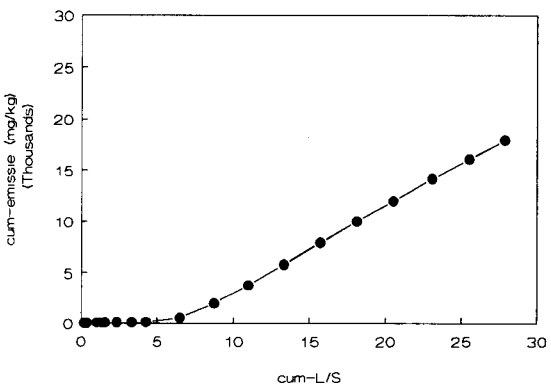
RIVM (niet belucht)



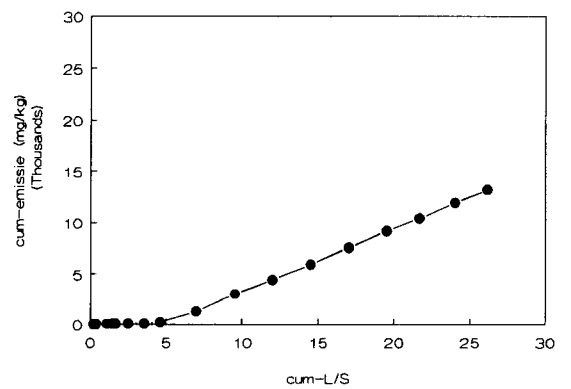
RIVM (belucht)



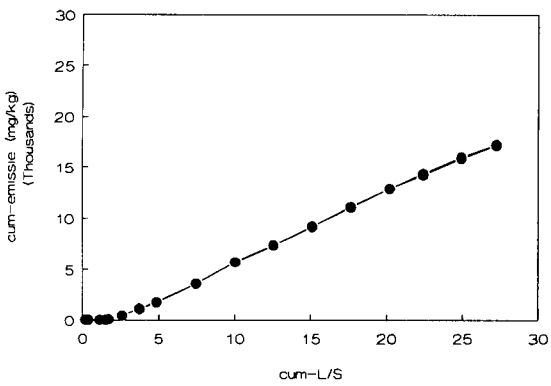
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



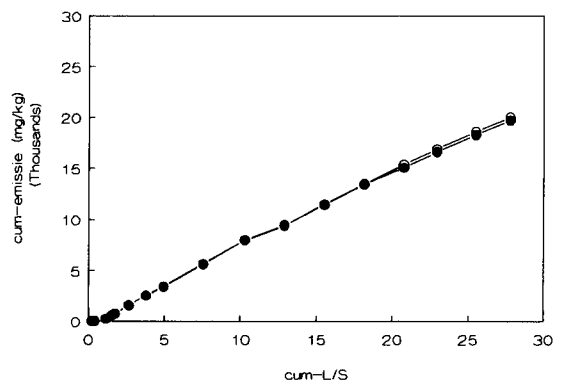
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



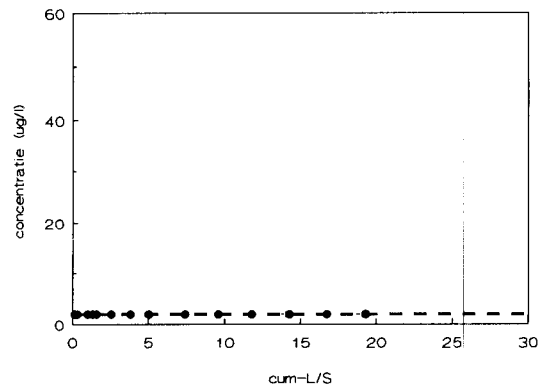
Wildrijk (belucht)



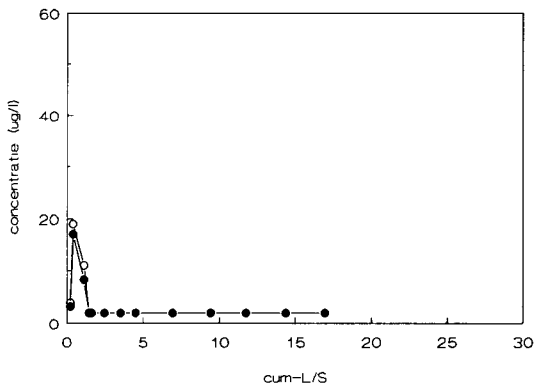
Concentratie chroom (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

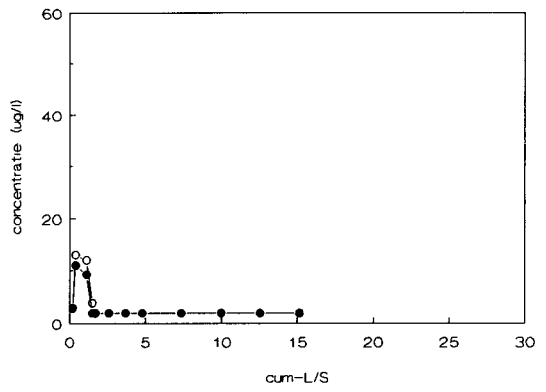
Staalslak (input)



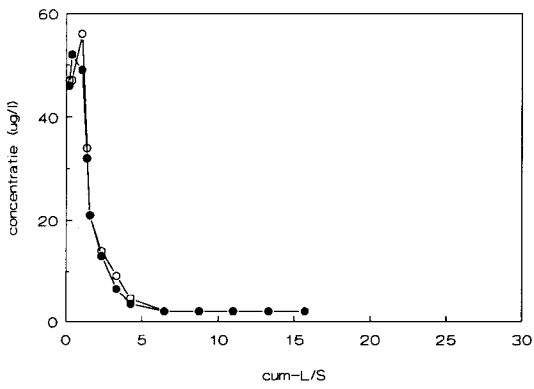
RIVM
(niet belucht)



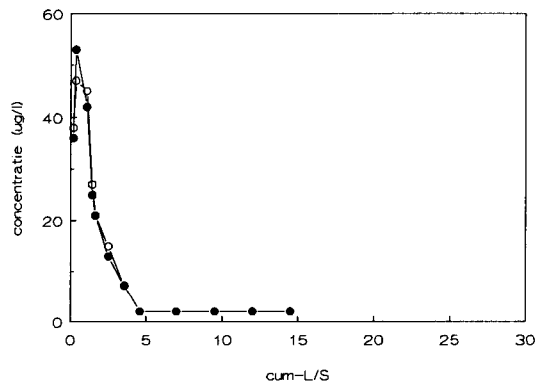
RIVM
(belucht)



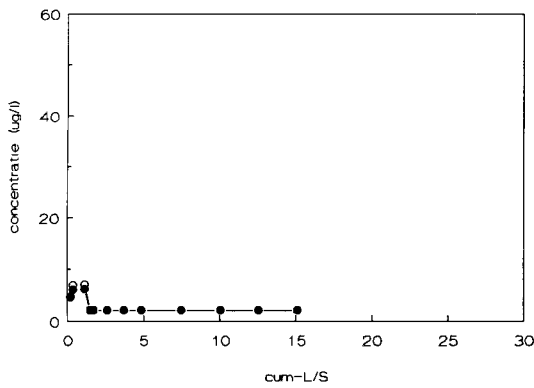
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



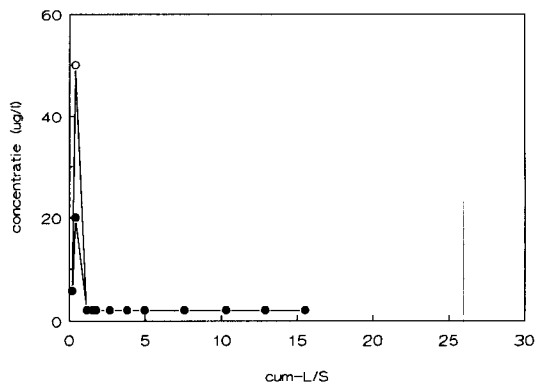
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



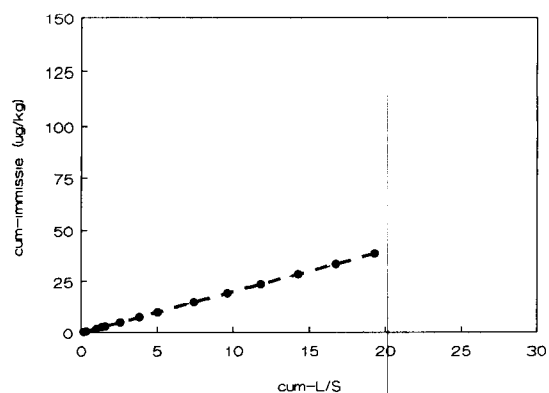
Wildrijk
(belucht)



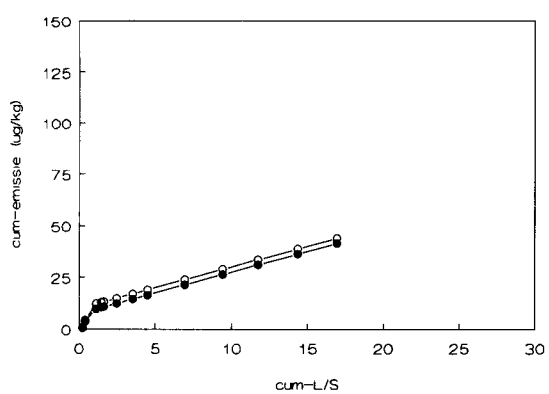
Cumulatieve emissie en immissie
chromium ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

- ○ — 0,45 μm -filter
— ● — 0,05 μm -filter

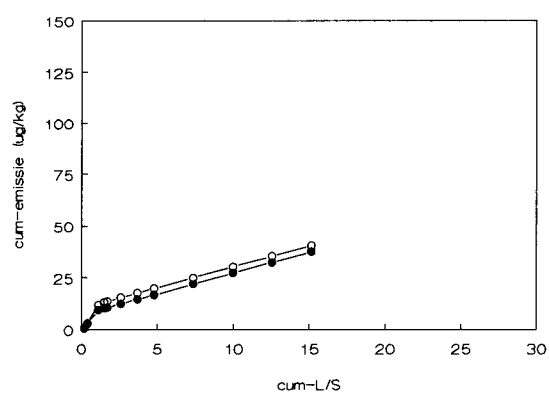
Staalslak (input)



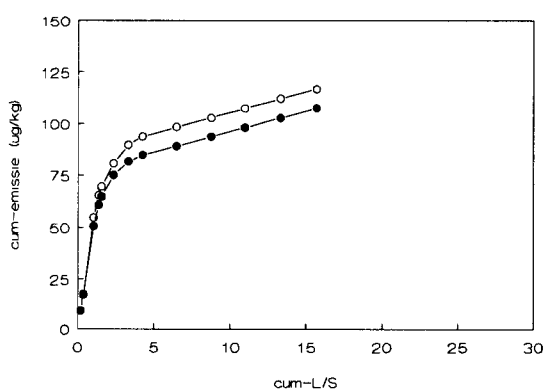
RIVM
(niet belucht)



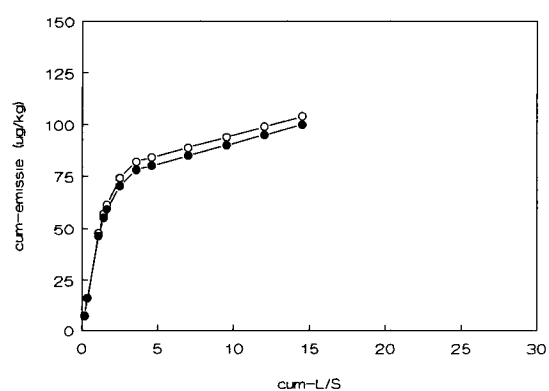
RIVM
(belucht)



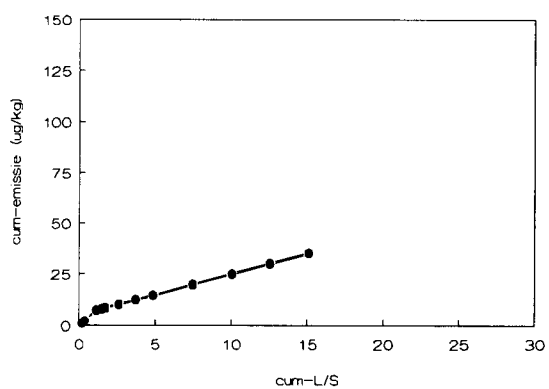
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



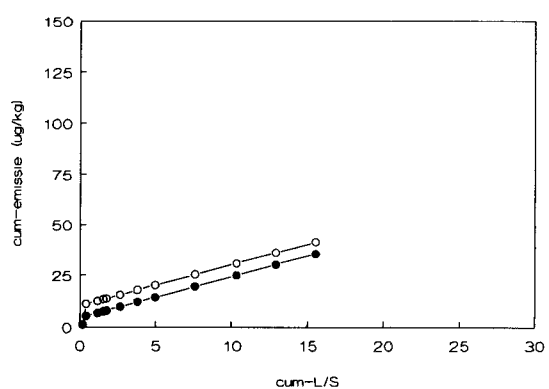
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



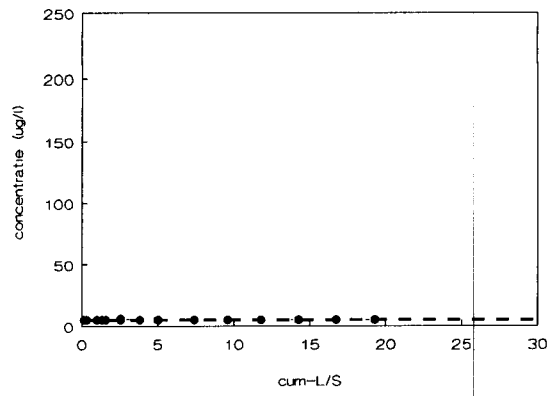
Wildrijk
(belucht)



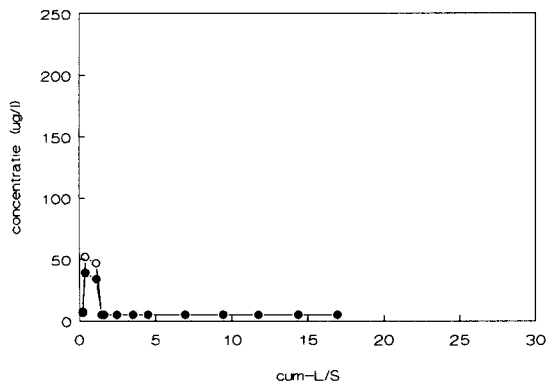
Concentratie koper (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

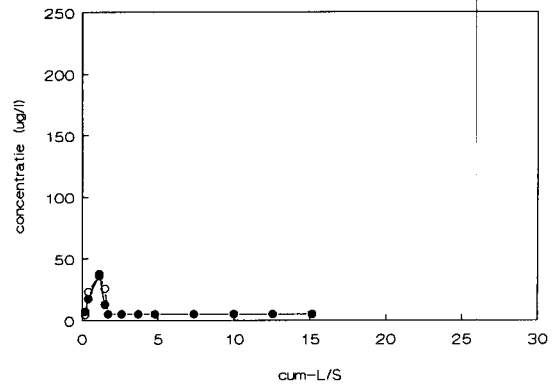
Staalslak (input)



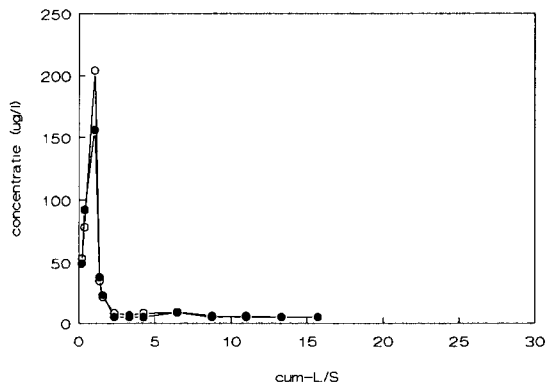
RIVM
(niet belucht)



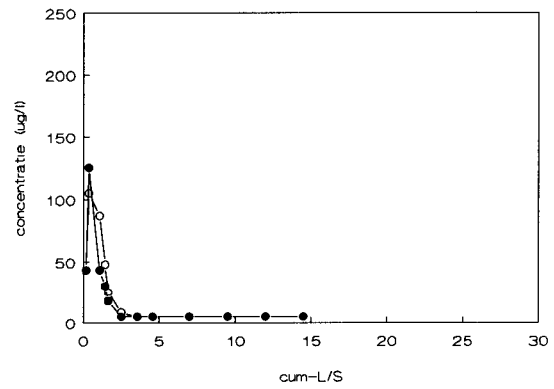
RIVM
(belucht)



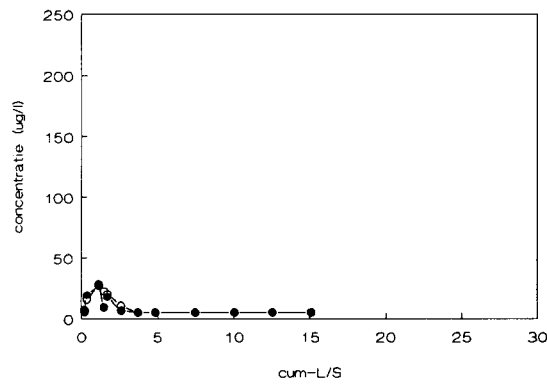
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



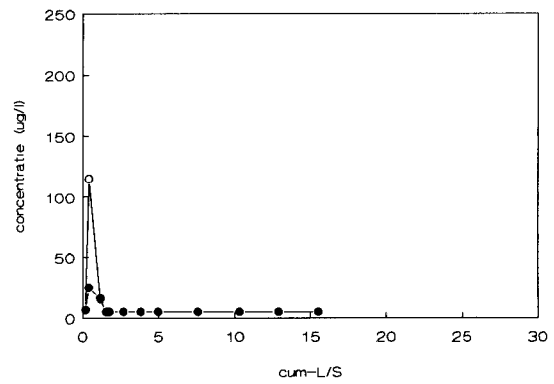
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



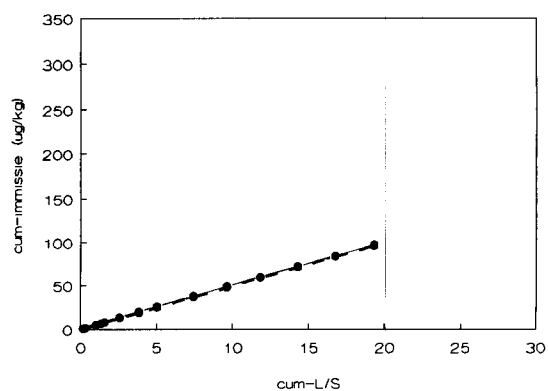
Wildrijk
(belucht)



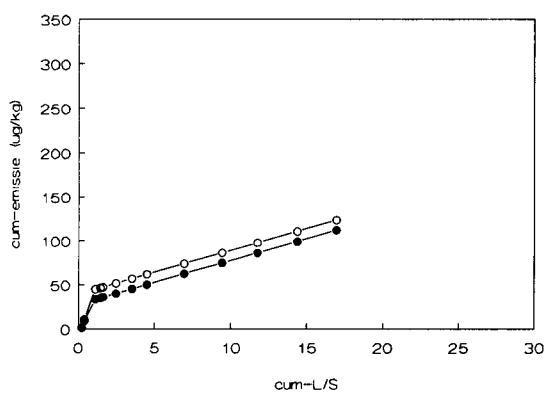
Cumulatieve emissie en immissie koper (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
 — ● — 0.05 um-filter

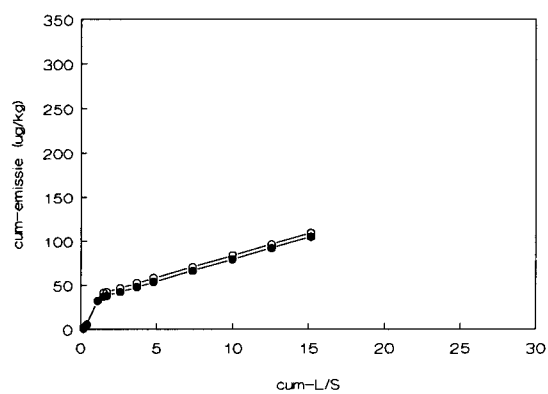
Staalslak (input)



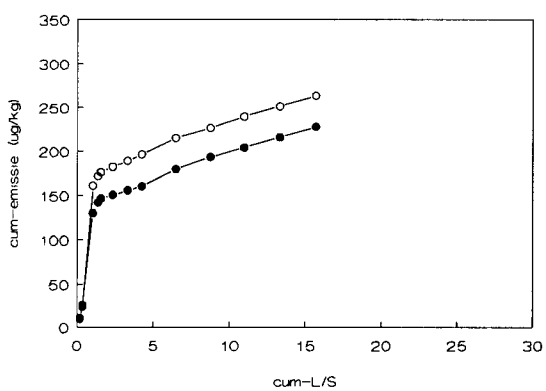
RIVM
(niet belucht)



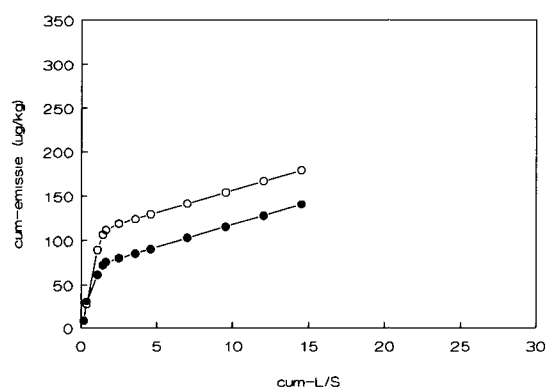
RIVM
(belucht)



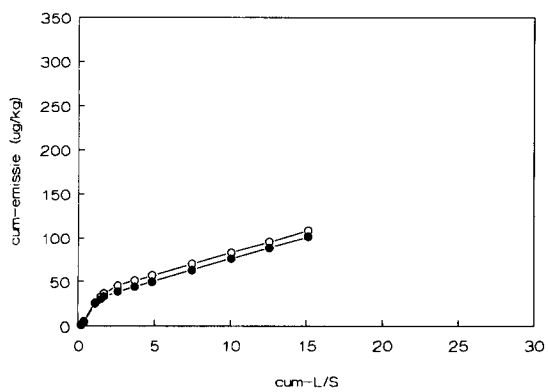
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



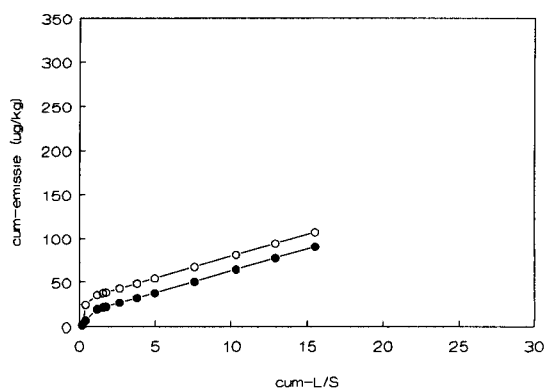
Filosofendal bovengrond
(belucht)

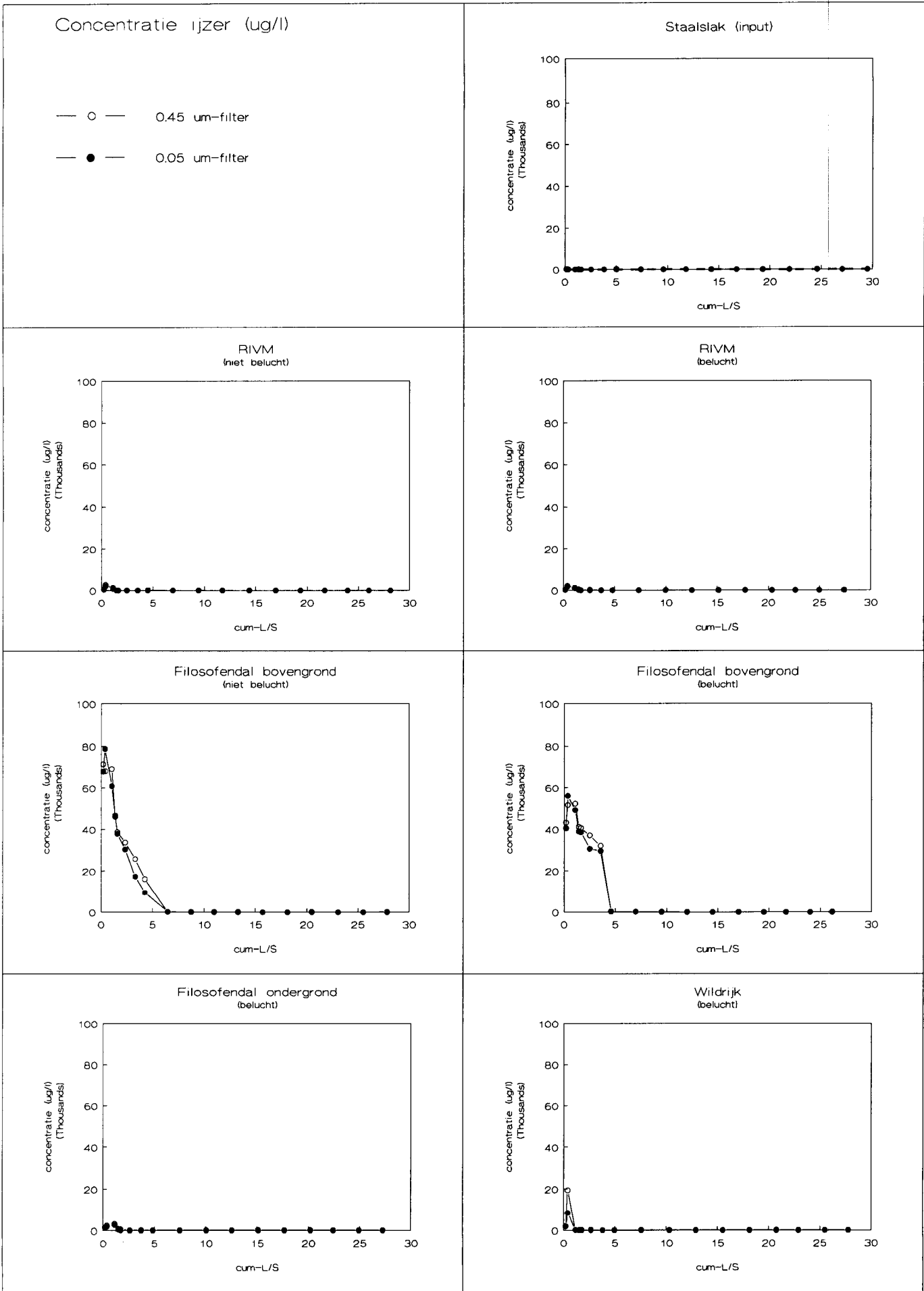


Filosofendal ondergrond
(belucht)



Wildrijk
(belucht)

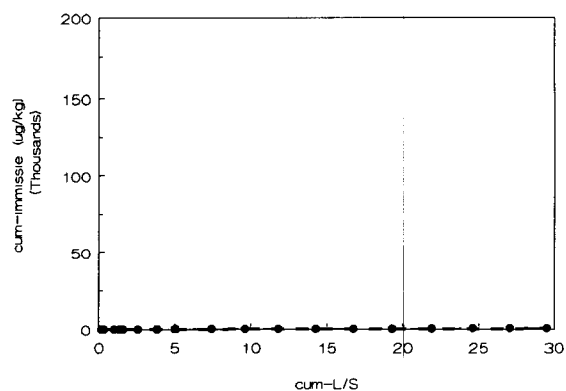




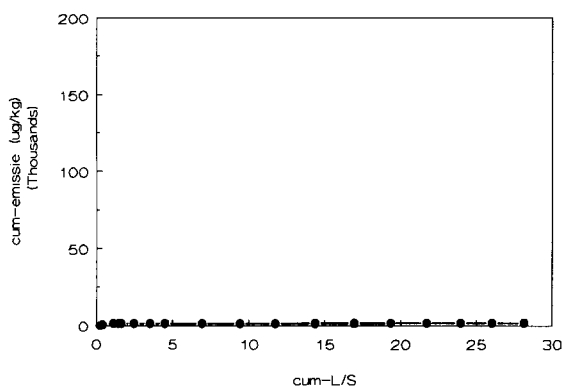
Cumulatieve emissie en immissie ijzer (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

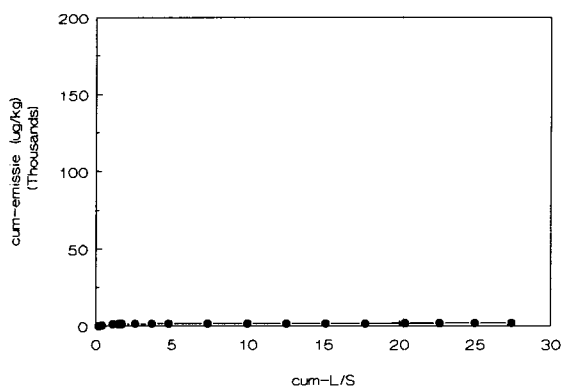
Staalslak (input)



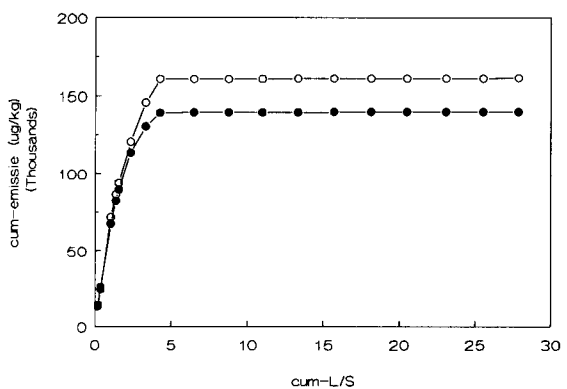
RIVM (niet belucht)



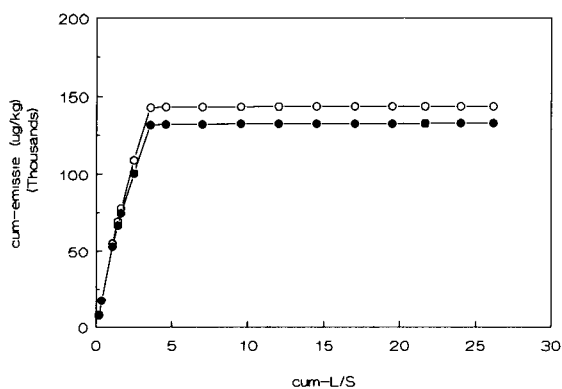
RIVM (belucht)



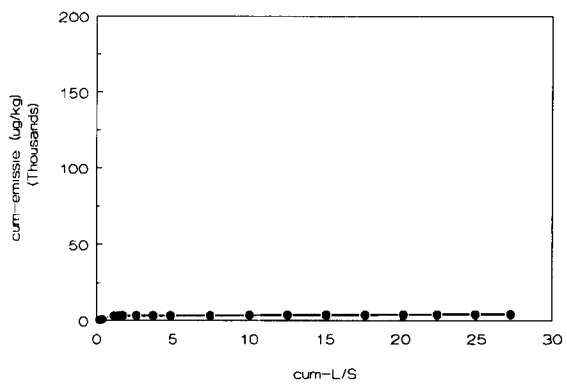
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



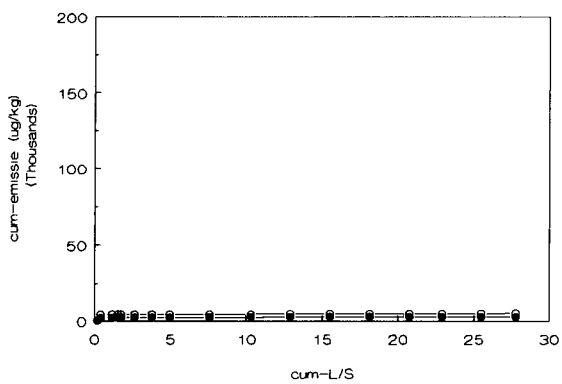
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



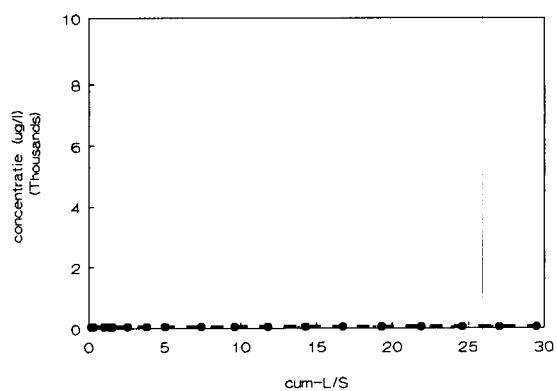
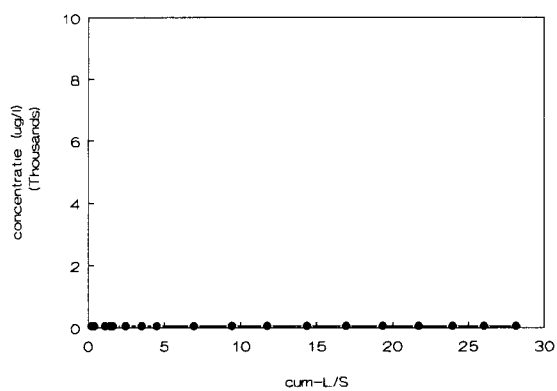
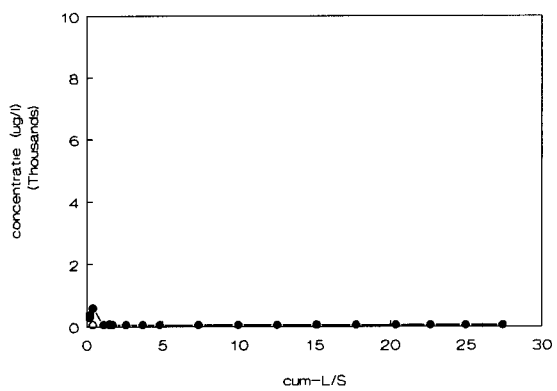
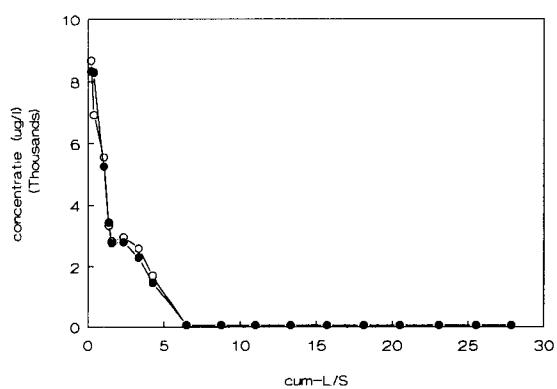
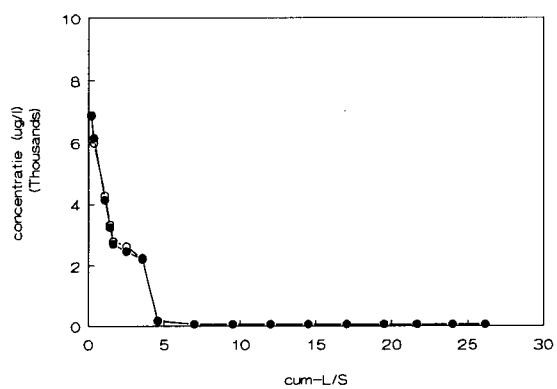
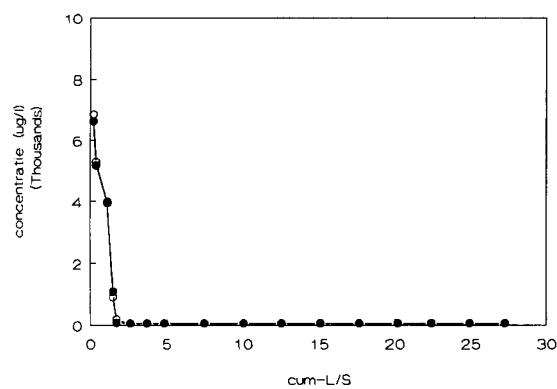
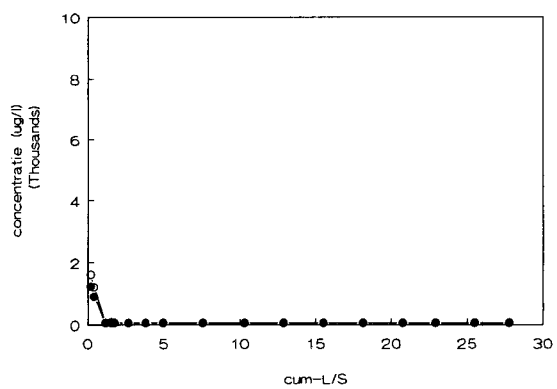
Wildrijk (belucht)



Concentratie mangaan (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
 — ● — 0.05 um-filter

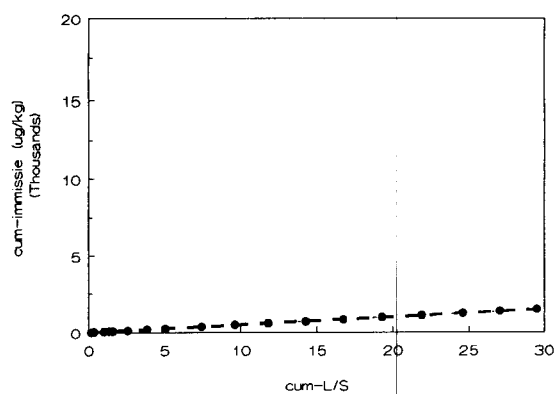
Staalslak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

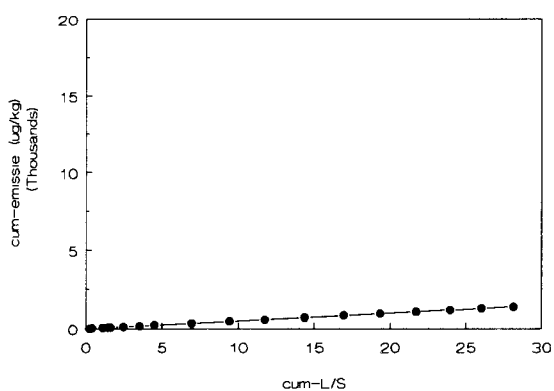
Cumulatieve emissie en immissie mangaan (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

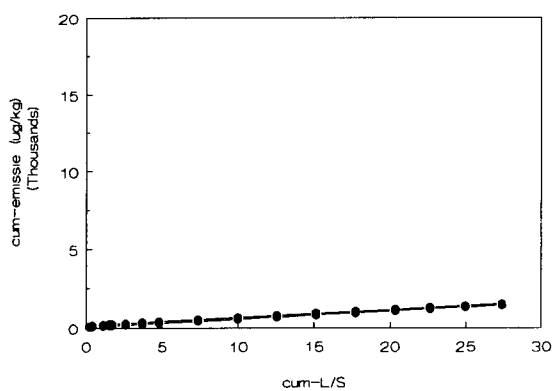
Staalslak (input)



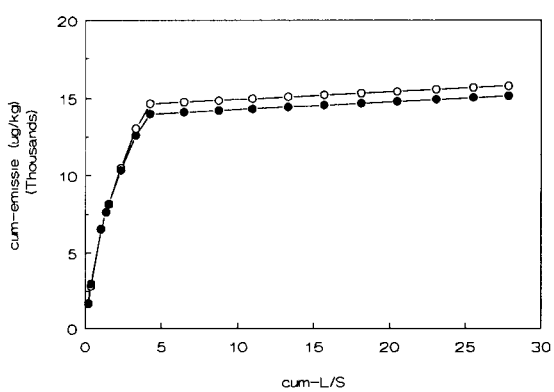
RIVM (niet belucht)



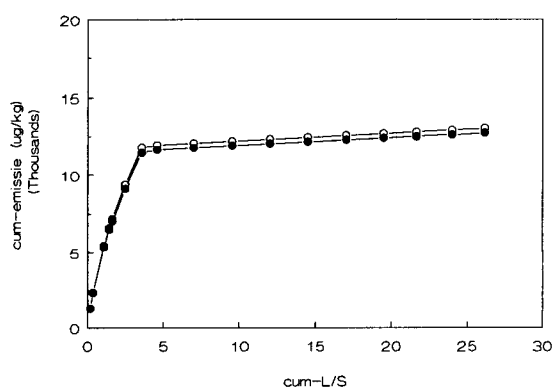
RIVM (belucht)



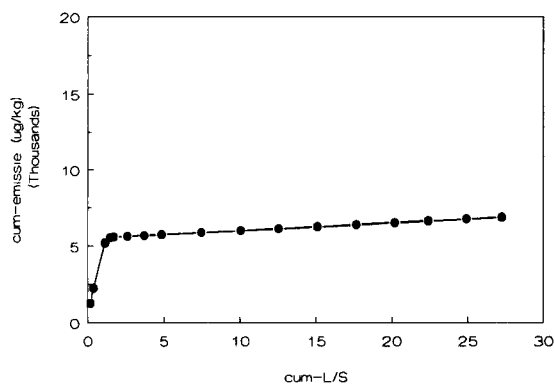
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



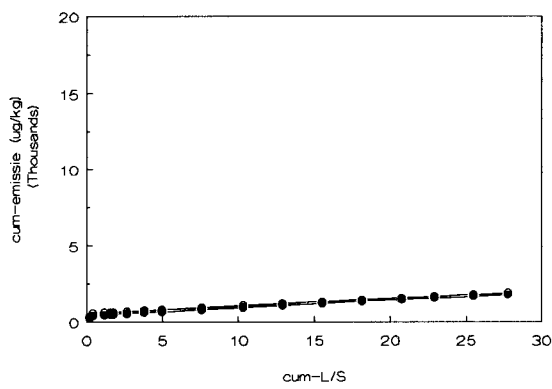
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



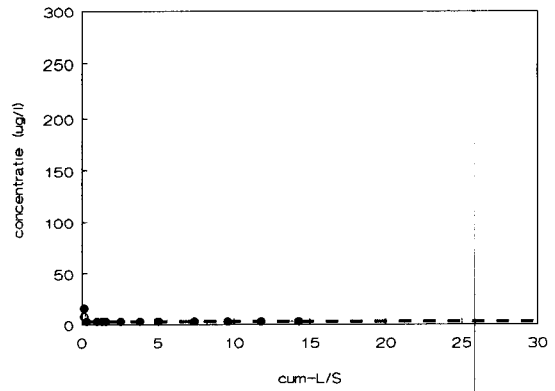
Wildrijk (belucht)



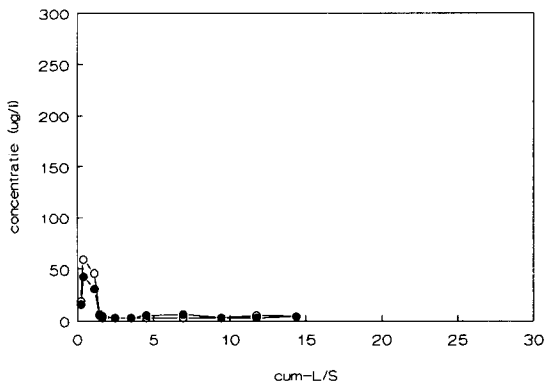
Concentratie lood (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

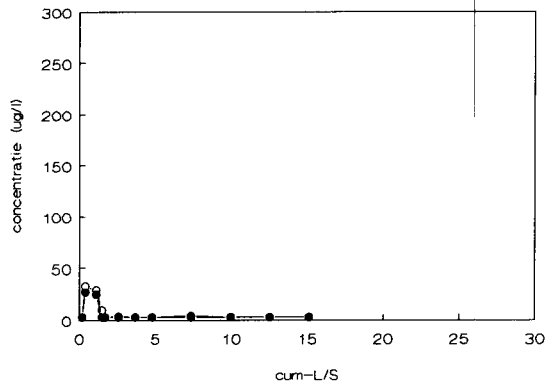
Staalslak (input)



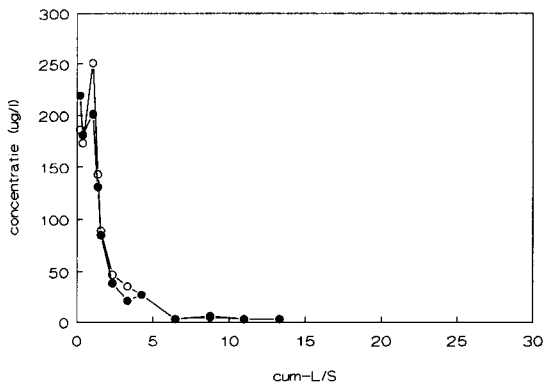
RIVM
(niet belucht)



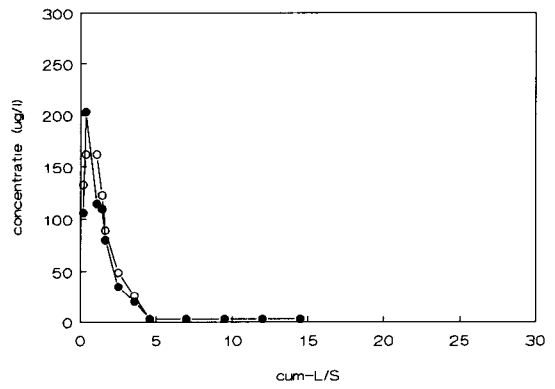
RIVM
(belucht)



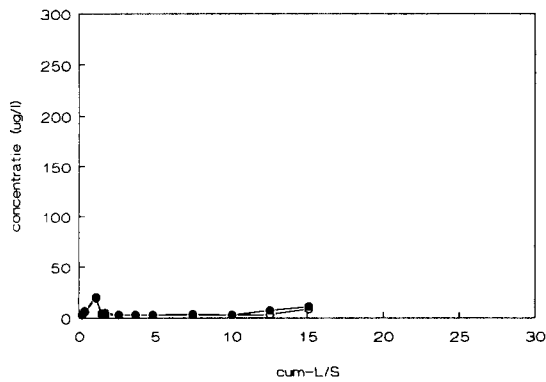
Filosofendal bovengrond
(niet belucht)



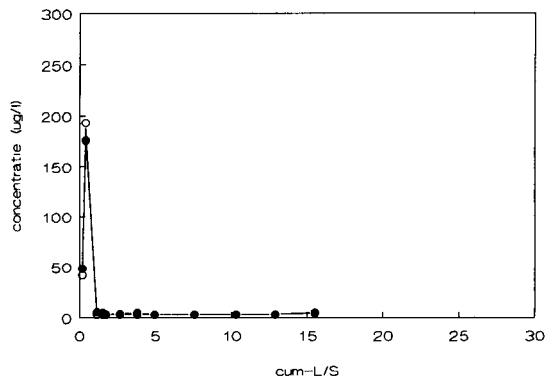
Filosofendal bovengrond
(belucht)



Filosofendal ondergrond
(belucht)



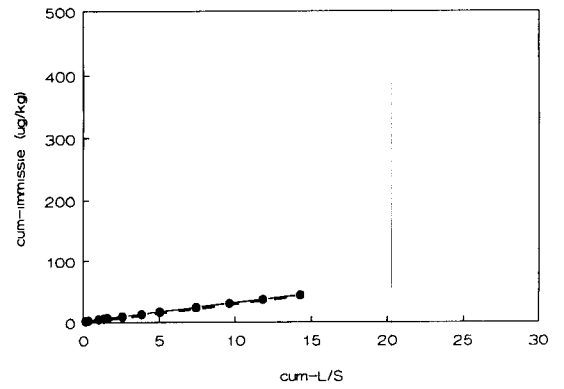
Wildrijk
(belucht)



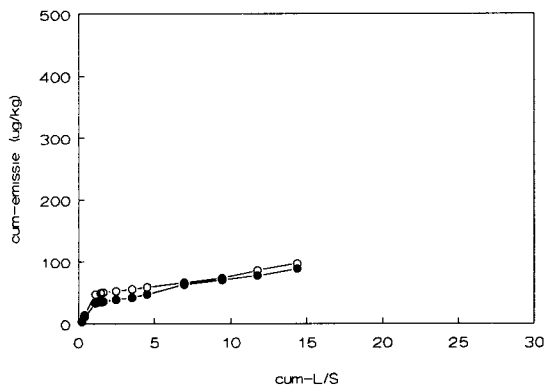
Cumulatieve emissie en immissie lood (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

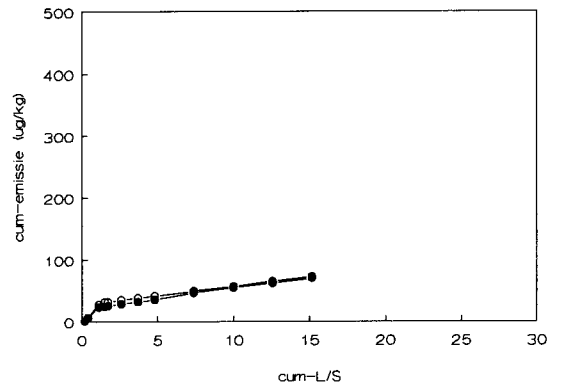
Staalslak (input)



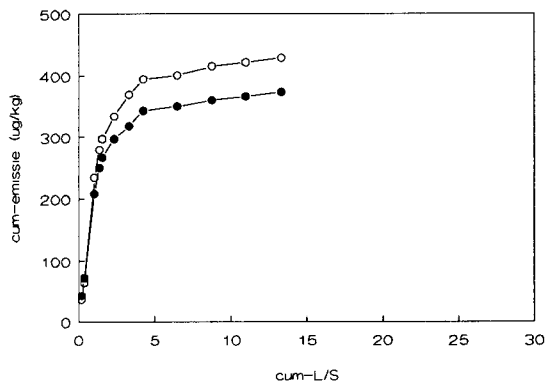
RIVM (niet belucht)



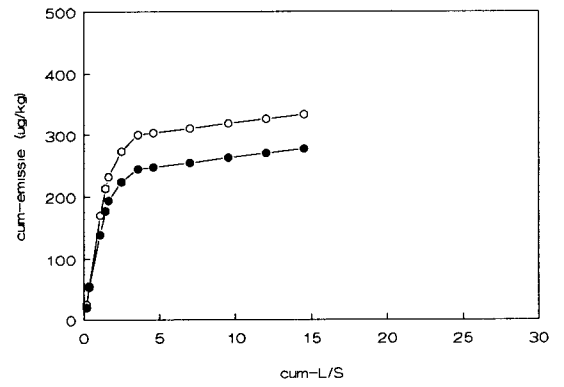
RIVM (belucht)



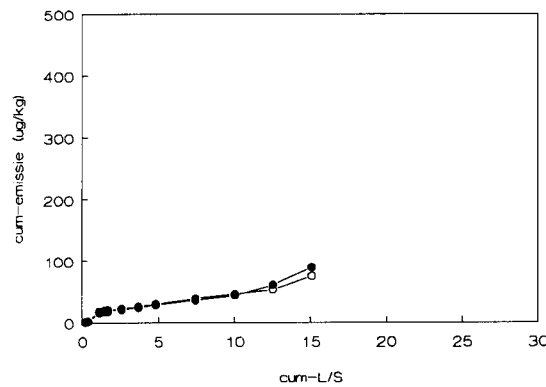
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



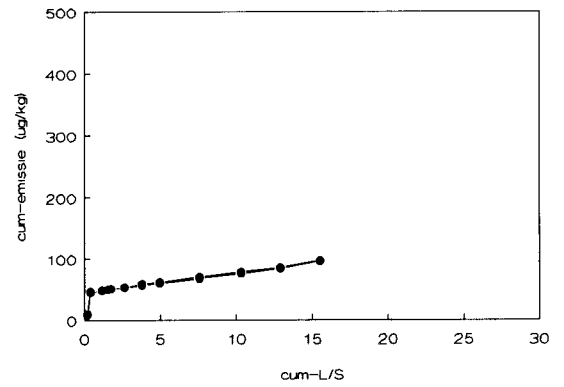
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



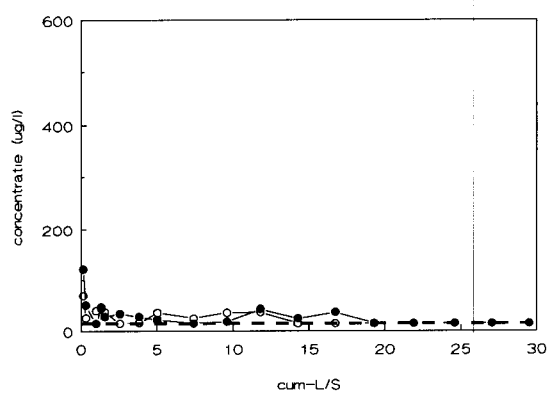
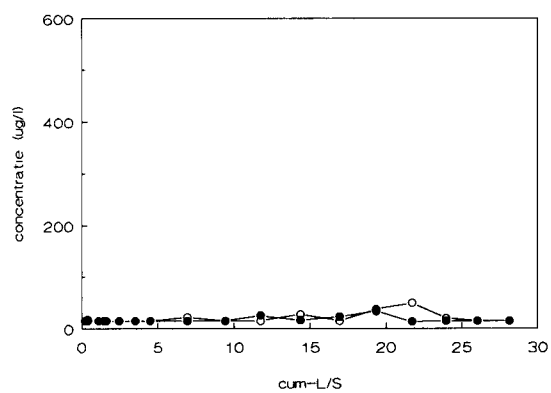
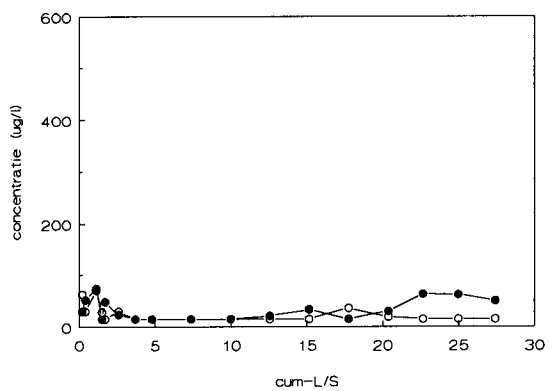
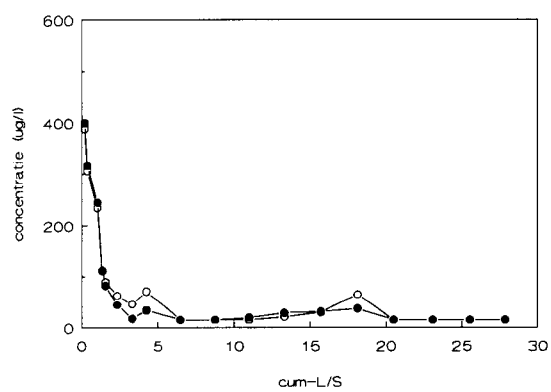
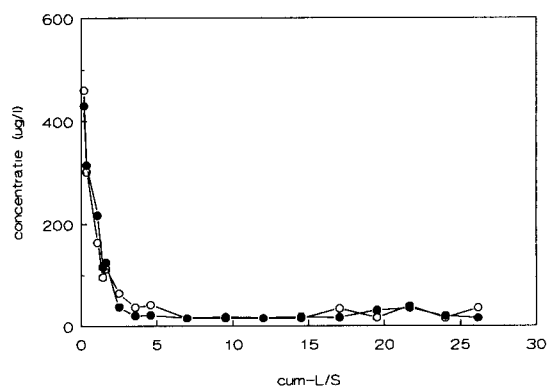
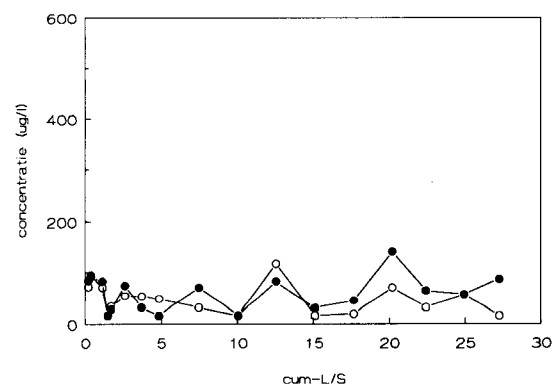
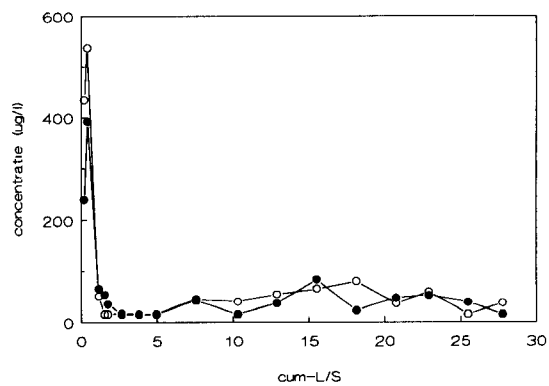
Wildrijk (belucht)



Concentratie zink (ug/l)

- ○ — 0.45 um-filter
 — ● — 0.05 um-filter

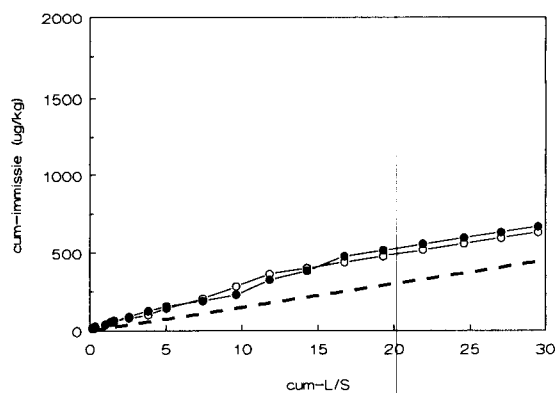
Staalslak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

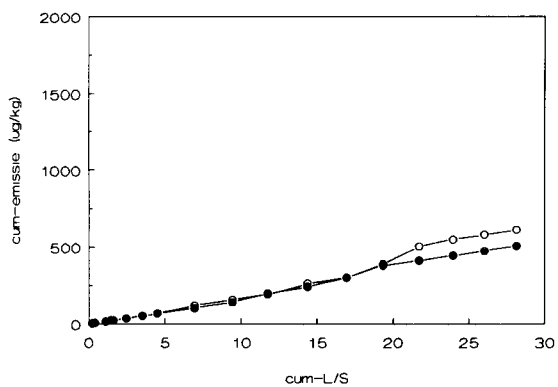
Cumulative emissie en immissie zink (ug/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

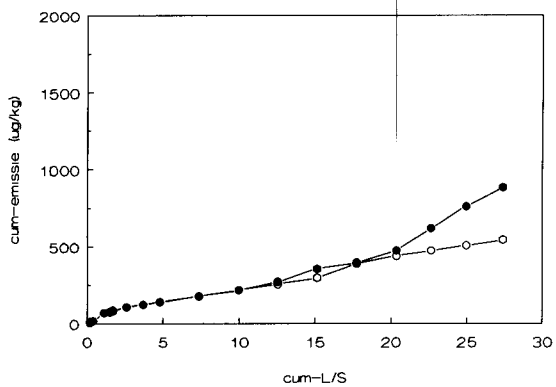
Staalslak (input)



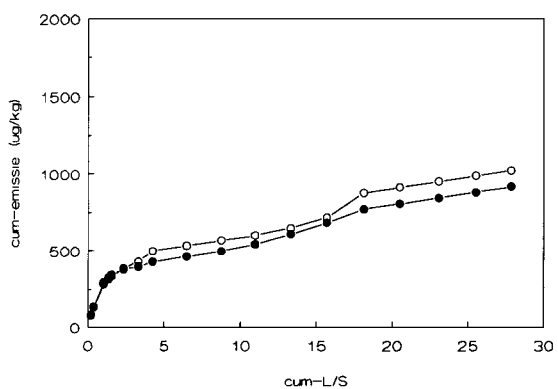
RIVM (niet belucht)



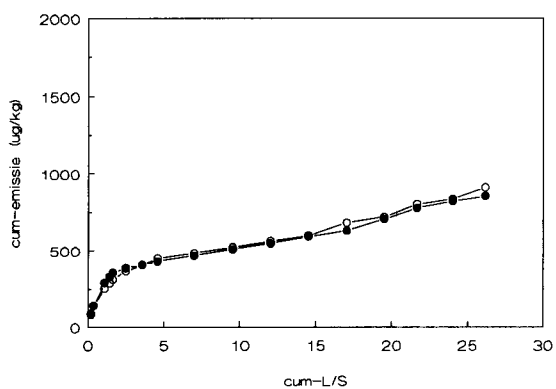
RIVM (belucht)



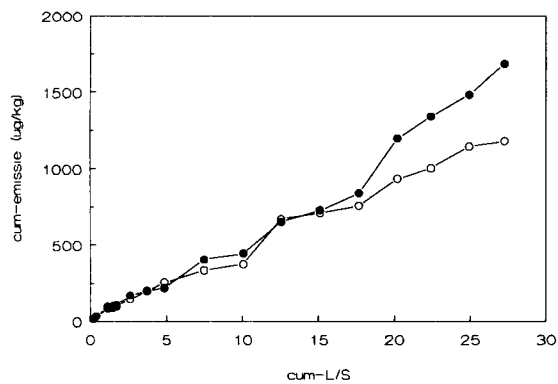
Filosofendal bovengrond (niet belucht)



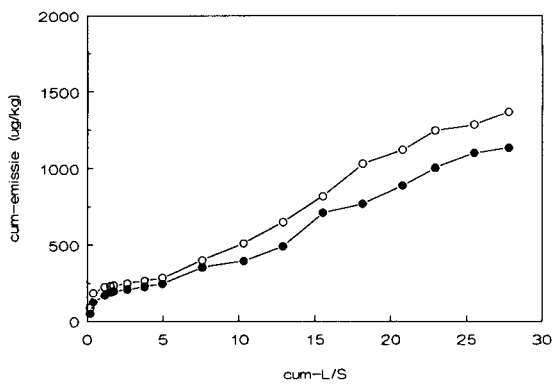
Filosofendal bovengrond (belucht)



Filosofendal ondergrond (belucht)



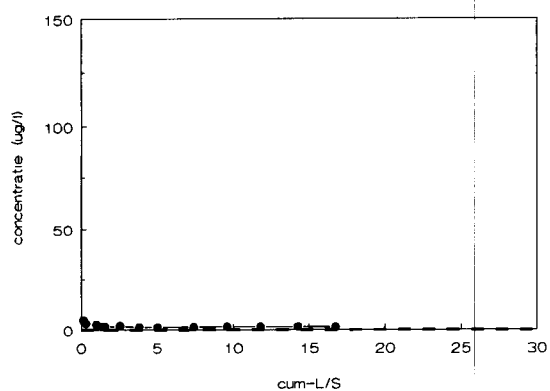
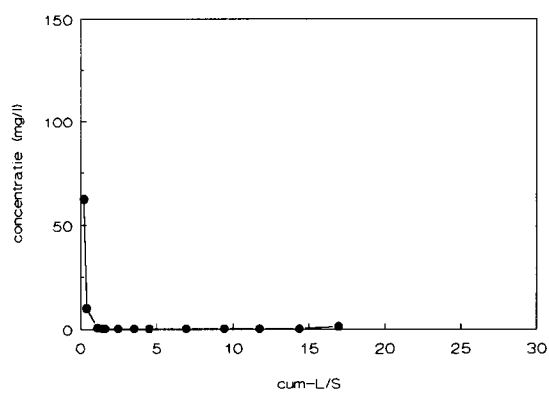
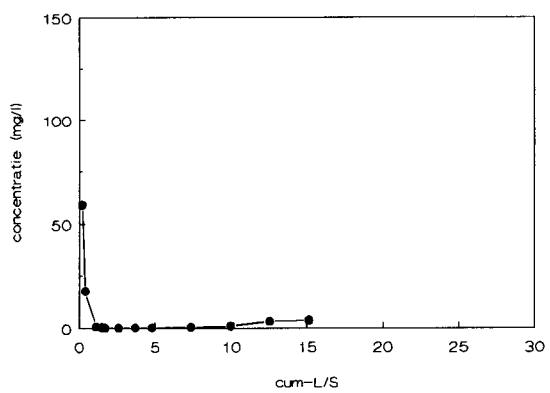
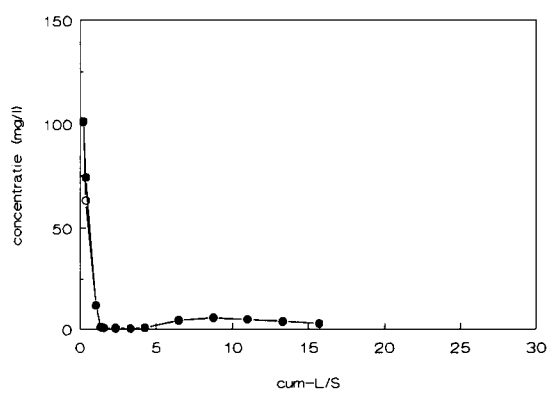
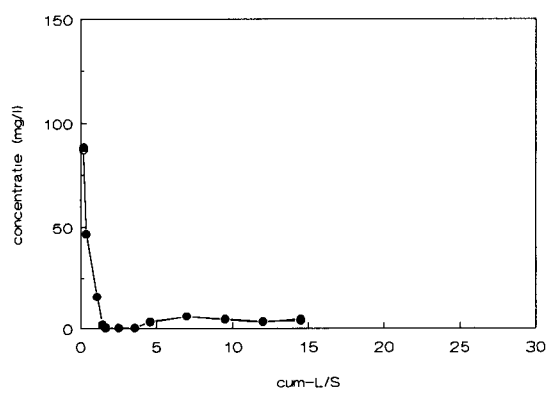
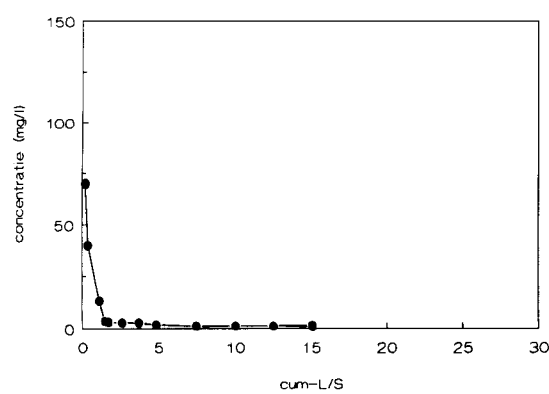
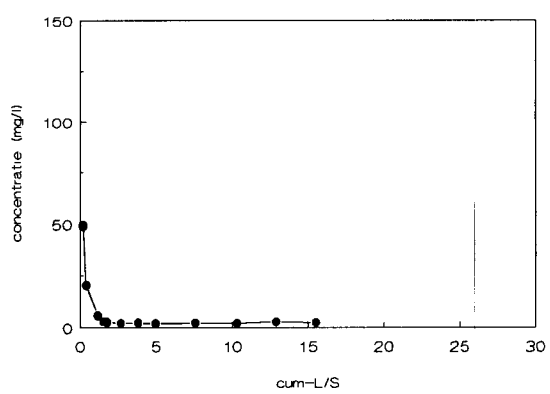
Wildrijk (belucht)



Concentratie sulfaat (mg/l)

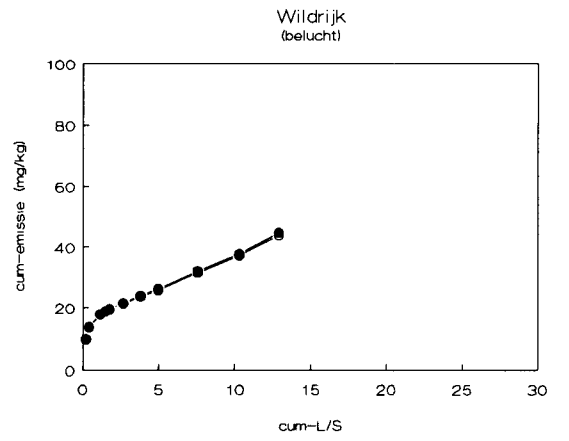
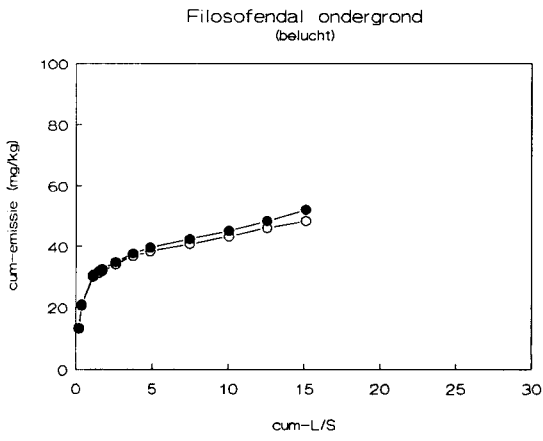
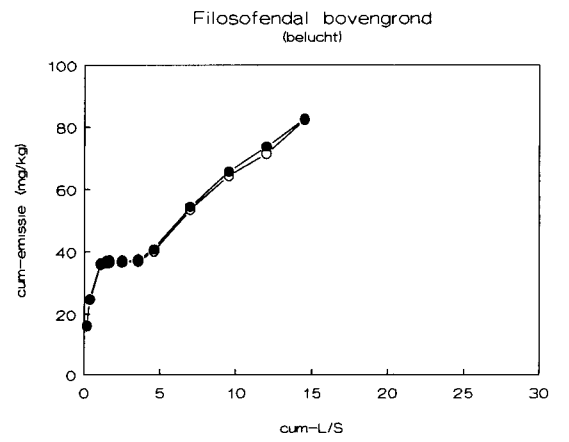
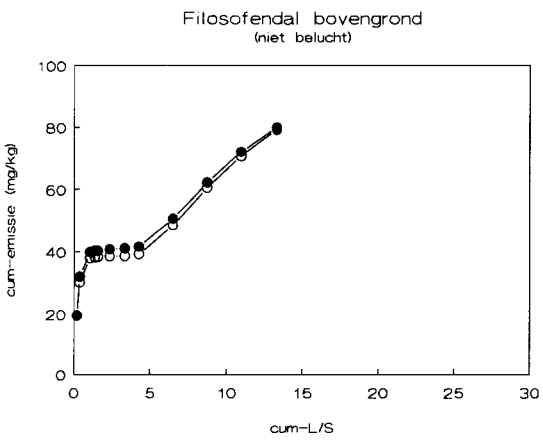
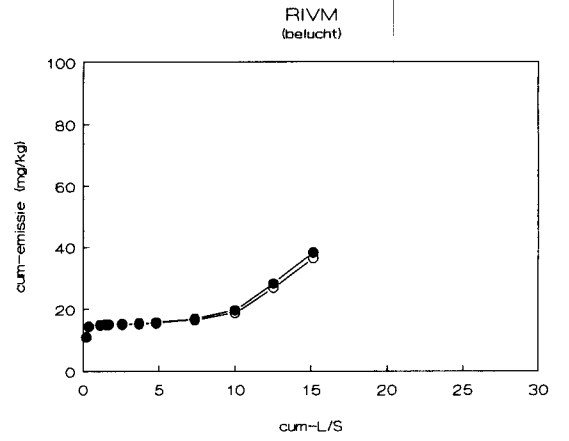
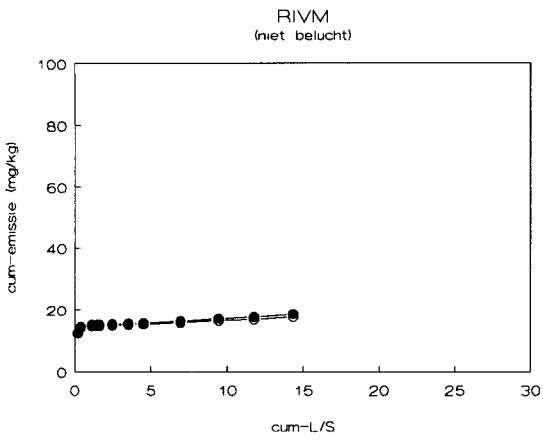
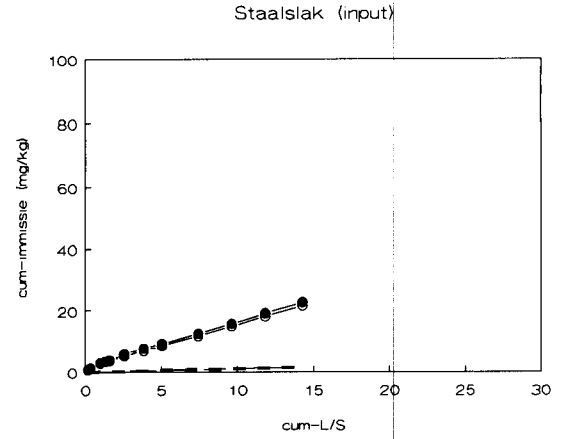
- ○ — 0.45 μ m-filter
 — ● — 0.05 μ m-filter

Staalslak (input)

RIVM
(niet belucht)RIVM
(belucht)Filosofendal bovengrond
(niet belucht)Filosofendal bovengrond
(belucht)Filosofendal ondergrond
(belucht)Wildrijk
(belucht)

Cumulatieve emissie en immissie sulfaat (mg/kg)

- ○ — 0.45 um-filter
- ● — 0.05 um-filter

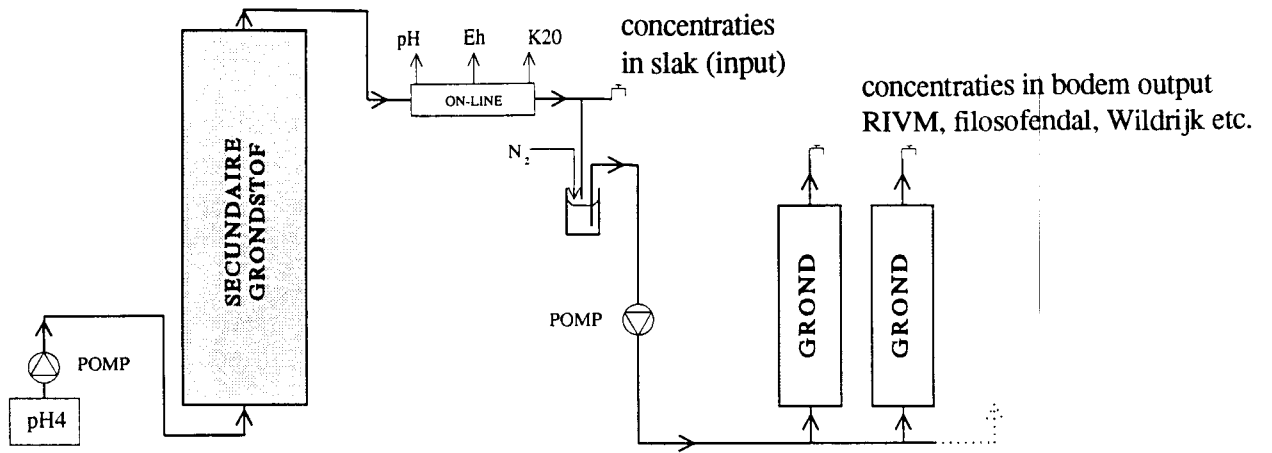




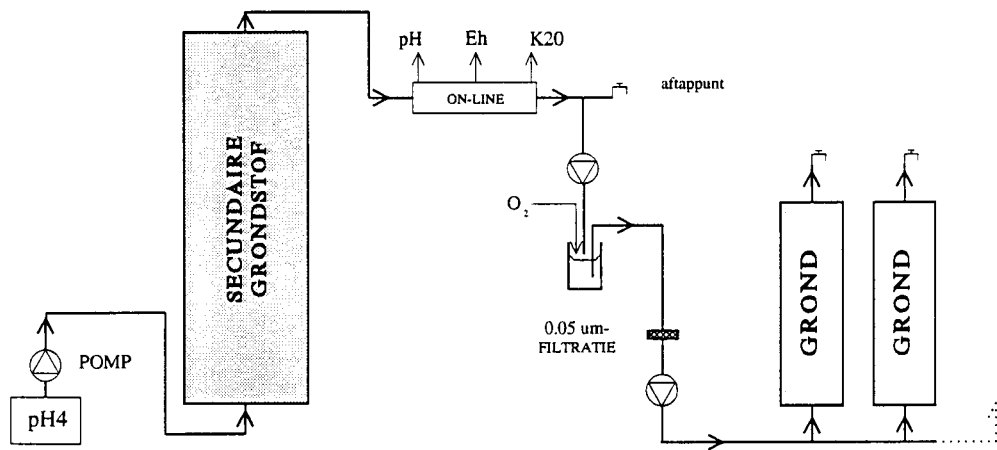
BIJLAGE 3

resultaten AVI-bodemasproef

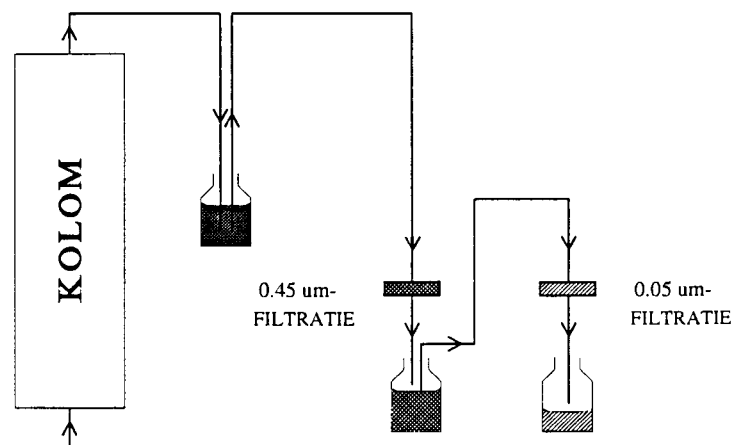
Schematische weergave kolomproef, **niet belucht**.



Schematische weergave kolomproef, **belucht**.



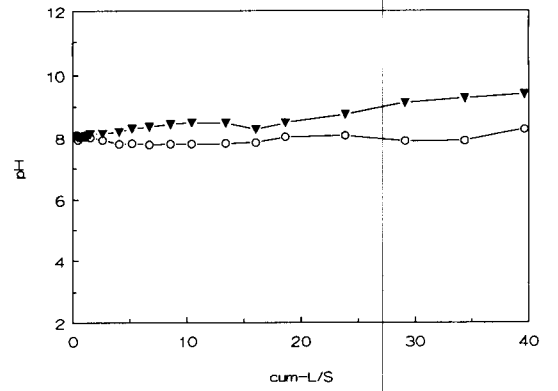
Schematische weergave **filtratie percolaten**.



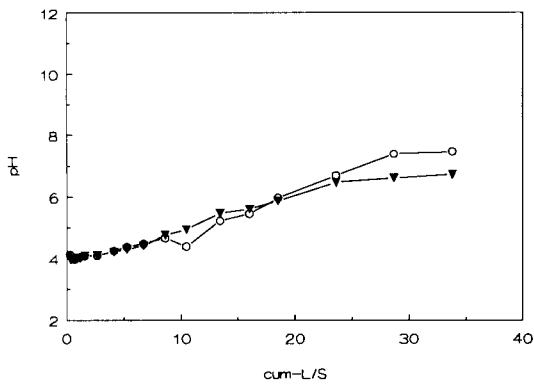
pH percolaat ON-LINE en na filtreren

- ▼ — ON-LINE
- ○ — 0.45 μ m-filter

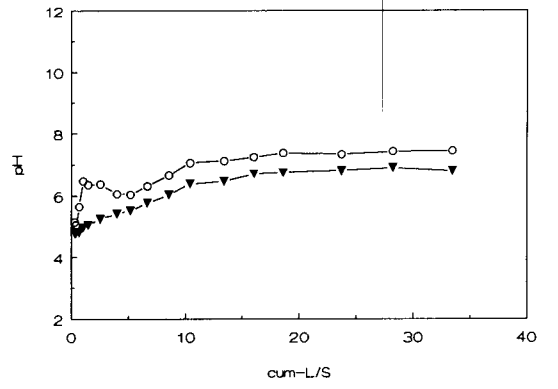
AVI-bodemias (input)



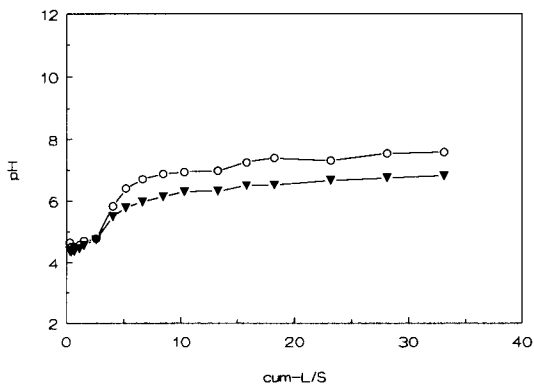
Kleibos



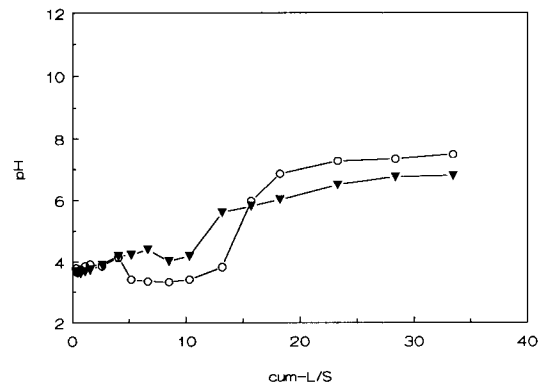
Beverweert



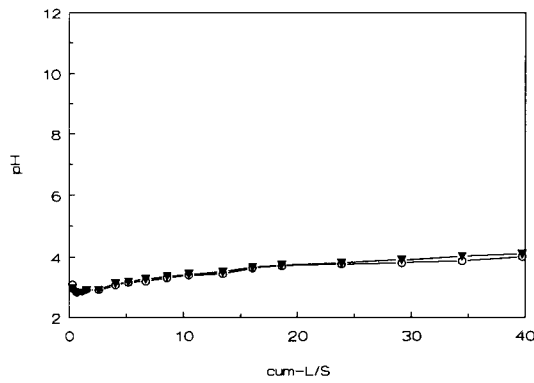
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond

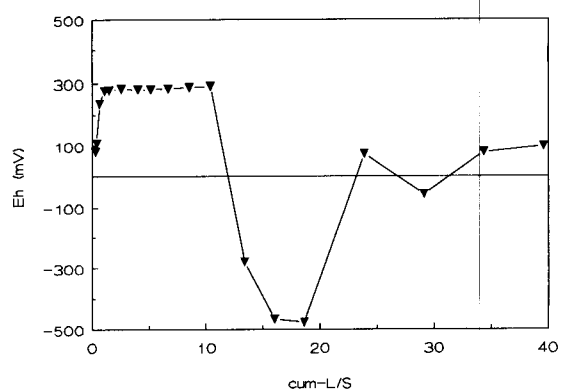


Fochteloeveen

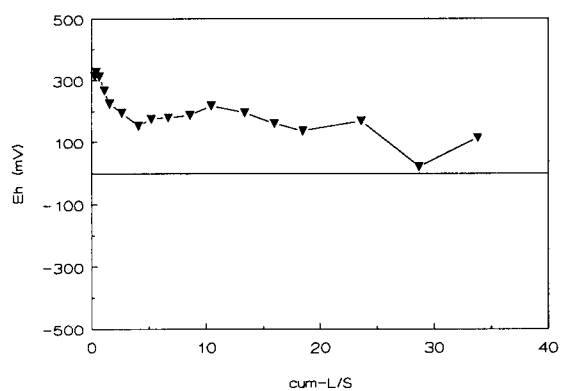


Redoxpotentiaal percolaat
ON-LINE (mV)

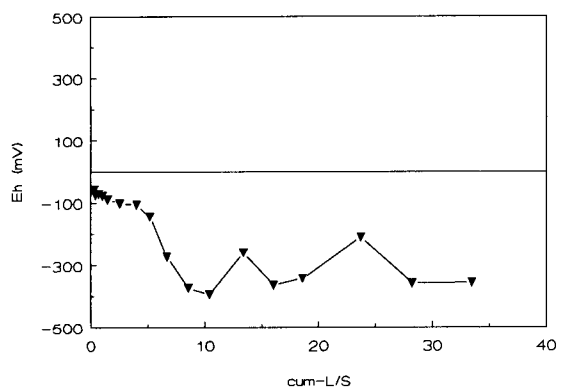
AVI-bodemass (input)



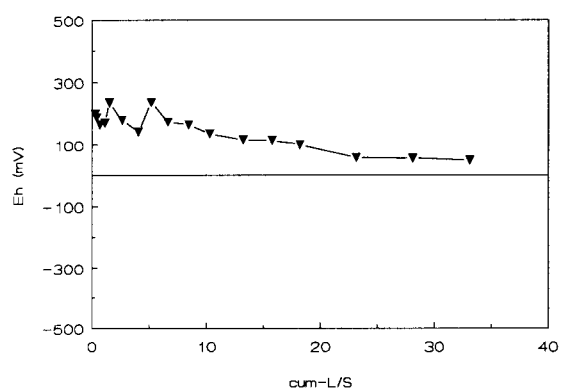
Kleibos



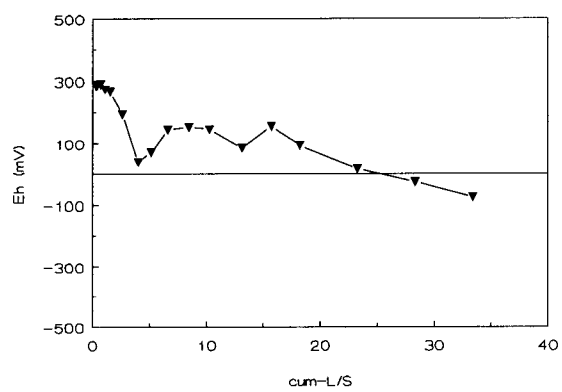
Beverweert



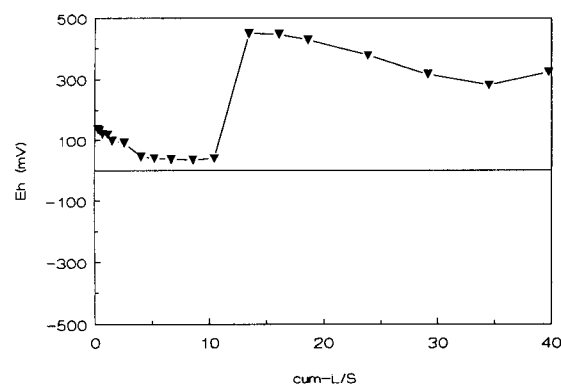
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



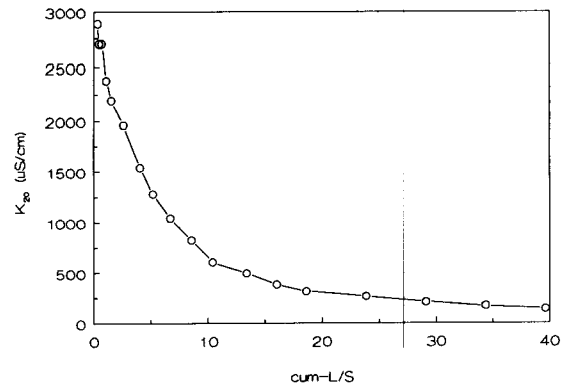
Fochteloeveen



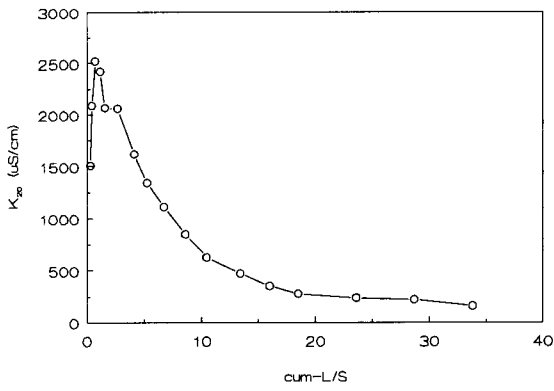
Geleidbaarheid percolaat
na filtreren (uS/cm)

— O — 0.45 um-filter

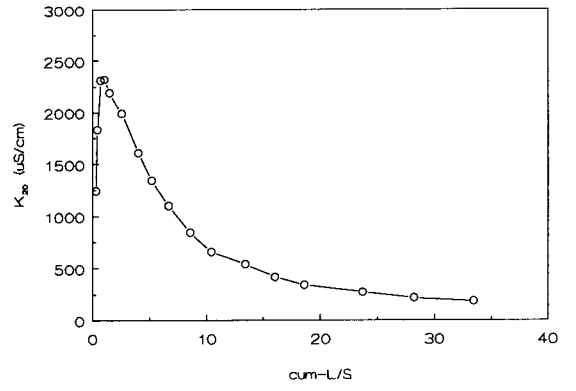
AVI-bodemas (input)



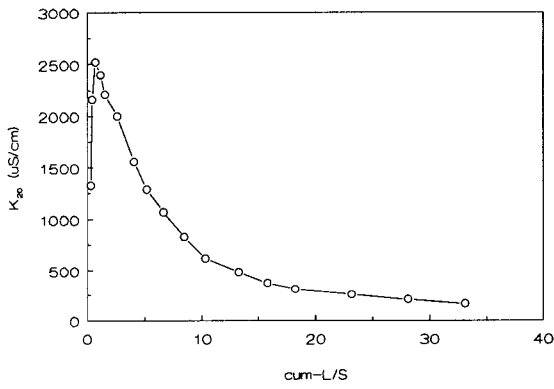
Kleibos



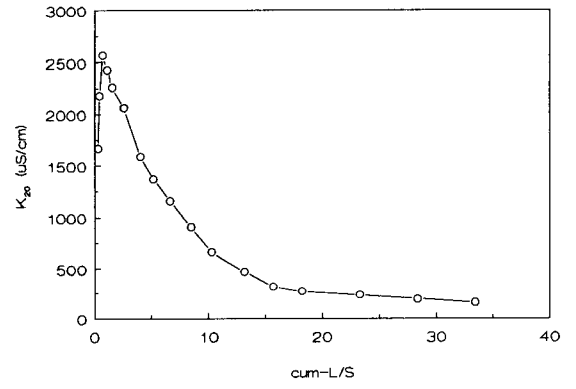
Beverweert



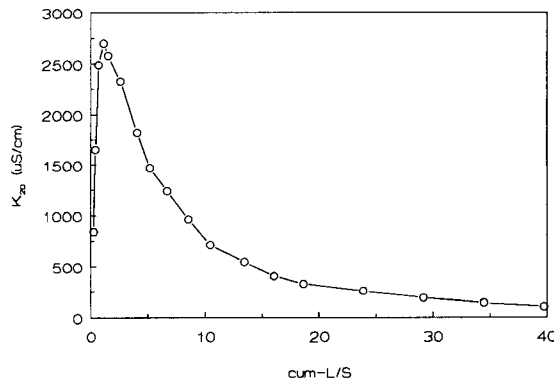
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



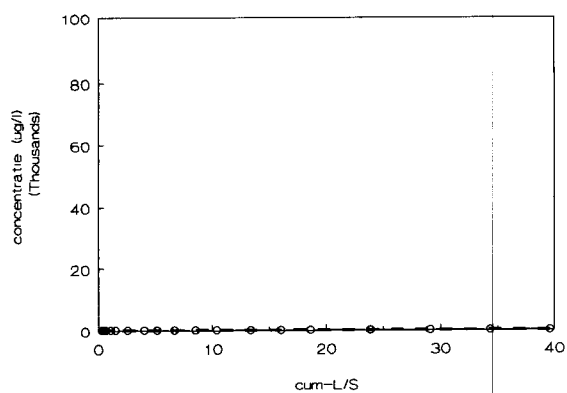
Fochteloeveen



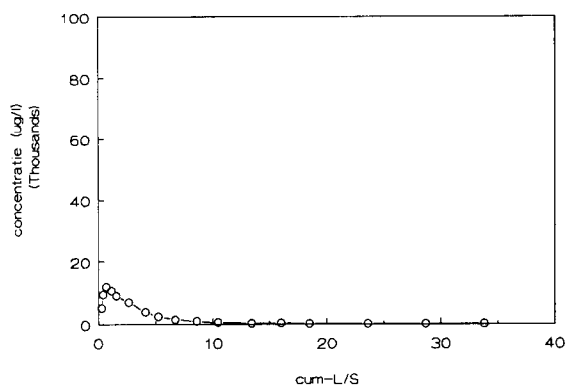
Concentratie aluminium (ug/l)

— o — 0.45 um-filter

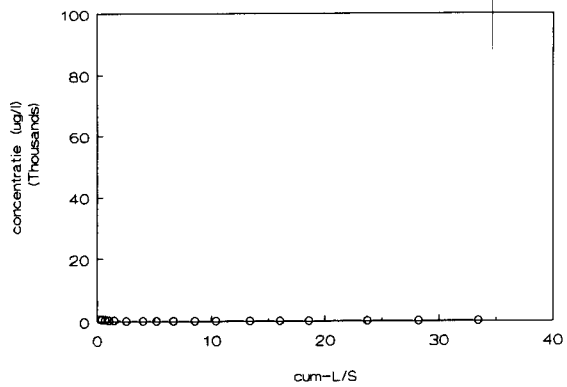
AVI-bodemas (input)



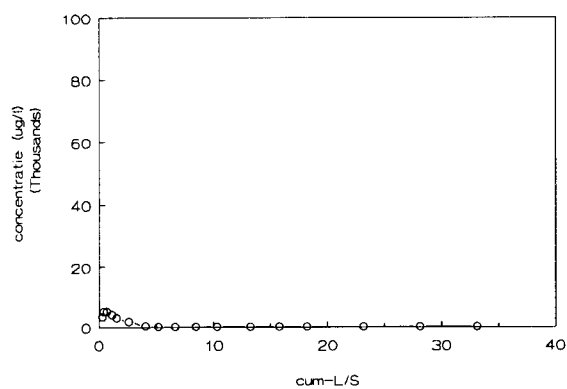
Kleibos



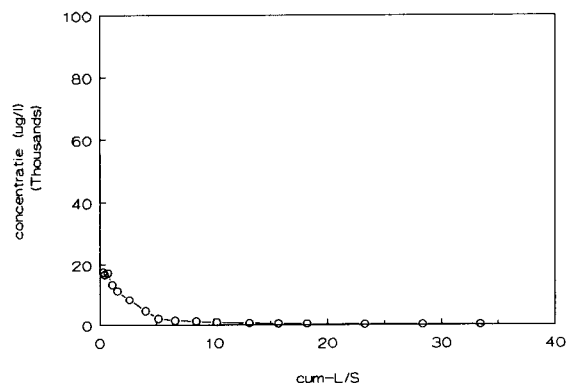
Beverweert



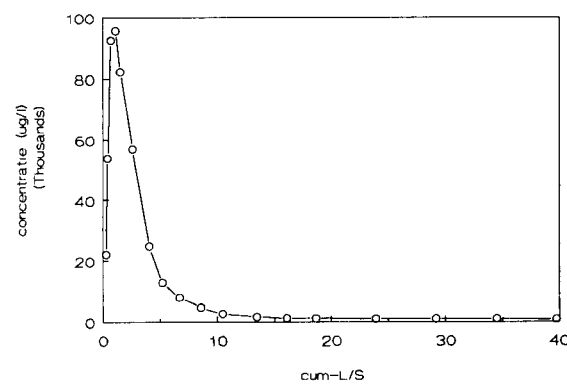
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



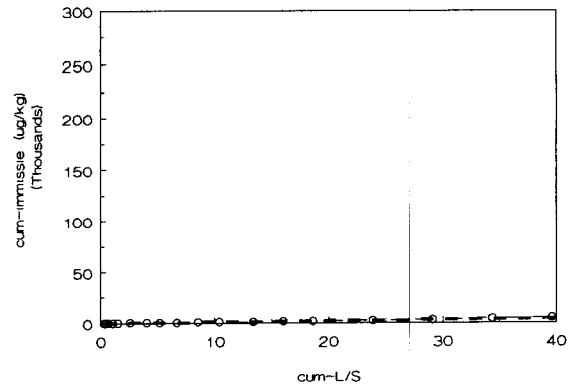
Fochteloeerveen



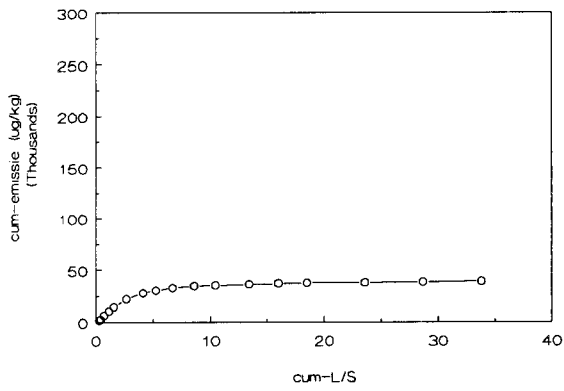
Cumulatieve emissie en immissie aluminium (ug/kg)

— o — 0,45 um-filter

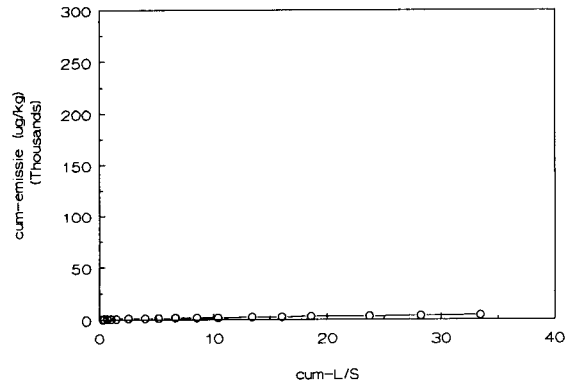
AVI-bodemias (input)



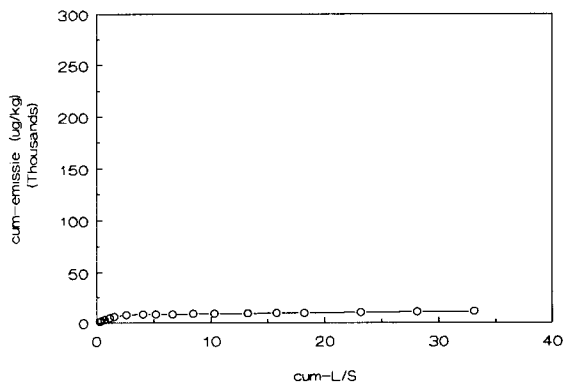
Kleibos



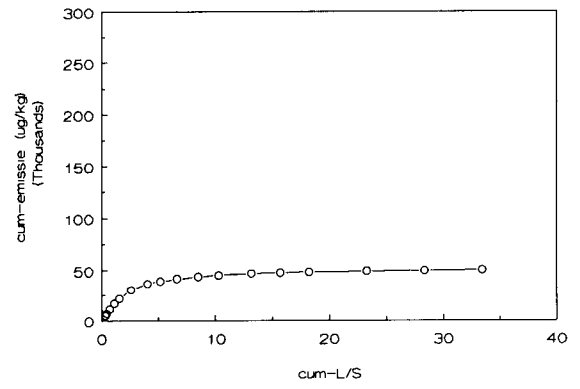
Beverweert



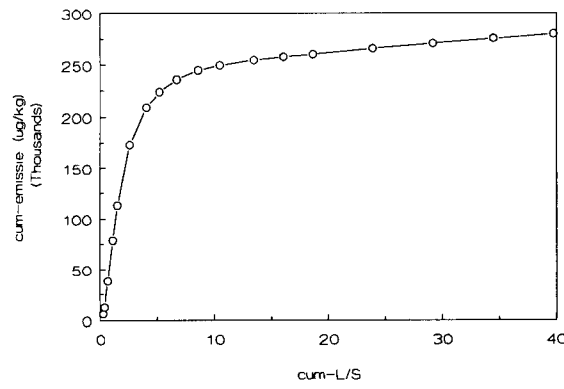
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



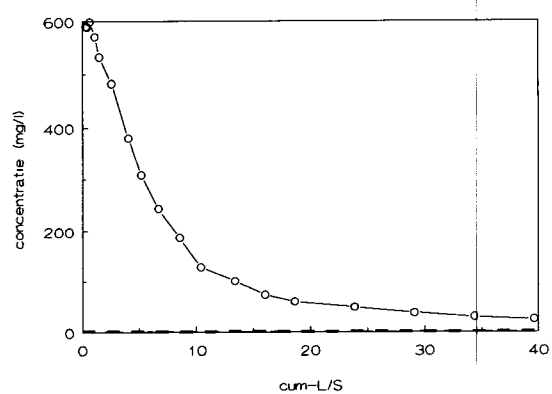
Fochteloeveen



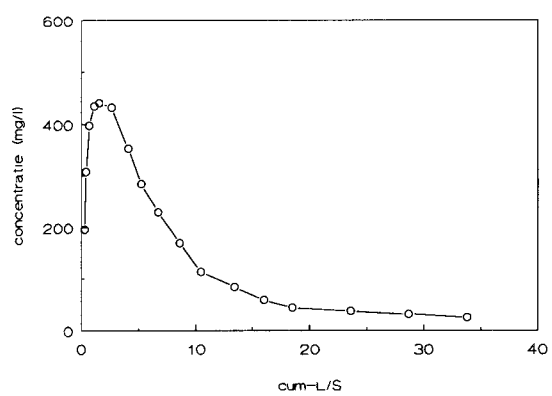
Concentratie calcium (mg/l)

— ○ — 0.45 μ m-filter

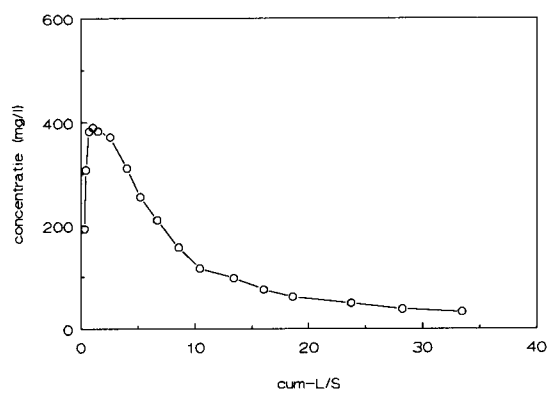
AVI-bodemas (input)



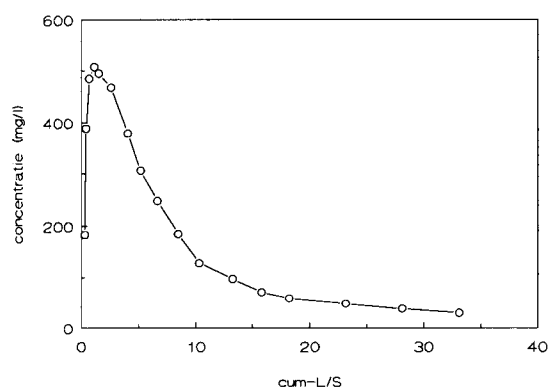
Kleibos



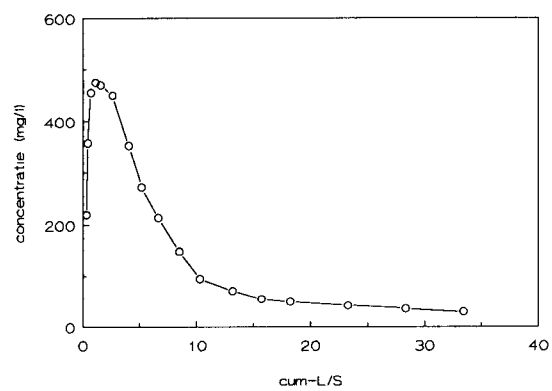
Beverweert



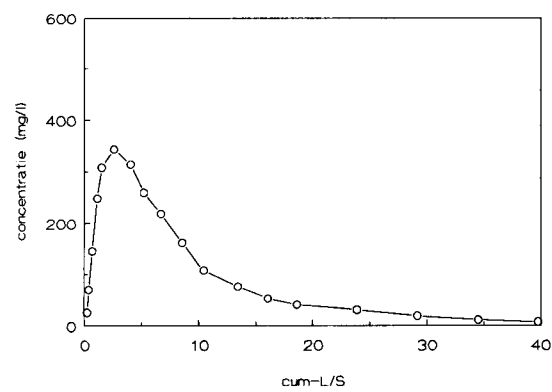
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



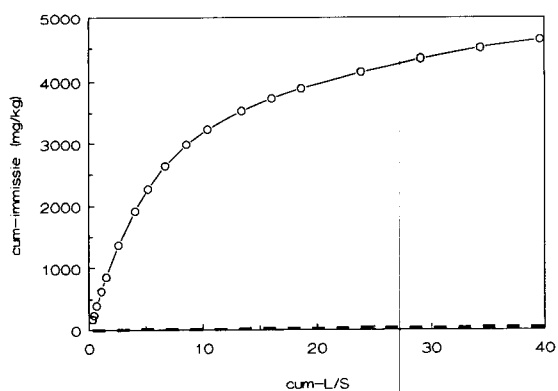
Fochtelooerveen



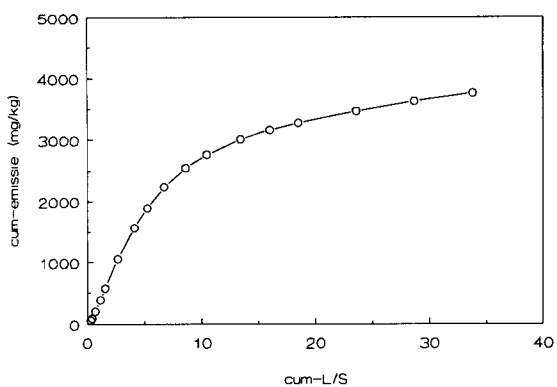
Cumulatieve emissie en immissie calcium (mg/kg)

— o — 0.45 um-filter

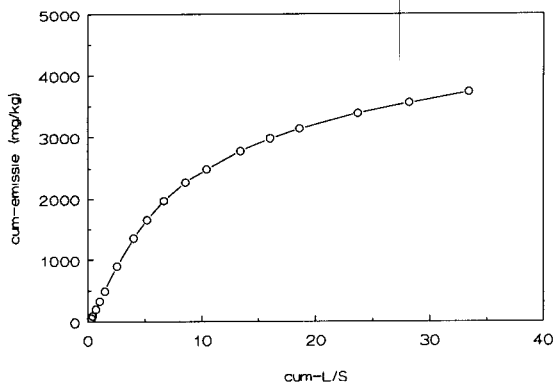
AVI-bodemias (input)



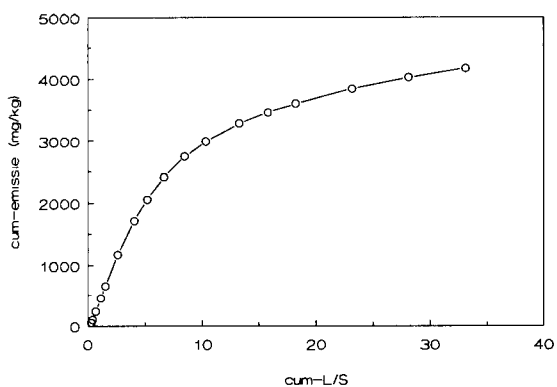
Kleibos



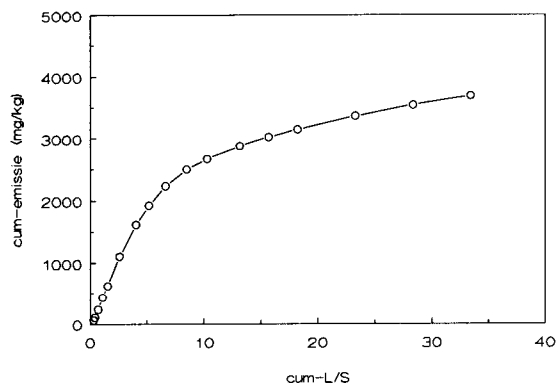
Beverweert



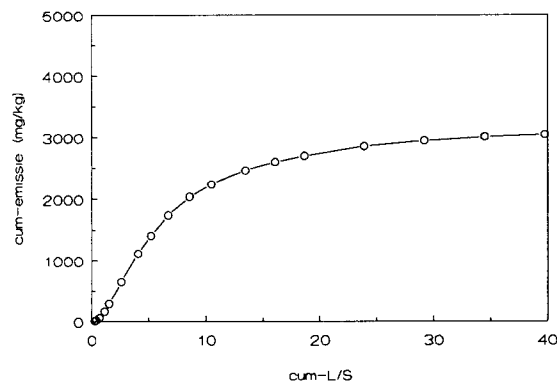
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



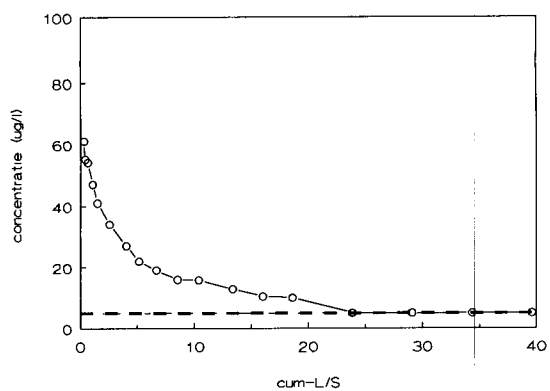
Fochteloerveen



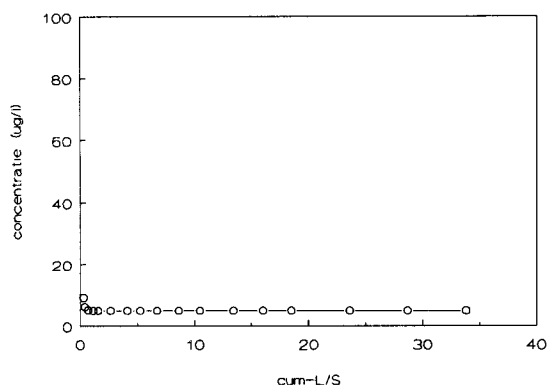
Concentratie koper (ug/l)

— o — 0.45 um-filter

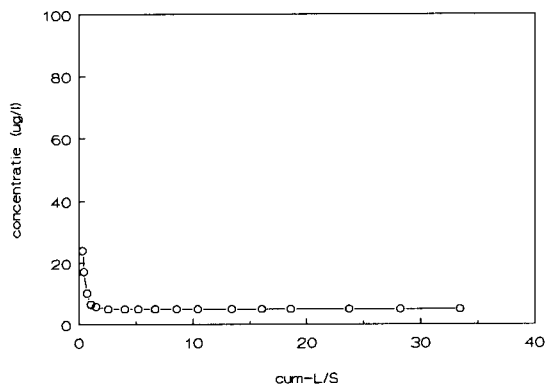
AVI-bodemas (input)



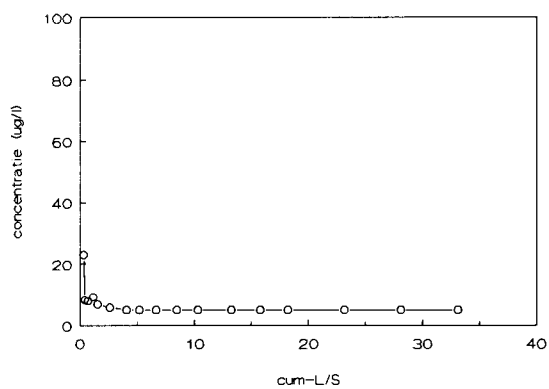
Kleibos



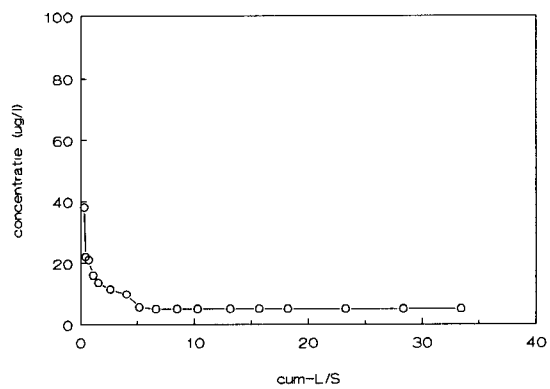
Beverweert



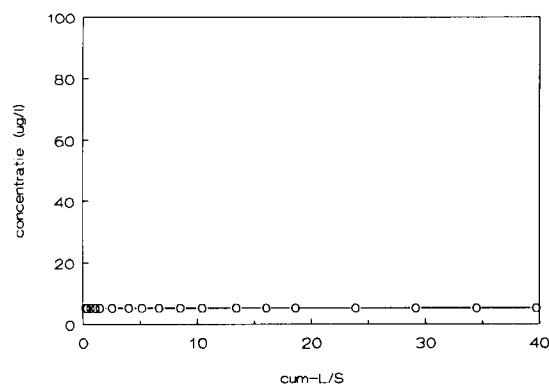
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



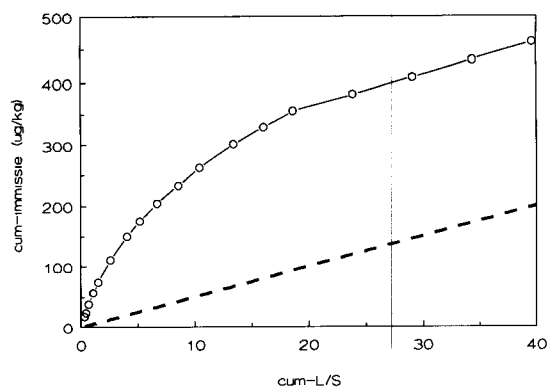
Fochteloerveen



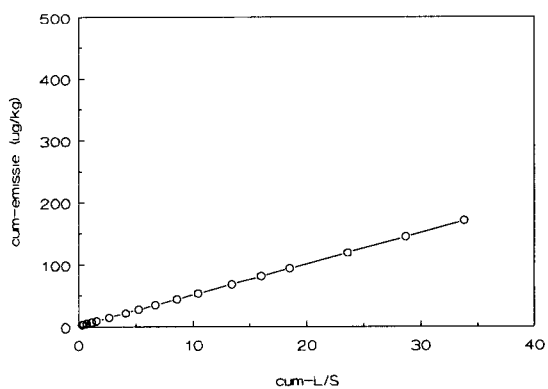
Cumulatieve emissie en immissie koper (ug/kg)

— o — 0.45 um-filter

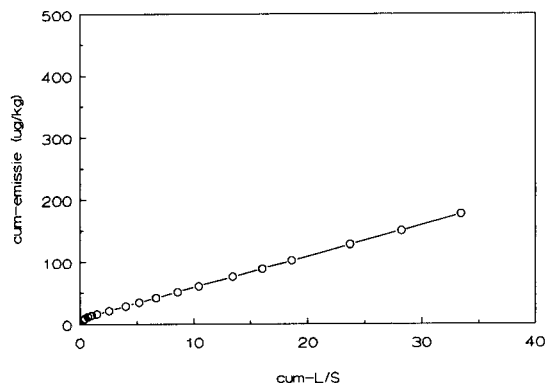
AVI-bodemass (input)



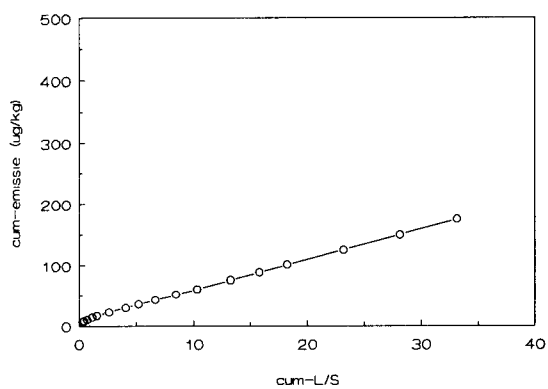
Kleibos



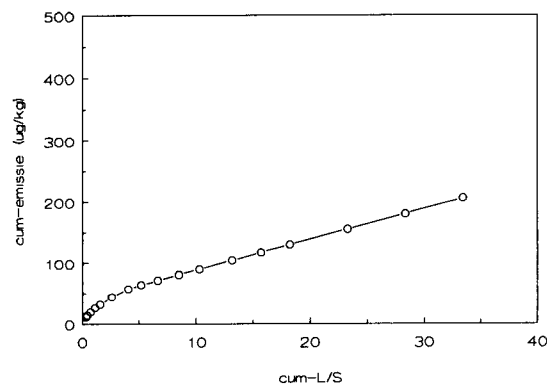
Beverweert



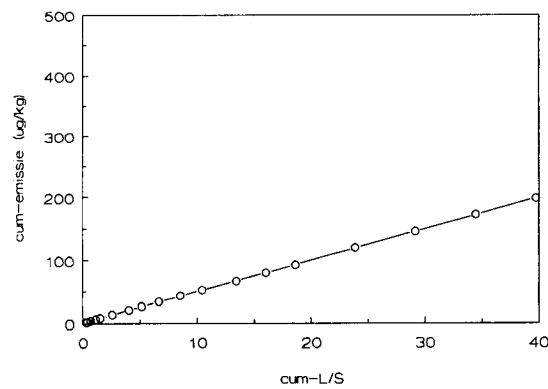
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



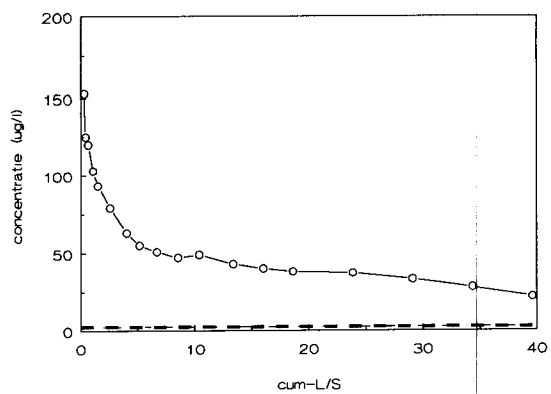
Fochteloerveen



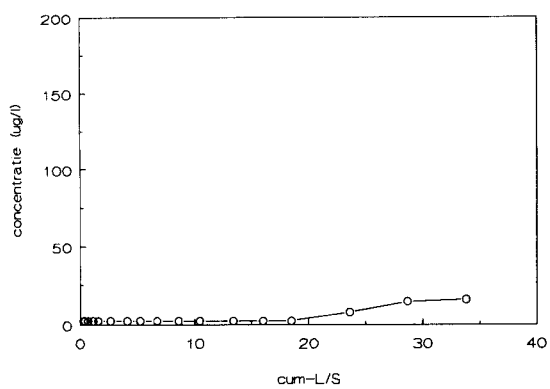
Concentratie molybdeen (ug/l)

— o — 0.45 um-filter

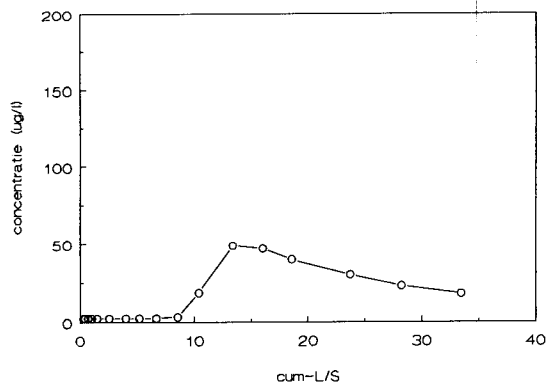
AVI-bodemias (input)



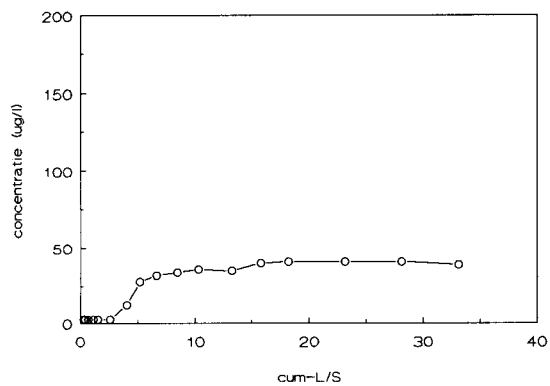
Kleibos



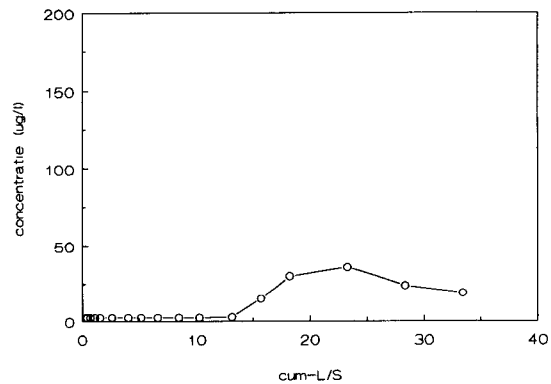
Beverweert



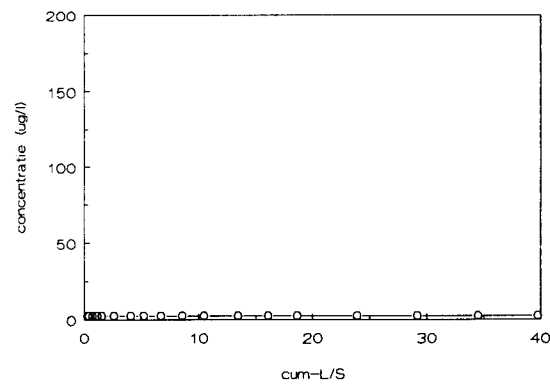
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



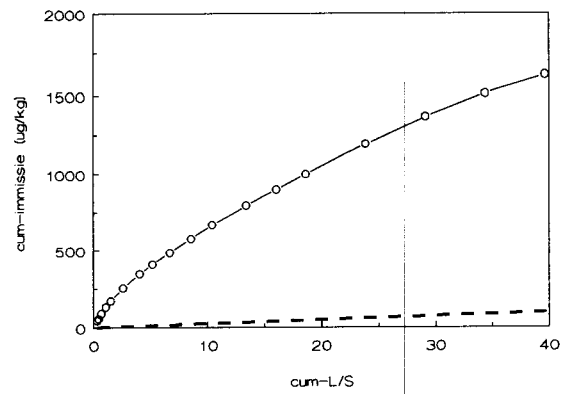
Fochteloeerveen



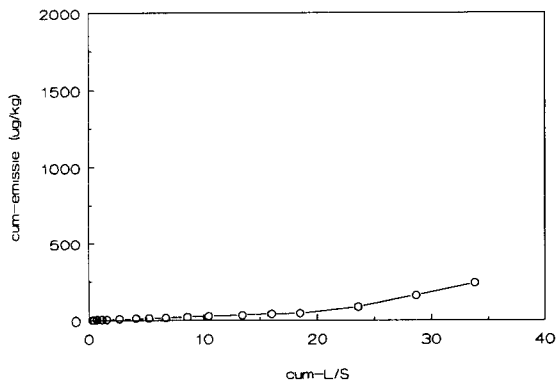
Cumulatieve emissie en immissie molybdeen (ug/kg)

— o — 0.45 um-filter

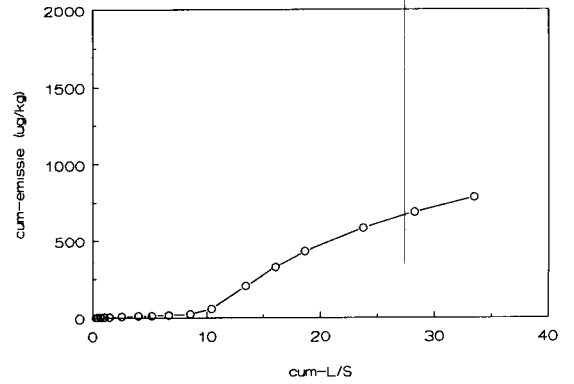
AVI-bodemias (input)



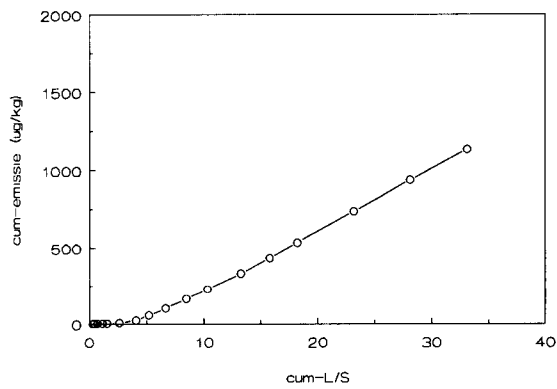
Kleibos



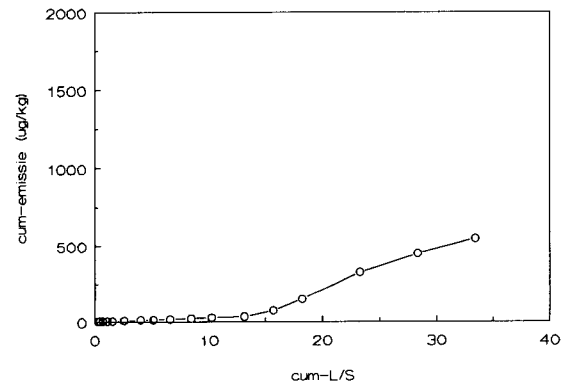
Beverweert



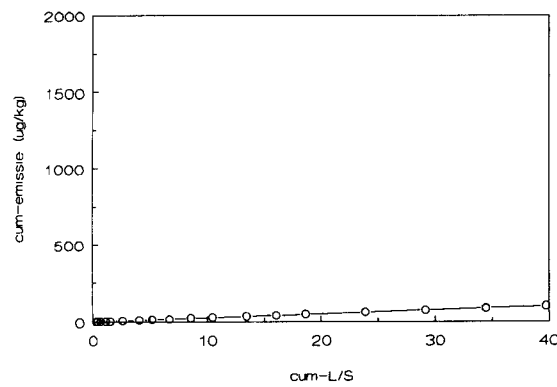
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



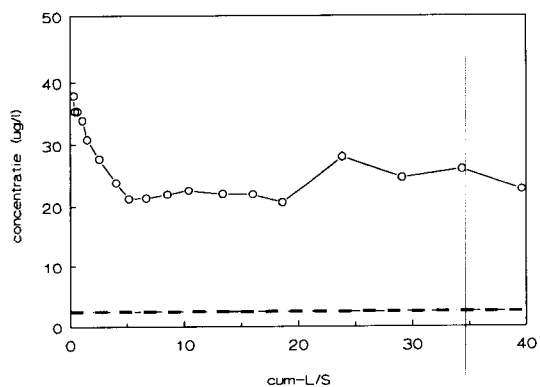
Fochteloeveen



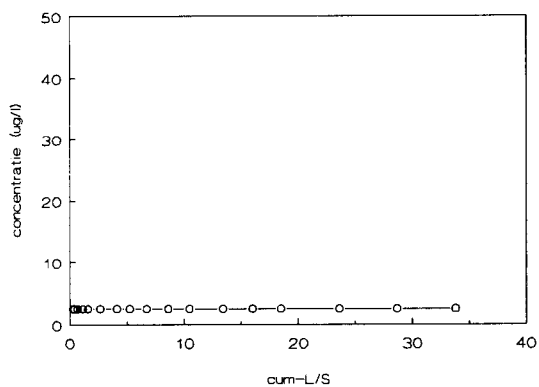
Concentratie antimoon (ug/l)

— o — 0.45 um-filter

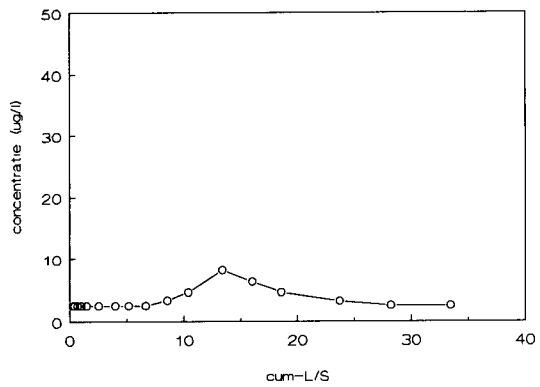
AVI-bodemias (input)



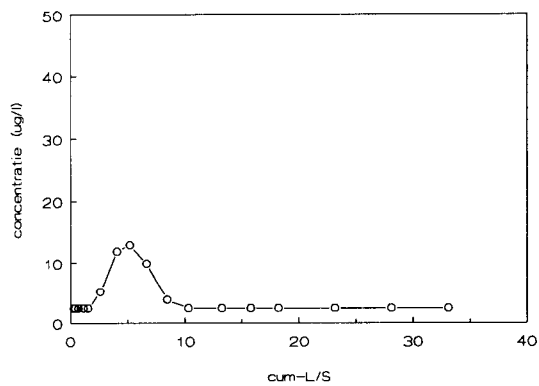
Kleibos



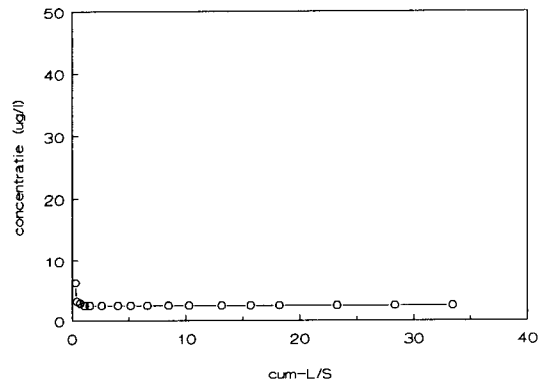
Beverweert



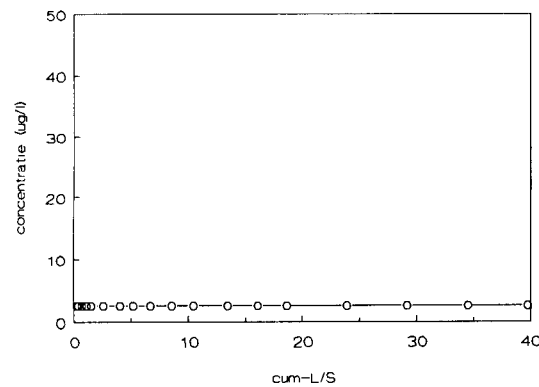
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



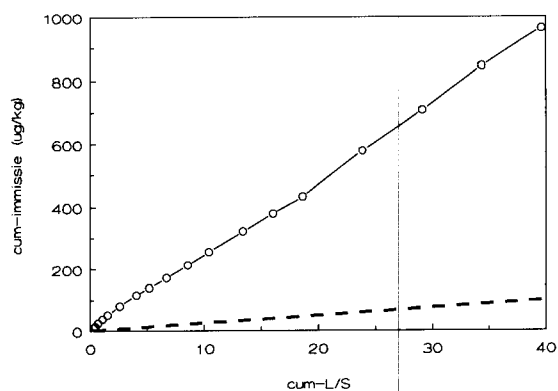
Fochtelooerveen



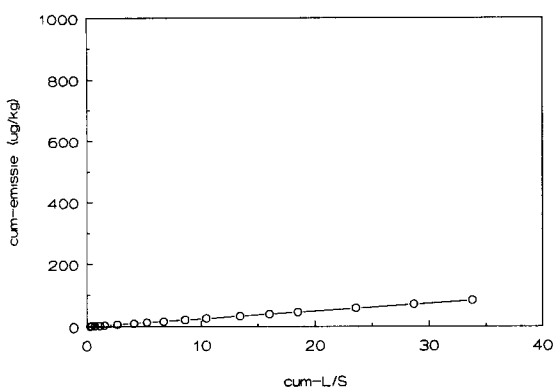
Cumulative emissie en immissie antimoon (ug/kg)

— o — 0.45 um-filter

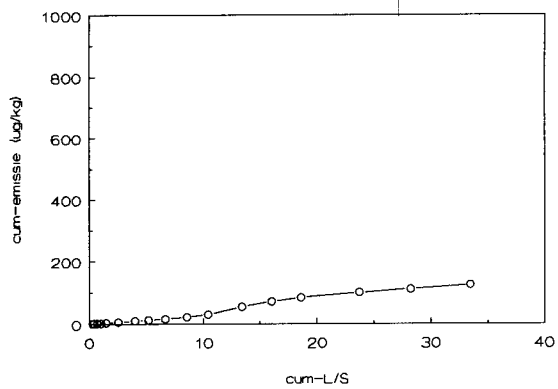
AVI-bodemass (input)



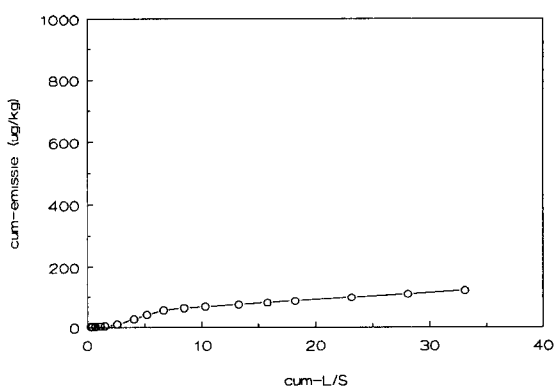
Kleibos



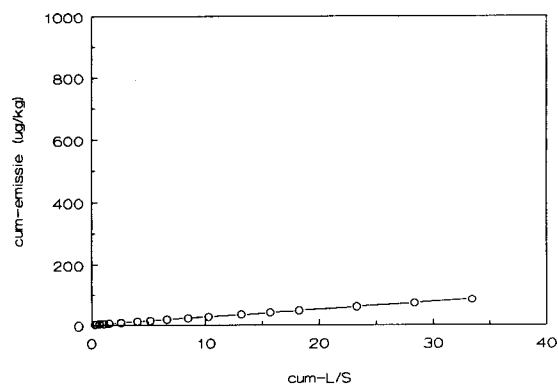
Beverweert



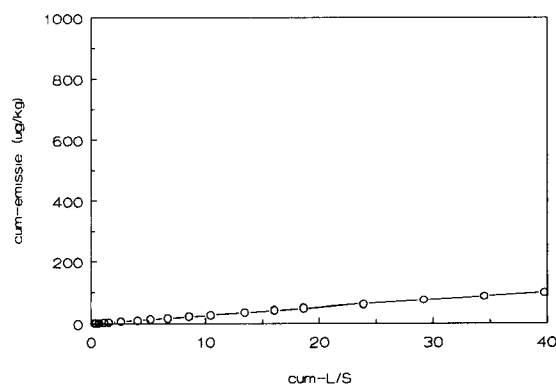
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



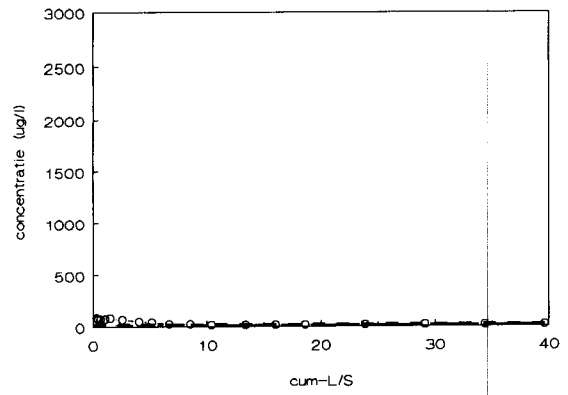
Fochteloerveen



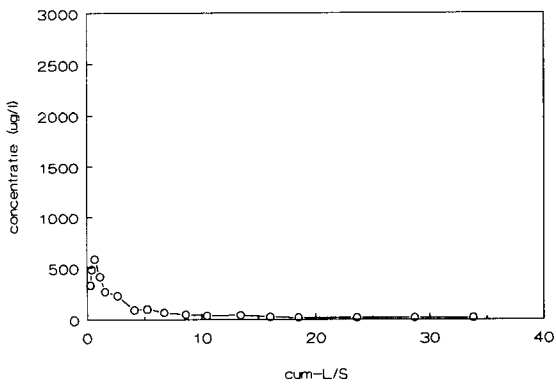
Concentratie zink (ug/l)

— o — 0.45 um-filter

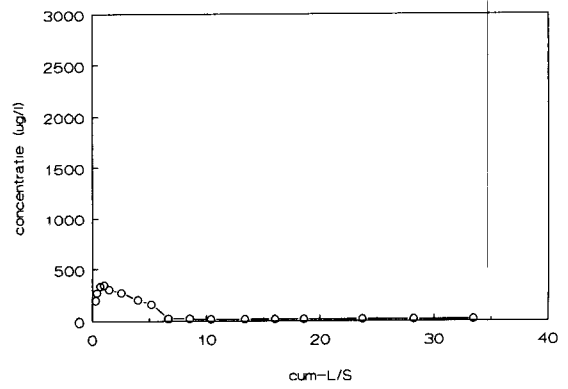
AVI-bodemas (input)



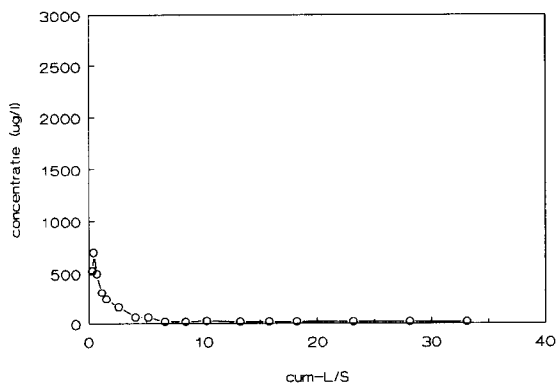
Kleibos



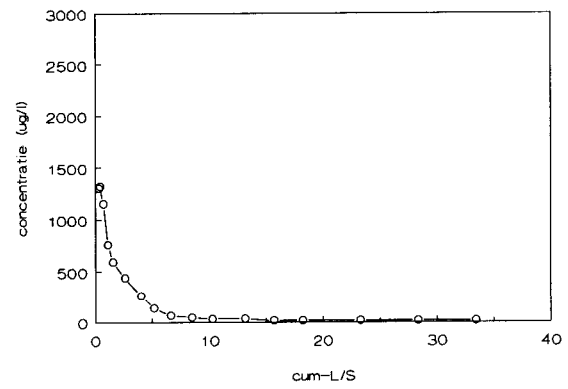
Beverweert



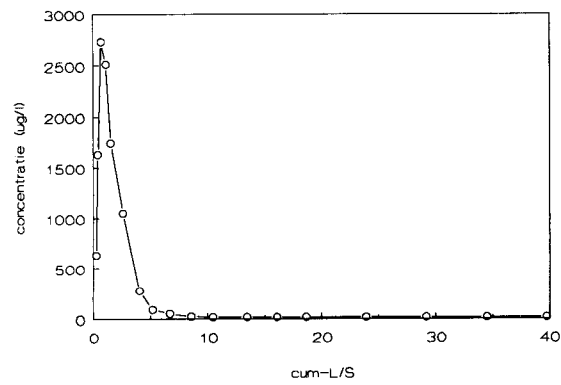
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



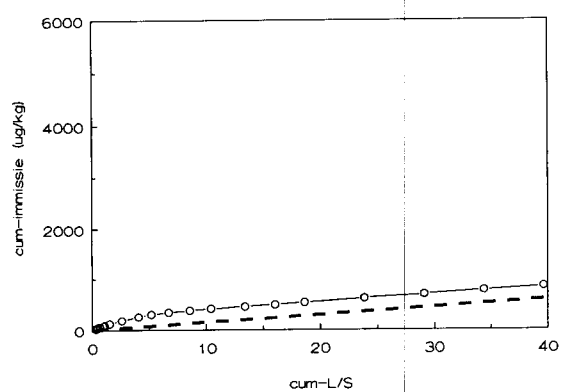
Fochteloerveen



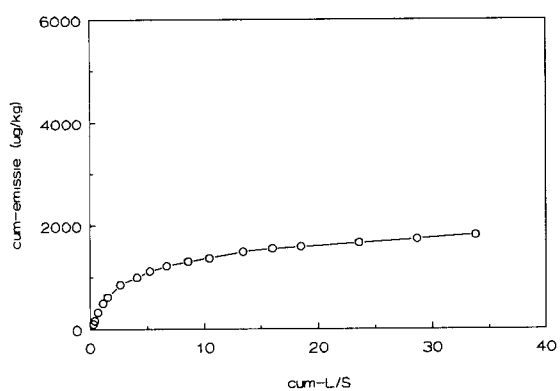
Cumulatieve emissie en immissie
zink (ug/kg)

— o — 0.45 um-filter

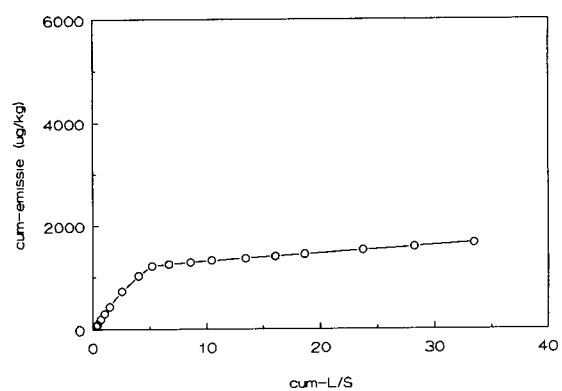
AVI-bodemias (input)



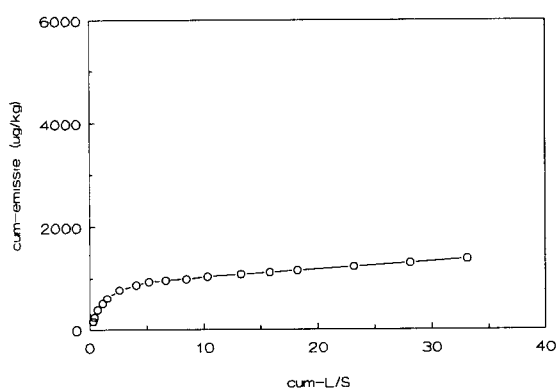
Kleibos



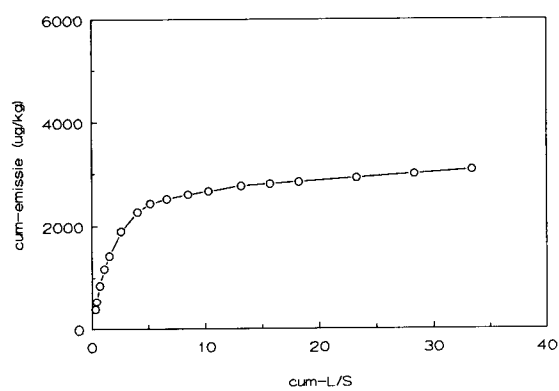
Beverweert



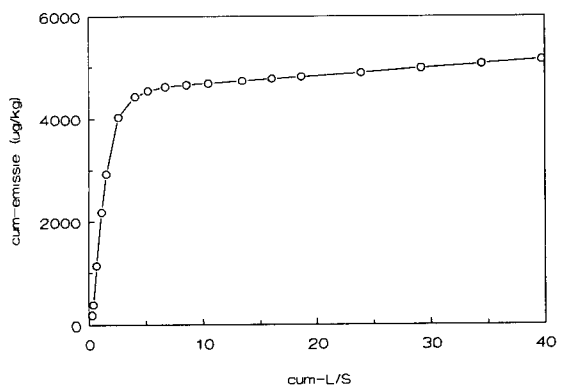
Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



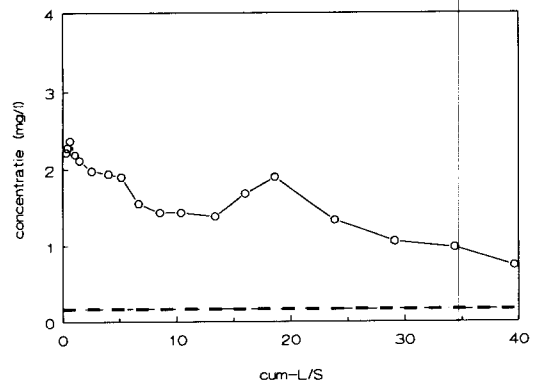
Fochteloeveen



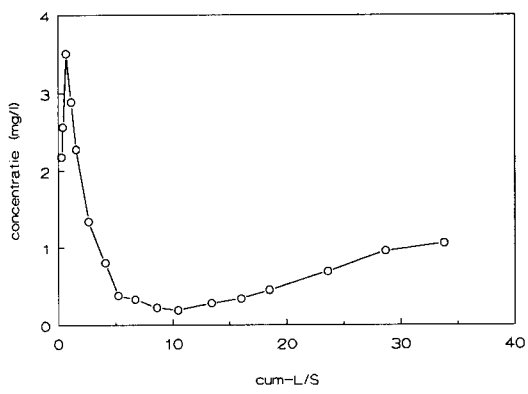
Concentratie fluoride (mg/l)

— o — 0.45 um-filter

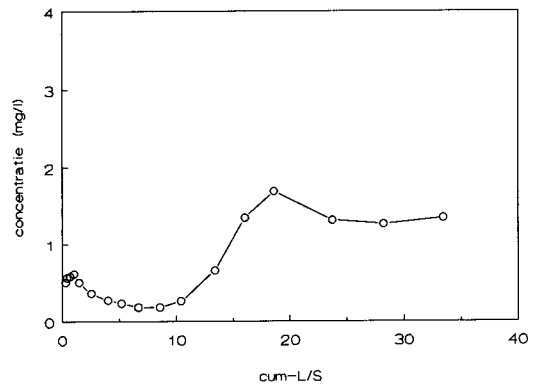
AVI-bodemias (input)



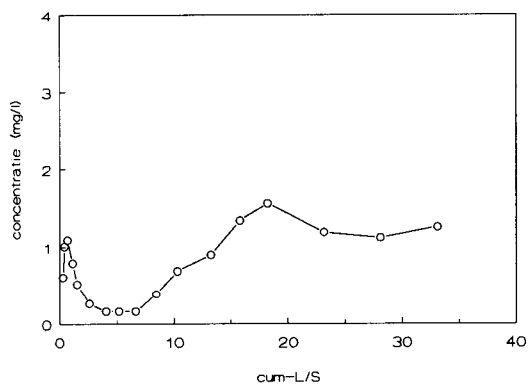
Kleibos



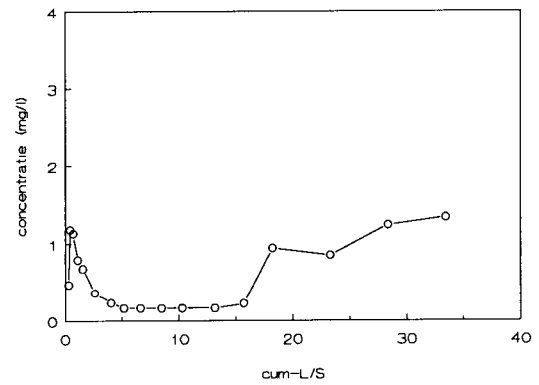
Beverweert



Filosofendal ondergrond



Filosofendal bovengrond



Fochteloerveen

