

SV-005

Noorderbos Tilburg

Bosaanleg op verontreinigde grond

Eindrapportage

drs. B. Muijs (Witteveen+Bos Raadgevende Ingenieurs)
ir. J.E. Groenberg (Alterra)
ir. W. Hendriks (Witteveen+Bos Raadgevende Ingenieurs)
R. Aben (Provincie Noord-Brabant)
A. Verheggen (Gemeente Tilburg Afdeling Milieubeheer)

november 2002

Gouda, SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van SKB.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©Noorderbos Tilburg. Bosaanleg op verontreinigde grond – Eindrapportage", november 2002, SKB, Gouda."

Aansprakelijkheid

SKB en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en SKB sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens SKB en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

Copyrights

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording and/or otherwise, without the prior written permission of SKB.

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©Noorderbos Tilburg. Forestation on contaminated soil", November 2002, SKB, Gouda, The Netherlands."

Liability

SKB and all contributors to this publication have taken every possible care by the preparation of this publication. However, it can not be guaranteed that this publication is complete and/or free of faults. The use of this publication and data from this publication is entirely for the user's own risk and SKB hereby excludes any and all liability for any and all damage which may result from the use of this publication or data from this publication, except insofar as this damage is a result of intentional fault or gross negligence of SKB and/or the contributors.

Titel rapport

Noorderbos Tilburg
Bosaanleg op verontreinigde grond

SKB rapportnummer

SV-005

Fase: Eindrapportage

Project rapportnummer

SV-005

Auteur(s)

drs. B. Muijs
ir. J.E. Groenenberg
ir. W. Hendriks
R. Aben
A. Verheggen

Aantal bladzijden

Rapport: 50
Bijlagen: 17

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Witteveen+Bos Raadgevende Ingenieurs bv. (drs. B. Muijs, ir. W. Hendriks, 0570-697911, 0570-697613)
Alterra (ir. J.E. Groenenberg, 0317-474362)
Provincie Noord-Brabant (R. Aben, 073-6808060)
Gemeente Tilburg (A. Verheggen)

Uitgever

SKB, Gouda

Samenvatting

Het Noorderbos te Tilburg wordt een parkbos op een met zware metalen verontreinigde locatie. Door verzuring zal de mobiliteit van zware metalen toenemen, wat kan leiden tot ecologische risico's. Bekalking gaat dit tegen, maar is op lange termijn niet de meest doelmatige oplossing; door verwerking zal kalk namelijk elke 5 à 10 jaar opnieuw moeten worden toegediend wat niet duurzaam is en praktisch moeilijk uitvoerbaar. In dit project is onderzoek gedaan naar alternatieven voor kalk. Dit heeft geleid tot proeven op praktijkschaal met ijzerstof en zeoliet. Door het uitvoeren van ecologische analyses, zijn de effecten van de aanwezige verontreiniging in het Noorderbos en de toegepaste stoffen bepaald.

In het onderhavige rapport zijn de resultaten van de eerste fase beschreven en worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek waarin de monitoring zal worden gecontinueerd en een verzuringsexperiment wordt voorgestaan.

De gegenereerde kennis zal naar verwachting worden toegepast in het Noorderbos, maar is eveneens geschikt voor andere locaties waarbij sprake is van verzuring door natuurontwikkeling op verontreinigde grond.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

(biologische) beschikbaarheid
ecologische risico's
kalk
ijzer
zware metalen

Vrije trefwoorden:

immobilisatie
natuurontwikkeling
Noorderbos
verzuring
zeoliet

Titel project

Noorderbos Tilburg

Projectleiding

Witteveen+Bos
(ir. W. Hendriks, 0570-697613)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title
Noorderbos Tilburg
Forestation on contaminated soil

SKB report number
SV-005

Phase: Definite

Project report number
SV-005

Author(s)
drs. B. Muijs
ir. J.E. Groenberg
ir. W. Hendriks
R. Aben
A. Verheggen

Number of pages
Report: 50
Appendices: 17

Executive organisation(s) (Consortium)

Witteveen+Bos Raadgevende Ingenieurs bv. (drs. B. Muijs, ir. W. Hendriks, 0570-697911, 0570-697613)
Alterra (ir. J.E. Groenberg, 0317-474362)
Provincie Noord-Brabant (R. Aben, 073-6808060)
Gemeente Tilburg (A. Verheggen)

Publisher

SKB, Gouda

Abstract

The Noorderbos in Tilburg is to be a wooded park on a location that is heavily contaminated with heavy metals. Acidification will increase the mobility of heavy metals, and this may pose a threat to the ecology. Calcification prevents this, but is not the most effective long-term solution. Erosion means that calcium will have to be added every 5 to 10 years. This is not a long-lasting solution and is difficult to implement in practice. This project involved research into alternatives to calcium. The result was the conduction of tests with iron dust and zeolite. Ecological analyses were used to analyse the effects of the contamination present in the Noorderbos and the substances used.

This report describes the results of the first phase and makes recommendations for follow-up research, which will involve ongoing monitoring and an acidification experiment.

It is expected that the knowledge generated will be applied to the Noorderbos, and that it will also be suitable for other locations where acidification takes place in contaminated areas that are to be converted into nature areas.

Keywords

Controlled terms:

(biological) availability
ecological threat
heavy metals
iron
lime

Uncontrolled terms

acidification
convert into nature areas
immobilisation
Noorderbos
zeolite

Project title

Noorderbos Tilburg

Projectmanagement

Witteveen+Bos
(ir. W. Hendriks, 0570-697613)

This report can be obtained by: SKB, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands
Netherlands Centre for Soil Quality Management and Knowledge Transfer (SKB)

VOORWOORD

De aanwezigheid van bodemverontreiniging kan een belemmering zijn voor natuurontwikkeling. Saneren door middel van het verwijderen van de verontreinigde grond is vaak geen gewenste optie: het is erg kostbaar en kan leiden tot aantasting van de reeds aanwezige natuur- en landschapswaarden. De aanwezigheid van bodemverontreiniging hoeft geen direct negatieve invloed op het aanwezige of nog te ontwikkelen ecosysteem te hebben. De risico's van bodemverontreiniging voor ecosystemen en grondwater worden niet alleen bepaald door de mate van verontreiniging, maar ook door de biologische beschikbaarheid en mobiliteit. Deze worden bepaald door de vorm waarin de verontreiniging aanwezig is en omgevingsfactoren.

Door de mobiliteit en biologische beschikbaarheid te beperken, is natuurontwikkeling op dergelijke locaties goed mogelijk.

Het Noorderbos, even ten noorden van Tilburg, wordt een parkbos dat wordt aangelegd op een sterk met zware metalen verontreinigde locatie, namelijk het voormalige vloeiveldencomplex "Zandleij", waar gedurende enkele decennia het industriële en huishoudelijke afvalwater van Tilburg is gezuiverd. De aanwezigheid van bodemverontreiniging vormt hier geen belemmering voor het huidige grondgebruik. Door maatregelen te treffen om de, als gevolg van bebossing, optredende verzuring en daardoor veroorzaakte mobilisatie van de aanwezige zware metalen tegen te gaan, zijn risico's nu en in de toekomst te beperken. De tot nu toe genomen maatregelen bestaan uit een bekalking van het gebied, die heeft plaatsgevonden voor aanplant van het bos. Omdat kalk wordt verbruikt waardoor behandeling regelmatig moet worden herhaald, is dit op lange termijn geen doelmatige oplossing. Voor het Noorderbos is behandeling met een alternatief middel met een lange werkingsduur wenselijk.

Het onderhavige rapport beschrijft de resultaten van de eerste projectfase, waarin enkele alternatieven voor kalk zijn geselecteerd en (ten dele) op pilot-schaal zijn toegepast in het Noorderbos. Eveneens is een start gemaakt met de monitoring van de effecten van bebossing en het toepassen van zuurbufferende of immobiliserende additieven op de beschikbaarheid en toxiciteit van de aanwezige verontreiniging. Bij de monitoring is gebruik gemaakt van een brede selectie aan chemische en ecologische analyses. In vervolgfases zal de monitoring worden gecontinueerd en nader worden toegesneden.

In het project zijn de doelmatigheid en toepasbaarheid van alternatieven voor kalk onderzocht, zodat een oplossing wordt gecreëerd voor het Noorderbos en verontreinigde locaties daarbuiten waarop natuurontwikkeling is gepland of momenteel gaande is. Tevens wordt het juiste monitoringsprogramma bepaald waarmee in de toekomst, in het kader van het bodembeheer, op doeltreffende wijze de ontwikkelingen gevolgd kunnen worden.

Het project is uitgevoerd door een consortium bestaande uit Alterra, Gemeente Tilburg, Provincie Noord-Brabant en Witteveen+Bos. Alterra is als kennisinstituut in het voortraject betrokken geweest bij het onderzoek naar de biologische beschikbaarheid en ecologische risico's van de aanwezige metaalverontreiniging.

Witteveen+Bos heeft als adviesbureau tijdens het voortraject het bodembeheersplan opgesteld, waarin staat beschreven hoe men om dient te gaan met de aanwezigheid van bodemverontreiniging tijdens de aanleg en exploitatie van het Noorderbos. Beide partijen hebben in het hier beschreven project een uitvoerende rol gespeeld bij de bemonstering, aanleg van de proefvelden en de uitvoering van de verschillende analyses. Witteveen+Bos heeft als projectleider en penvoerder opgetreden.

De Gemeente Tilburg is eigenaar van de locatie en in die hoedanigheid verantwoordelijk voor de aanleg van het Noorderbos. De Provincie Noord-Brabant treedt op als bevoegd gezag inzake bodemverontreiniging (tot medio mei 2001) en is daarnaast belanghebbend bij de ruimtelijke inrichting van de provincie. Beide partijen vervullen in dit project de rol van probleemhebber.

Het rapport is tot stand gekomen door een samenwerking van Alterra, Gemeente Tilburg, Provincie Noord-Brabant en Witteveen+Bos. De auteurs bedanken bij deze iedereen die zijn of haar bijdrage heeft geleverd bij de uitvoering van het project.

november 2002

INHOUD

		SAMENVATTING.....	VII
		SUMMARY.....	XIII
		BEGRIPPENLIJST.....	XIX
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Kader	1
	1.2	Probleemstelling	1
	1.3	Doelstelling	2
	1.4	Projectopzet.....	2
	1.5	Leeswijzer	3
Hoofdstuk	2	HET NOORDERBOS	5
	2.1	Historie.....	5
	2.2	Verontreinigingssituatie.....	6
	2.3	Bosontwerp	7
Hoofdstuk	3	VOORSTUDIE EN SELECTIE VAN GESCHIKTE ADDITIEVEN	9
	3.1	Achtergrond	9
	3.1.1	Kalk.....	9
	3.1.2	Olivijn	9
	3.1.3	Beringiet.....	10
	3.1.4	Hoogovencement.....	10
	3.1.5	Zeolieten	12
	3.1.6	Mangaanoxiden	12
	3.1.7	IJzer	12
	3.1.8	Organisch materiaal	12
	3.2	Selectie van geschikte additieven	13
	3.2.1	Zuurbufferende of pH-verhogende additieven.....	13
	3.2.2	Immobiliserende additieven	13
	3.2.3	Geselecteerde additieven	14
Hoofdstuk	4	MATERIAAL EN METHODEN.....	15
	4.1	Inrichting van de proeflocaties en meetpunten.....	15
	4.2	Bemonstering van de proefvelden en meetpunten.....	16
	4.3	Chemisch onderzoek	17
	4.4	Ecologisch onderzoek	18
	4.4.1	Veldinventarisaties	18
	4.4.2	Bioassays.....	19
	4.4.3	Bioaccumulatie in regenwormen	21
	4.5	Literatuurstudie naar doorvergiftiging van zware metalen.....	22
Hoofdstuk	5	RESULTATEN.....	23
	5.1	Chemisch onderzoek	23
	5.1.1	Proeflocaties	23
	5.1.2	Monitoringslocaties	25
	5.2	Ecologisch onderzoek	26
	5.2.1	Veldinventarisaties	26
	5.2.2	Bioassays.....	29

		5.2.3	Bioaccumulatie in regenwormen	31
		5.3	Literatuurstudie doorvergiftiging van zware metalen	33
Hoofdstuk	6		DISCUSSIE	35
		6.1	Beginsituatie	35
		6.1.1	Verontreinigingssituatie.....	35
		6.1.2	Ecotoxicologie.....	35
		6.1.3	Bioaccumulatie.....	36
		6.1.4	Doorvergiftiging.....	36
		6.2	Toegepaste additieven.....	38
		6.2.1	Effecten van de additieven.....	38
		6.2.2	Toepasbaarheid van de additieven	39
		6.2.3	Samenvattend.....	40
		6.3	Geschiktheid monitoringspakket	40
		6.3.1	Chemische analyses.....	40
		6.3.2	Ecologische analyses	41
Hoofdstuk	7		CONCLUSIES	43
Hoofdstuk	8		AANBEVELINGEN	45
			LITERATUUR	47
Bijlage	A		RESULTATEN CHEMISCH ONDERZOEK VOORJAARS- BEMONSTERING	
Bijlage	B		RESULTATEN CHEMISCH ONDERZOEK NAJAARSBEMONSTERING	

SAMENVATTING

Noorderbos Tilburg Bosaanleg op verontreinigde grond

Achtergrond

Vaak vormt de aanwezigheid van bodemverontreiniging een belemmering bij de herinrichting van een locatie tot natuurgebied. Saneren is in de meeste gevallen ongewenst vanwege de hoge kosten en de aantasting van de al aanwezige natuur- en landschapswaarden. Met eenvoudige en goedkope middelen, waarbij de verontreiniging niet wordt verwijderd, kan vaak hetzelfde resultaat worden bereikt. Immers de kansen voor een geslaagde natuurontwikkeling worden niet bepaald door de aanwezigheid van bodemverontreiniging, maar door biologische beschikbaarheid en mobiliteit.

Een voorbeeld is de aanleg van het Noorderbos, een natuur- en (extensief) recreatiegebied dat wordt ontwikkeld op de voormalige vloeivelden van de "Zandleij" ten noorden van Tilburg. Doordat het gebied jarenlang is gebruikt om het afvalwater uit Tilburg te zuiveren alvorens dit te lozen op enkele nabijgelegen riviertjes, is de bovengrond sterk verontreinigd met zware metalen. Met name arseen en chroom komen in hoge concentraties voor, omdat deze metalen veelvuldig in de leerlooierijen in Tilburg werden gebruikt.

Uit onderzoek is gebleken dat de aanwezigheid van bodemverontreiniging geen belemmering vormt voor de ontwikkeling van de flora en fauna in het Noorderbos. De voornaamste probleemstoffen chroom en arseen zijn slecht biologisch beschikbaar en komen voor in hun minst toxische vorm (arsenaat en driewaardig chroom). Verwijdering van de verontreinigde grond zal dan ook niet plaatsvinden. Wel is voor het Noorderbos een bodembeheersplan opgesteld, waarin spelregels zijn opgesteld over de omgang met het verontreinigde bodemmateriaal nu en in de toekomst. Daarnaast is in het bosontwerp rekening gehouden met de aanwezigheid van bodemverontreiniging. Zo zijn er geen gevoelige soorten aangeplant en wordt voorkomen dat de bezoekers van het bos de sterk verontreinigde zones kunnen betreden.

Probleemstelling

Bebossing zal leiden tot verzuring van de bodem, waarbij naar verwachting de zuurgraad over enkele decennia met enkele eenheden zal dalen (naar verwachting tot pH 4). Ten gevolge van de verzuring zal de aanwezige metaalverontreiniging mobiel worden en daardoor makkelijk biologisch beschikbaar zijn. Om ecologische effecten te voorkomen is de bosbodem, voorafgaand aan de eerste aanplant, bekalkt om de zuurgraad van de bodem te bufferen op de huidige waarde (pH 6). Een nadeel van kalk is de relatief korte werkingsduur. Na 5 à 10 jaar dient de behandeling herhaald te worden. Hierdoor is kalk geen duurzame methode om op lange termijn de negatieve effecten van verzuring tegen te gaan. Voor het Noorderbos bestaat daarom behoefte aan een alternatief voor kalk.

Daarnaast is, mede in het kader van het vigerende bodembeheersplan, een monitoringsprogramma van belang voor het vaststellen van de effecten van de bosaanplant op mobiliteit en schadelijke effecten die op kunnen treden ten gevolge van toegenomen mobiliteit. Dit monitoringsprogramma dient tijdig eventuele negatieve effecten te signaleren, zodat op tijd passende maatregelen kunnen worden genomen.

Doelstelling en projectopzet

Met het project wordt beoogd kennis en ervaring op te doen met het toepassen van enkele additieven en verschillende monitoringsinstrumenten.

Concreet moet het project leiden tot advisering met betrekking tot:

- een geschikt alternatief voor kalk;
- de toepassing van dit alternatief (dosering, werkwijze, kosten e.d.);
- de ontwikkeling van een instrumentarium om de verontreinigingssituatie in het Noorderbos chemisch en ecologisch te monitoren.

Het project wordt gekenmerkt door een gefaseerde uitvoering. Fase A van het project heeft bestaan uit een voorstudie en selectie van geschikte additieven en een veldonderzoek waarin de geselecteerde additieven zijn toegepast en gemonitord. Het veldonderzoek tijdens fase A heeft bestaan uit:

- inrichting van de proefvelden;
- uitvoering van twee meetronden, de eerste direct na de bosaanplant (t_0) en de tweede circa een half jaar later ($t_{1/2}$) (respectievelijk voor- en najaarsbemonstering);
- beknopte literatuurstudie naar risico's op doorvergiftiging en effecten voor organismen hoger in de voedselketen.

Tijdens de voorziene vervolgfases zal de monitoring worden gecontinueerd en worden aangepast indien de resultaten van fase A daartoe de aanleiding geven. Na verwachting zal na circa 5 jaar voldoende informatie zijn verzameld om een antwoord te geven op de onderzoeksvragen.

De met het project gegenereerde kennis is ook buiten het Noorderbos toepasbaar. In Nederland en daarbuiten zijn vergelijkbare situaties bekend. De gegenereerde kennis zal toepasbaar zijn op locaties waar sprake is van verzuring, duurzame natuurontwikkeling is gepland of gaande is en waar om andere redenen het verwijderen van het verontreinigde bodemmateriaal ongewenst is. Een voorbeeld hiervan is de diffuse verontreiniging met zware metalen in de Kempen met een omvang van circa 3.000 km².

Voorstudie

De voorstudie had als doelstelling de selectie van enkele geschikte additieven voor toepassing in het veldexperiment. Aan de hand van een literatuurstudie, modelberekeningen en een laboratoriumexperiment zijn kalk, ijzerstof en zeoliet geselecteerd als geschikte additieven voor nader onderzoek tijdens de veldstudies. De geselecteerde additieven zijn eenvoudig verkrijgbaar en zijn geschikt om de negatieve effecten van verzuring te voorkomen. Kalk zal dit doen door de zuurgraad van de bodem te bufferen, terwijl ijzer en zeoliet de (biologische) beschikbaarheid van zware metalen verlagen. Kalk is eveneens geselecteerd omdat dit materiaal reeds wordt toegepast in het Noorderbos en omdat andere pH-buffers (olivijn, hoogovencement en dergelijke) over onvoldoende buffercapaciteit beschikken en/of kunnen leiden tot ongewenste bijwerkingen (omzetting van chroom(III) in het zeer toxische chroom(VI)).

Uitgevoerde werkzaamheden

Op twee proeflocaties, die verspreid in het Noorderbos in niet bekalkte zones liggen, zijn een drietal proefvelden aangelegd op sterk, matig en licht verontreinigde grond. De proefvelden zijn vervolgens onderverdeeld in een viertal proefvakken waarop de verschillende oppervlaktebehandelingen zijn uitgevoerd. Drie proefvakken zijn behandeld met respectievelijk ijzerstof, zeoliet en kalk. Het vierde proefvak is niet behandeld en gebruikt als referentie voor de toegepaste oppervlaktebehandelingen. De oppervlaktebehandelingen zijn niet toegepast op het minst verontreinigde proefveld vanwege de lage concentraties aan zware metalen.

Op elk proefveld is een peilbuis geplaatst in het freatische grondwater. In elk proefvak zijn op twee dieptes (20-40 en 40-80 cm-mv) poriewatercups geplaatst voor verzameling en bemonstering van bodemvocht.

Tijdens fase A zijn twee monitoringsronden uitgevoerd. De eerste heeft plaatsgevonden direct na de aanplant van het bos, de tweede circa een half jaar na de aanleg van de proefvelden.

Tijdens de monitoringsronden zijn een groot aantal chemische- en ecologische analyses uitgevoerd:

- zware metalen, anionen en macronutriënten, zowel in bodem (totaal en potentieel beschikbare fracties), in het porie- als in het grondwater;
- fysisch-chemische parameters zoals zuurgraad en organisch stof;
- veldinventarisaties (biomassa en groeisnelheid bacteriën, Bait-Lamina test en functionele groepen nematoden);
- bioassays (regenworm *Lumbricus rubellus*, springstaart *Folsomia candida*, Microtox-test);
- bioaccumulatie van zware metalen in regenwormen uit het Noorderbos.

Tevens is een literatuurstudie uitgevoerd waarbij de resultaten van het bioaccumulatie-onderzoek zijn vergeleken met bioaccumulatie-onderzoek op onbelaste locaties. Op basis van deze literatuurstudie is een inschatting gemaakt van risico's voor hogere organismen die via de voedselketen worden blootgesteld aan de aanwezige verontreiniging met zware metalen.

Resultaten

Uit de analyses van de bodemmonsters afkomstig van de meetpunten is gebleken dat in de bovenste 40 cm hoge concentraties potentieel beschikbaar arseen voorkomen. De hoogste concentraties worden gemeten nabij de aanvoersloten. De concentraties in het bodemvocht worden niet beïnvloed door de ligging. Wel is er een duidelijke relatie zichtbaar tussen de zuurgraad en de concentraties zware metalen in het bodemvocht.

De resultaten van zowel de voor- als najaarsbemonstering staan samengevat in tabel S1.

Op grond van de analyses van zware metalen en enkele macronutriënten (zwavel en fosfor) is, met name op proeflocatie 1, een duidelijke gradiënt zichtbaar die afneemt bij toenemende afstand tot de aanvoersloot. Dit is te zien in zowel de voor- als najaarsbemonstering. Nabij de aanvoersloot zijn chroomconcentraties tot 3.800 mg kg^{-1} gemeten. De potentiële beschikbaarheid van chroom, bepaald middels een extractie met salpeterzuur, is laag ($\pm 10\%$). Cadmium en zink zijn daarentegen beter potentieel beschikbaar ($\pm 90\%$). De concentraties in de grond en bodemvocht in diepere bodemlagen (40-80 cm) zijn lager dan in de bovengrond.

Tijdens de voorjaarsbemonstering is op het meest verontreinigde proefveld sprake van een verminderde groei van regenwormen en een lager aantal nematoden. Tevens is in het bodemvocht een negatieve reactie met de Microtox-test gemeten, maar dit effect kan volgens de geldende criteria als niet-toxisch worden geclassificeerd. Biomassa en groei van bacteriën zijn op de meest verontreinigde proefvelden hoger. Dit lijkt echter een gevolg te zijn van een hoger gehalte aan organische stof.

Uit de metingen blijkt dat de behandeling met *ijzerstof* leidt tot een verlaging van de concentraties aan zware metalen (met name chroom), arseen en fosfaat in het bodemvocht ten opzichte van het onbehandelde proefvak. *Zeoliet* leidt alleen tot een verlaging van tweewaardige metaalionen zoals cadmium en zink en bij de *kalkbehandeling* zijn geen effecten waarneembaar.

Ten gevolge van de afgenomen gehalten aan metalen in het bodemvocht is bij de Microtox-test geen effect zichtbaar bij de met ijzer en zeoliet behandelde proefvakken. In de overige proefvakken wordt wel een effect gemeten. Dit lichte effect is vergelijkbaar met de resultaten uit de eerste meetronde (opname beginsituatie) en kan niet worden geclassificeerd als toxisch. De overige uitgevoerde ecologische analyses laten geen effecten zien, met uitzondering van de regenwor-

mentest die op het meest verontreinigde proefveld (ijzerbehandeling) is geremd en de Bait-Lamina test die bij de zeolietbehandeling wordt gestimuleerd.

Uit het bioaccumulatie-onderzoek is gebleken dat toenemende concentraties aan zware metalen in de bodem leiden tot toenemende concentraties aan zware metalen in regenwormen. De uitgevoerde oppervlaktebehandelingen blijken geen effect op de interne concentraties van regenwormen te hebben.

Tabel S1. Samenvatting chemisch- en ecologisch onderzoek.

analyse	t ₀	t _½				opmerkingen
		blanco	effect t.o.v. blanco			
			ijzer	zeoliet	kalk	
<i>metalen</i>						
totaal	•	•	*	*	*	gradiënt zichtbaar voor alle metalen
potentieel	•	•	0	0	0	gradiënt zichtbaar voor alle metalen
poriewater	•	•	+	+	0	
<i>overige elementen</i>						
totaal	•	•	*	*	*	duidelijk gradiënt P en S
potentieel	•	•	+	+	0	Fe, Na en K verhoogd door behandeling
poriewater	•	•	+	+	0	Al, Fe, Na en K verhoogd door behandeling
						Na en K verhoogd door behandeling
						P verlaagd door vermindering uitspoeling
<i>veldinventarisaties</i>						
biomassa bacteriën	•	•	0	0	-	effect op blanco door organisch materiaal
groeisnelheid bacteriën	•	•	0	0	+	effect op blanco door organisch materiaal
Bait-Lamina test	×	×	0	+	0	
nematoden	•	•	0	0	0	
<i>bioassays</i>						
regenwormen groei	•	•	+/-	+	0	effect afhankelijk van proefveld
regenwormen reproductie	×	×	+/-	+	0	effect afhankelijk van proefveld
springstaarten test	×	×	0	0	0	effect zichtbaar, niet significant
Microtox-test	•	•	+	+	0	
<i>Bioaccumulatie</i>						
regenwormen	n.b.	•	0	0	0	

- gradiënt zichtbaar met analyse
 - ×
 - ×
 - +
 -
 - 0
 - *
 - n.b.
- gradiënt niet zichtbaar met analyse
verlaging toxiciteit ten opzichte van onbehandeld proefvak (positief effect)
verhoging toxiciteit ten opzichte van onbehandeld proefvak (negatief effect)
geen effect ten opzichte van onbehandeld proefvak
de toegepaste behandelingen zullen geen effect hebben op de geanalyseerde parameters, maar geven bruikbare informatie.
niet bepaald

Doorvergiftiging zware metalen

De gemeten interne concentraties zijn vergeleken met waarden die in regenwormen zijn gemeten op onbelaste locaties. De concentraties aan arseen, cadmium, lood en zink in regenwormen uit het Noorderbos komen hiermee overeen. De concentraties aan koper en nikkel in regenwormen afkomstig van het meest verontreinigde proefveld liggen hier over het algemeen boven. Voor chroom geldt dit ook voor regenwormen afkomstig van het minst verontreinigde proefveld.

Tevens zijn de gemeten concentraties vergeleken met de uitkomsten van studies waarop niet belaste locaties de interne concentraties in zowel regenwormen als mollen en muizen, die zich voeden met regenwormen, zijn bepaald. Voor cadmium, zink en lood zullen naar verwachting de concentraties in mollen en muizen uit het Noorderbos vergelijkbaar zijn met mollen en muizen op onbelaste locaties. In mollen uit de meest verontreinigde zones worden verhoogde concentraties aan koper en voor muizen aan chroom, nikkel en koper verwacht. Op basis van bekende concentratieverhoudingen tussen regenwormen en mollen, worden in mollen geen concentraties aan arseen en chroom verwacht boven de LD₅₀-waarde.

Conclusies

Bij de opname van de beginsituatie zijn met de ecologische analyses, op een negatief effect op de groei van regenwormen op het meest verontreinigde proefveld na, geen negatieve effecten gemeten. De resultaten van voorgaande bodemonderzoeken in het Noorderbos zijn hiermee bevestigd. Doordat er geen toxische effecten zijn gemeten, kunnen met het gebruikte analysepakket eventuele negatieve effecten van verzuring en de effecten van de toegepaste additieven aangetoond worden.

Doorgifte van de aanwezige verontreiniging naar hogere organismen via de voedselketen kan voor het Noorderbos niet worden aangetoond. Op basis van vergelijking van de interne concentraties aan zware metalen in regenwormen met bekende literatuurgegevens waarin relaties tussen concentraties in regenwormen, mollen en muizen onderzocht zijn, zijn risico's voor hogere organismen niet te verwachten.

IJzer en zeoliet lijken geschikte alternatieven voor kalk te zijn om negatieve effecten van verzuring in het Noorderbos te voorkomen. Beide stoffen verlagen de beschikbaarheid van zware metalen. De gehalten in het bodemvocht zijn duidelijk lager dan op het met kalk behandelde en onbehandelde proefveld. Hierdoor worden geen effecten meer gemeten bij de Microtox-test. Bovendien zijn beide stoffen zelf niet toxisch, eenvoudig toe te dienen en relatief goedkoop. Klont- en stofvorming tijdens toedienen zijn echter wel belangrijke aandachtspunten, alsmede de (maatschappelijke) acceptatie van de behandelingen. De effecten op lange termijn en de effecten bij verzuring van de bodem zijn daarentegen niet inzichtelijk geworden vanwege de geringe projectduur.

Met de beschikbare resultaten kan nog geen definitief monitoringsprogramma worden opgesteld om de effecten van de aanleg van het Noorderbos en de effecten van de toegepaste additieven inzichtelijk te maken. Dit geldt vooral voor de ecologische analyses. Alle uitgevoerde ecologische analyses, met uitzondering van de Bait-Lamina test, geven additionele informatie met betrekking tot de effecten van de aanwezige bodemverontreiniging.

Aanbevelingen

Verzuring van de bodem is een langzaam proces en is niet opgetreden tijdens het project. De effecten van de toegepaste additieven om de negatieve effecten van verzuring tegen te gaan, zijn daarom niet proefondervindelijk vast te leggen. Daarom verdient het aanbeveling om tijdens de voorgenomen vervolgfases de bodem te verzuren tot een pH van circa 4. Zwavel is een geschikt middel om de bodem kunstmatig te verzuren, omdat daarmee geen additionele zouten aan de bodem worden toegevoegd.

De gebruikte doseringen voor ijzerstof en zeoliet zijn hoog, zodat voor een grootschalige toepassing grote hoeveelheden nodig zijn. Het is daarom aanbevelingswaardig om ervaring op te doen met lagere doseringen middels veld- of laboratoriumproeven.

Voor eventuele vervolfasen wordt geadviseerd de onderzoeksactiviteiten toe te spitsen op proeflocatie I. Proeflocatie II is door het onduidelijk gradiënt minder geschikt als proeflocatie. Tijdens vervolfasen kunnen tevens de opname van zware metalen door bomen worden gemonitord. Dit is tijdens dit project niet mogelijk gebleken, omdat de bodem te klein was voor het verzamelen van voldoende monstermateriaal.

SUMMARY

Noorderbos Tilburg Forestation on contaminated soil

Background

Contaminated soil frequently hinders the conversion of sites into nature areas. In most cases, decontamination is not desirable due to the high costs and the damage caused to the nature and landscaping already present. The same result can be achieved with simple and inexpensive means that do not remove the contamination. After all, the chances of the successful development of a nature area are not determined by the presence of soil contamination, but by biological availability and mobility.

An example is the creation of the Noorderbos, an extensive nature and recreation area that is being developed on the former waste water zones of the "Zandleij" to the north of Tilburg. The fact that the area was used for many years as a purification site for wastewater from Tilburg prior to being discharged into several nearby rivers means that the soil near the surface is highly contaminated with heavy metals. There are particularly high concentrations of arsenic and chrome because these metals are commonly used in the tanneries located in Tilburg.

Research has revealed that the presence of soil contamination will not hinder the development of flora and fauna in the Noorderbos. The primary problem substances (chrome and arsenic) have poor biological availability and occur in their least toxic form (arsenate and trivalent chrome). Removal of the contaminated soil will therefore not take place. However, a soil management plan with the rules and regulations regarding the handling of contaminated soil now and in the future has been drawn up for the Noorderbos. The design of the forest also takes account of the presence of contaminants in the soil. No sensitive varieties have been planted and visitors to the forest are prevented from walking on heavily contaminated zones.

The problem

Forestation will lead to acidification of the soil. The expectation is that the acidity will decrease by several units (the expectation is to pH 4) over period of several decades. This acidification will make the metal contamination present mobile and therefore increase its biological availability. To prevent ecological effects, calcium was spread on the forest floor prior to the first planting in order to create a buffer for the present value (pH 6). A disadvantage of calcium is its relatively short period of operation. The treatment must be repeated after 5 to 10 years. This makes calcium unsuitable as a long-term method of combating the negative effects of acidification. The Noorderbos therefore requires an alternative to calcium.

In addition, a monitoring programme to ascertain the effects of forestation on mobility and the damaging effects that may occur as a result of increased mobility is important in the framework of the current soil management plan. This monitoring programme must be able to detect any negative effects at an early stage in order to allow suitable measures to be taken.

Aim and set-up of the project

The project was intended to acquire knowledge and experience with the application of several additives and monitoring tools.

In concrete terms, the project must lead to recommendations relating to:

- a suitable alternative to calcium;
- the application of this alternative (dosing, work method, costs, etc.);
- the development of a set of tools to monitor the chemical and ecological contamination situation in the Noorderbos.

The project was implemented in phases. Phase A of the project consisted of a preliminary study and selection of suitable additives and a field study in which the selected additives were applied and monitored. The field study in phase A consisted of:

- setting up the test beds;
- carrying out two rounds of measurement, the first immediately after planting the forest (t_0), and the second approximately six months later ($t_{1/2}$) (spring and autumn sampling);
- brief literature study of the risks of collateral poisoning and the effects on organisms higher in the food chain.

During the foreseen follow-up phases, the monitoring will be continued and adjusted on the basis of the results of phase A. The expectation is that sufficient information will have been gathered to provide answers to the research questions after a period of 5 years.

The knowledge generated in the project is also applicable outside the Noorderbos. There are comparable situations elsewhere in and outside the Netherlands. The knowledge generated will be applicable at locations subject to acidification, where long-term development of nature areas is planned or underway and where the removal of contaminated soil is undesirable for other reasons. An example is the diffuse contamination with heavy metals in de Kempen, with an area of approximately 3,000 km².

Preliminary study

The aim of the preliminary study was to select several additives for use in the field experiment. Calcium, iron dust and zeolite were selected as suitable additives for further study during the field tests on the basis of literature research, model calculations and a laboratory experiment. The additives selected are easily available and are suitable to prevent the negative effects of acidification. Calcium will achieve this by forming a buffer for the acidity of the soil, while iron and zeolite reduce the (biological) availability of heavy metals. Calcium was also selected because this material is already used in the Noorderbos and because other pH buffers (olivine, blast furnace slag cement and the like) have insufficient buffer capacity and/or may lead to undesired side-effects (conversion of chrome (III) into the extremely toxic chrome (VI)).

Work carried out

Three test beds were created on highly, moderately and slightly contaminated ground at two test locations situated in areas of the Noorderbos that had not been treated with calcium. The test beds were then divided into four test sections in which the various surface treatments were carried out. Three test sections were treated with iron dust, zeolite and calcium respectively. The fourth test section was not treated and was used as a reference section for the surface treatments applied. The surface treatments were not applied to the least contaminated test bed because of the low concentrations of heavy metals.

A measuring tube was placed in the phreatic groundwater at every test bed. Perforated water cups were placed at two depths (20-40 and 40-80 cm below ground level) at each test section in order to sample and test the moisture in the soil.

Two rounds of monitoring were carried out during phase A. The first took place immediately after the forest was planted, and the second took place approximately six months after the construc-

tion of the test beds. A great number of chemical and ecological analyses were carried out during the measurement rounds:

- heavy metals, anions and macronutrients, both in the soil (total and potentially available fractions), in the perforation and groundwater;
- physio-chemical parameters such as the acidity and organic material;
- field inventories (biomass and growth speed of bacteria, Bait-Lamina test and functional groups of nematodes);
- bioassays (earthworm *Lumbricus rubellus*, springtail *Folsomia candida*, Microtox-test);
- bio-accumulation of heavy metals in earthworms in the Noorderbos.

In addition, a literature study was carried out in which the results of bio-accumulation research were compared with bio-accumulation research at locations without any load. This literature study formed the basis of an estimate of the threats to higher organisms that are exposed to heavy metal contaminants via the food chain.

Results

Analyses of the soil samples from the measuring points revealed that concentrations of potentially available arsenic occur in the top 40 cm. The highest concentrations were measured near the supply ditches. Concentrations in the soil moisture are not affected by location. However, there is a clear relationship between the acidity and the concentrations of heavy metals in soil moisture.

The results of both the spring and autumn sampling are summarised in table S1.

The analyses of heavy metals and several macronutrients (sulphur and phosphor) revealed (particularly at test bed 1) a gradient that clearly decreases as the distance from the supply ditch increases. This is shown in both the spring and autumn samples. Chrome concentrations up to 3800 mg kg⁻¹ have been measured near the supply ditch. The potential availability of chrome, determined by means of extraction with nitric acid, is low ($\pm 10\%$). In contrast, cadmium and zinc have better potential availability ($\pm 90\%$). The concentrations in the soil and soil moisture in the deeper layers (40-80 cm) are lower than in the upper layers.

During the spring sampling, a reduced growth rate in earthworms and a lower number of nematodes was revealed in the most contaminated test bed. In addition, the soil moisture produced a negative reaction when subjected to the Microtox test. However, this effect can be classified as non-toxic on the basis of the applicable criteria. Biomass was greater and the growth of bacteria was increased in the most contaminated test beds. However, this seems to be the consequence of an increased quantity of organic material.

The measurements revealed that treatment with *iron dust* leads to a decrease in the concentrations of heavy metals (particularly chrome), arsenic and phosphate in soil moisture in comparison with the untreated test section. *Zeolite* only leads to a reduction of bivalent metal ions such as cadmium and zinc, and treatment with *calcium* did not produce any noticeable effects.

The consequence of the reduced levels of metals in the soil moisture was that the Microtox test did not reveal any visible effect in the test sections treated with iron and zeolite. Effects were detected in the other test sections. This slight effect is comparable with the results from the first round of measurements (absorption in the initial situation) and can not be classified as toxic. The other ecological analyses conducted did not reveal any effects, with the exception of the earthworm test, which was inhibited in the most contaminated test bed (iron treatment), and the Bait-Lamina test, which is stimulated during treatment with zeolite.

The bio-accumulation study revealed that increasing concentrations of heavy metals in the soil leads to increasing concentrations of heavy metals in earthworms. Apparently, the surface treatments applied do not have any effect on the internal concentrations in earthworms.

Table S1. Summary of chemical and ecological research.

analysis	t ₀	blank	t _{1/2}			comments
			effect in relation to blank			
			iron	zeolite	calcium	
<i>metals</i>						
Total	•	•	*	*	*	Gradient visible for all metals
Potential	•	•	0	0	0	Gradient visible for all metals
Perforation water	•	•	+	+	0	
<i>Other elements</i>						
Total	•	•	*	*	*	Clear gradient P and S Fe, Na and K increased by treatment
Potential	•	•	+	+	0	Al, Fe, Na and K increased by treatment
Perforation water	•	•	+	+	0	Na and K increased by treatment P reduced by reducing rinsing
<i>Field inventories</i>						
biomass bacteria	•	•	0	0	-	effect on blank by organic material
Bacteria growth speed	•	•	0	0	+	effect on blank by organic material
Bait-lamina test	×	×	0	+	0	
nematodes	•	•	0	0	0	
<i>bioassays</i>						
Earthworm growth	•	•	+/-	+	0	effect dependent on test bed
Earthworm reproduction	×	×	+/-	+	0	effect dependent on test bed
Springtails test	×	×	0	0	0	effect visible, not significant
Microtox-test	•	•	+	+	0	
<i>Bio-accumulation</i>						
Earthworms	n.d.	•	0	0	0	

- gradient visible with analysis
- × gradient not visible with analysis
- + reduction of toxicity in relation to untreated test section (positive effect)
- increase in toxicity in relation to untreated test section (negative effect)
- 0 no effect in relation to untreated test section
- * the treatments applied will have no effect on the analysed parameters, but do provide useful information.
- n.d. not determined

Collateral poisoning with heavy metals

The internal concentrations measured were compared with the values measured in earthworms in locations that are not contaminated. They corresponded with the concentrations of arsenic, cadmium, lead and zinc found in earthworms in the Noorderbos. The concentrations of copper and nickel in earthworms from the most contaminated test bed are generally a little higher. This also applies to chrome in earthworms from the least contaminated test bed.

In addition, the measured concentrations were compared with the results of studies at non-contaminated locations that involved the determination of concentrations in earthworms and the moles and mice feeding on these worms. The expectation is that the concentrations of cadmium, zinc and lead in mice and moles in the Noorderbos will be comparable with those in moles and mice from non-contaminated locations. We expect higher concentrations of copper in moles and chrome, nickel and copper in mice from the most contaminated zones. The known concentration

ratio between earthworms and moles means that we do not expect concentrations of arsenic and chrome in moles in excess of the LD₅₀.

Conclusions

The ecological analyses of the initial situation did not reveal, with the exception of a negative effect on the growth of earthworms in the most contaminated test bed, any negative effects. This confirms the results of previous soil studies in the Noorderbos. The fact that no toxic effects were measured means that the same analysis package can be used to show any negative effects of acidification and the effects of the additives applied.

Transference of the contamination present to higher organisms via the food chain can not be shown in the Noorderbos. Comparison of the internal concentrations of heavy metals in earthworms with data from well known reference material in which the relationships between concentrations in earthworms, moles and mice has been studied leads us to conclude that there will be no threat to higher organisms.

Iron and zeolite seem to be suitable alternatives to calcium as agents to prevent the negative effects of acidification in the Noorderbos. Both substances reduce the availability of heavy metals. The levels in the soil moisture are clearly lower than in the test beds that were untreated or treated with calcium. This reduces the effects detected by the Microtox test to zero. Furthermore, both substances are non-toxic, easy to apply and relatively inexpensive. However, the formation of dust and lumps is an important point of attention during application. Social acceptance of the treatments is also important. On the other hand, there is still a lack of insight into the long-term effects and interaction with acidification due to the short duration of the project.

It is not yet possible to formulate a definitive monitoring programme for the effects of the creation of the Noorderbos and the effects of the additives used. This applies especially to the ecological analyses. All ecological analyses carried out, with the exception of the Bait-Lamina test, provide additional information on the effects of the soil contaminants present.

Recommendations

Soil acidification is a slow process and did not occur during the project. This means that it was impossible to acquire empirical data on the effect of the additives applied on the reduction of acidification. We therefore recommend acidification of the soil to a pH of approximately 4 during the planned follow-up phases. Sulphur is suitable for the artificial acidification of the soil because it does not add to the salt content of the soil.

Large doses of iron and zeolite were applied, which means that a significant quantity would be required for large-scale use. We therefore recommend gaining experience with smaller doses in field or laboratory tests.

We recommend concentrating research activities on test location I in any follow-up phases. The indistinct gradient at test location II makes it less suitable as a test location. In addition, the absorption of heavy metals by trees can be studied in follow-up phases. This was impossible during this project because the scope of the test sites was too small to allow the collection of sufficient sample material.

BEGRIPPENLIJST

bioassay	Analysemethode waarbij met behulp van aan een milieu toegevoegde organismen de kwaliteit van het monster wordt bepaald
doorvergiftiging	Het doorgeven van opgenomen verontreinigingen naar organismen hoger in de voedselketen, zodat ook hier effecten waarneembaar zijn.
ecologisch risico	Risico's voor het ecosysteem ten gevolge van de aanwezigheid van verontreiniging.
eutroof milieu	Voedselrijk milieu.
GPS	Global Position System. Navigatiesysteem waarbij met behulp van satellieten een nauwkeurige plaatsbepaling kan worden uitgevoerd. In geval van dGPS wordt het satelliet signaal door middel van een radiosignaal gecorrigeerd waarmee de nauwkeurigheid wordt vergroot.
ijzerstof	Afvalproduct uit de metaal verwerkende industrie (ijzervijlsel).
leucine-inbouw	Leucine is als aminozuur een bouwstof voor eiwitten. De snelheid waarmee leucine door bacteriën worden opgenomen is een maat voor synthese van eiwitten en geeft daarmee een indicatie over stofwisselingsprocessen en groeisnelheid.
macrofauna	Verzamelnaam voor hogere diersoorten (zie ook microflora).
microflora	Verzamelnaam voor lagere organismen zoals bacteriën, schimmels, actinomyceten en algen.
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development. Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO). Ontwikkelt onder andere richtlijnen voor het bepalen van de milieurisico's van chemische stoffen.
proeflocatie	Een van bekalking vrijgehouden strook tussen de aan- en afvoersloot. Op een proeflocatie is een verontreinigingsgradiënt met zware metalen aanwezig.
proefvak	Vak van circa 4 bij 4 meter op een proefveld waarop een oppervlaktebehandeling is uitgevoerd. Elk proefveld bevat vier proefvakken.
proefveld	Gedeelte op de proeflocatie waar de experimenten zijn uitgevoerd. Een proefveld wordt als homogeen verontreinigd beschouwd. Elke proeflocatie bevat 3 proefvelden.
thymidine-inbouw	Thymidine is een onderdeel van het DNA. De snelheid waarmee thymidine door bacteriën wordt opgenomen is een maat voor de verdubbeling van het DNA en daarmee een maat voor de groeisnelheid.

veldinventarisatie

Vaststellen van de milieukwaliteit aan de hand van in het veld waargenomen of in het laboratorium gemeten samenstelling en *abundantie* van organismen.

zeoliet

Natuurproduct bestaande uit een driedimensionaal rooster van silicium en enkele metalen. Door vrije elektronen kan zeoliet positief geladen metaalionen binden.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Kader

Bij herinrichting van terreinen tot natuurgebied of op locaties waar natuurontwikkeling gaande is, kan de aanwezigheid van bodemverontreiniging een belemmering zijn. Het is mogelijk dat door bodemverontreiniging een natuurdoeltype niet kan worden gerealiseerd, omdat de doelsoorten te gevoelig zijn. Verder kan natuurontwikkeling verandering van omgevingsfactoren tot gevolg hebben, waardoor de verontreiniging mobiliseert en uitspoelt naar grond- en oppervlaktewater. Een saneringsoplossing is het verwijderen van het verontreinigde bodemmateriaal. Omdat dit vaak grote terreinen betreft, is verwijdering kostbaar en zal bovendien leiden tot onherstelbare aantasting van bestaande natuur- en landschapswaarden. Verwijderen van de verontreiniging is vaak niet nodig wanneer met eenvoudige en goedkopere ingrepen de bodemkwaliteit kan worden verbeterd en daarmee de bodem geschikt kan worden voor het beoogde gebruik. De mogelijkheid tot natuurontwikkeling op verontreinigde locaties wordt immers niet bepaald door de aanwezigheid van verontreinigingen, maar door hun biologische beschikbaarheid en mobiliteit.

Het verlagen van de biologische beschikbaarheid is een methode om natuurontwikkeling op verontreinigde locaties mogelijk te maken. Een methode om de biologische beschikbaarheid te verlagen is immobilisatie. Dit is onder andere met succes toegepast op een sterk verontreinigde locatie in de Belgische Kempen. De concentraties aan zware metalen aldaar zijn dermate hoog dat groei van planten onmogelijk is. Het toedienen van beringiet heeft de biologische beschikbaarheid verlaagd en ertoe geleid dat, ondanks de aanwezigheid van bodemverontreiniging, binnen enkele jaren sprake was van een goed ontwikkelde vegetatie [Vangronsveld et al., 1996].

Daarentegen kunnen door natuurontwikkeling de mobiliteit en biologische beschikbaarheid van de aanwezige bodemverontreiniging worden verhoogd. Verzuring en verhoging van de grondwaterspiegel zal in veel gevallen leiden tot een verhoogde mobiliteit van verontreinigingen. Het Noorderbos te Tilburg is een voorbeeld van een sterk verontreinigde locatie waarop natuurontwikkeling is gepland. Op de voormalige vloeivelden "Zandleij", die door bevoeiing met huishoudelijk en industrieel afvalwater sterk zijn verontreinigd met zware metalen en arseen, wordt een parkbos aangelegd. Het bos zal een recreatieve en ecologische functie gaan vervullen. Door bebossing zal de minerale bodem verzuren. De aanwezige metaalverontreiniging die nu slecht biologisch beschikbaar is, zal door verzuring in oplossing gaan [Groenenberg et al., 1999a]. Ecologische schade en effecten op de ontwikkeling van het bos zijn in de toekomst niet uit te sluiten. Om verzuring tegen te gaan is, voorafgaand aan de aanplant van de bomen, de bodem behandeld met kalk.

1.2 Probleemstelling

Additieven zoals kalk om negatieve effecten van bodemverontreiniging te voorkomen, zijn tot op heden nauwelijks toegepast. Het gebrek aan kennis en ervaring is hiervoor een belangrijke oorzaak. Er is weinig bekend over de effecten op lange termijn. Nu natuurontwikkeling meer in de belangstelling staat en de aanwezigheid van bodemverontreiniging hierbij problematisch kan zijn, is de behoefte ontstaan om deze ontbrekende kennis en ervaring in te vullen.

Ook voor de ontwikkeling van het Noorderbos bestaat behoefte aan het vergroten van kennis en ervaring met additieven. De toegepaste kalkbehandeling om de verzuring en daarmee gepaarde negatieve effecten tegen te gaan, is mogelijk niet de meest doelmatige oplossing. Kalk zal lang-

zaam verbruikt worden, zodat de bufferende capaciteit van de bodem zal afnemen en de bodem zonder herhaalde toediening op den duur zal verzuren. Hierdoor is het noodzakelijk de behandeling om de 5 à 10 jaar te herhalen. Dit brengt op den duur niet alleen hoge kosten met zich mee, de inmiddels gegroeide bomen maken tevens een eenvoudige verspreiding van kalk onmogelijk. In het Noorderbos is daarom behoefte aan alternatieven voor kalk die de verzuring en/of negatieve effecten van verzuring op lange termijn tegengaan. Dit maakt het Noorderbos tot een geschikte proeflocatie om kennis en ervaring op te doen met additieven die de negatieve effecten van bodemverontreiniging met zware metalen en arseen op natuurontwikkeling verkleinen.

Voor het vaststellen van de effecten van de bosaanplant op de mobiliteit van de aanwezige verontreinigingen en schadelijke effecten die op kunnen treden ten gevolge van toegenomen mobiliteit is, mede in het kader van het vigerende bodembeheersplan [Witteveen+Bos, 1999], een goed monitoringsprogramma van belang. Er is behoefte aan de ontwikkeling van een monitoringsprogramma dat vroegtijdig inzicht geeft in de mobiliteit, beschikbaarheid en effecten van zware metalen en arseen op het ecosysteem, zodat eventuele passende maatregelen tijdig kunnen worden genomen. Een combinatie van chemische en ecologische monitoring lijkt hiervoor het meest geschikt.

1.3 Doelstelling

Met het project zal kennis en ervaring worden opgedaan met het toepassen van enkele additieven en verschillende monitoringsinstrumenten. Concreet moet het project leiden tot advisering met betrekking tot:

- een geschikt alternatief voor kalk;
- de toepassing van het geschikte alternatief (dosering, werkwijze, kosten e.d.);
- een instrumentarium (concreet ingevuld monitoringsprogramma) om de ontwikkeling van het Noorderbos chemisch en ecologisch te monitoren.

De met het project gegenereerde kennis is ook buiten het Noorderbos toepasbaar. In Nederland en daarbuiten zijn vergelijkbare situaties bekend. De gegenereerde kennis zal toepasbaar zijn op locaties waar duurzame natuurontwikkeling is gepland of gaande is en op locaties waar om andere redenen het verwijderen van het verontreinigd bodemmateriaal ongewenst is. Een voorbeeld hiervan zijn de in totaal meer dan 3000 km² diffuus met zware metalen verontreinigde locaties in de Kempen.

1.4 Projectopzet

Het project zal bestaan uit meerdere fasen. Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van de eerste fase (fase A) van het project. Doelstellingen van fase A zijn:

- het chemisch en ecologisch vastleggen van de beginsituatie (de situatie voor de aanleg van het bos);
- selectie van geschikte additieven en toepassing op proefveldschaal;
- (aanzet tot) selectie van een geschikt instrumentarium om de effecten van de bodemverontreiniging en de werking van de toegepaste additieven op lange termijn te monitoren.

Tijdens fase A van het project zijn enkele additieven geselecteerd en op proefveldschaal toegepast in het Noorderbos. Tevens is in fase A een start gemaakt met de monitoring van de toegepaste additieven. In vervolgfases zal de monitoring (in aangepaste vorm) worden gecontinueerd. De projectopzet is schematisch weergegeven in figuur 1.

Fase A heeft bestaan uit een vooronderzoek en een veldonderzoek. In het vooronderzoek zijn via een literatuur- en laboratoriumstudie enkele geschikte additieven geselecteerd. Deze additieven zijn tijdens het veldonderzoek in proefvelden toegepast in het Noorderbos. Voorafgaand aan de toepassing van de geselecteerde additieven, is op de proefvelden de nulsituatie opgenomen

met chemische en ecologische analyses. Tevens zijn op enkele meetpunten buiten de proefvelden de potentiële beschikbaarheid van zware metalen en macronutriënten in de bodem bepaald. Hiermee is een indruk verkregen van de verontreinigingssituatie in het Noorderbos. Circa een half jaar na de aanleg van de proefvelden is gestart met de uitvoering van het monitoringsprogramma om de effecten van de aanwezige bodemverontreiniging en de toegepaste additieven op de bosontwikkeling te bepalen.

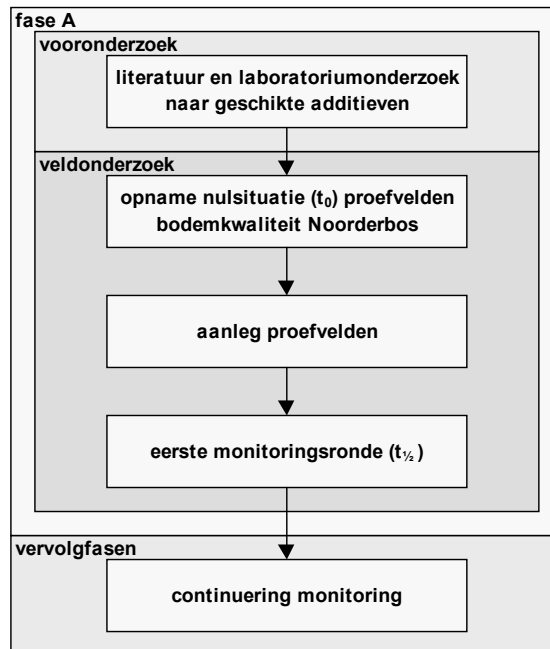


Fig. 1. Projectopzet.

Tijdens de voorgenumen vervolgfases wordt de doelstelling nader uitgewerkt. De resultaten van fase A zullen sturend werken op de uitvoering van de vervolgfases.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is achtergrondinformatie met betrekking tot het project opgenomen. In dit hoofdstuk wordt de geschiedenis van de vloeivelden en de ontwikkeling van het Noorderbos beschreven. Hoofdstuk 3 geeft achtergrondinformatie over- en beschrijft de resultaten van het uitgevoerde vooronderzoek met betrekking tot toeslagstoffen. Deze studie heeft plaatsgevonden voorafgaand aan de inrichting van de proefvelden. Tevens wordt in dit hoofdstuk de selectie van de, tijdens de veldexperimenten, toegepaste toeslagstoffen gemotiveerd.

De uitgevoerde werkzaamheden worden globaal beschreven in hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk beschrijft tevens de inrichting van de proeflocatie en geeft beperkte achtergrondinformatie over de uitgevoerde analyses.

In hoofdstuk 5 worden globaal de resultaten van de veldstudie beschreven en in hoofdstuk 6 worden deze bediscussieerd. In hoofdstuk 6 wordt eveneens de geschiktheid van de toegepaste additieven en monitoringspakket geëvalueerd.

Tot slot worden in hoofdstuk 7 en 8 de conclusies en aanbevelingen voor de vervolgfases gedaan.

HOOFDSTUK 2

HET NOORDERBOS

2.1 Historie

Tilburg heeft zich sinds de 19^e eeuw ontwikkeld tot een grote stad. De vele industrieën in de stad, waaronder textiel fabrieken, leerlooierijen en een grootschalige werkplaats van de staatspoorwegen, loosden tot het begin van de 20^e eeuw hun afvalwater direct of via het riool op enkele riviertjes in de omgeving van Tilburg zoals de Leij, de Zandleij en de Donge. Deze riviertjes raakten hierdoor ernstig vervuild, hetgeen leidde tot conflicten met gemeenten die stroomafwaarts lagen, zoals Oisterwijk en Berkel-Enschot. Daarom heeft de gemeente Tilburg in 1885 besloten het afvalwater van fabrieken dat in openbare “waterleidingen” (sloten, riolen) werd geloosd te zuiveren. Eerst gebeurde dit nog primitief door afvalwater te laten bezinken in putten, het plaatsen van roosters en het behandelen van het afvalwater met kalk. Vanaf 1899 werden enkele gronden buiten Tilburg bevoeid met afvalwater [Van Doremalen, 1993].

In 1923 werd gestart met de aanleg van het grootschalige (circa 100 ha) vloeiveldencomplex “De Zandleij” op de Loonse Heide, even ten noorden van Tilburg. In 1926 is men begonnen met het zuiveren van het afvalwater uit het noorden van de stad. Komend vanuit de stad werd het water circa 2 meter omhoog gepompt om in een hoofdsloot terecht te komen [Van Doremalen, 1993]. Via een stelsel van aanvoersloten die circa 75 centimeter boven het maaiveld liggen, werd het afvalwater verspreid over het gebied. Via sluisjes werd het afvalwater op de percelen gelaten, waarna het water langzaam de bodem infiltreerde. Het vuil bleef achter in de bodem en het gezuiverde water werd opgevangen in drainagebuizen en via een stelsel van afvoersloten afgevoerd naar het riviertje de Zandleij.

Tijdens de zuivering stonden de percelen enkele dagen onder water. Wanneer al het water was weggevoerd en het gras was hersteld, werden de velden beweide met vee door boeren uit de omgeving. Na afloop van de beweiding, die gemiddeld vier weken duurde, werd de cyclus herhaald [De Haan, 1972]. Door de bevoeiing met rioolwater werd eveneens de grond bemest en geschikt gemaakt voor grasland.

Bij het pompstation heeft een grove waterzuivering plaatsgevonden, waarbij het slib van het water werd gescheiden. Het slib werd op een naastgelegen perceel verspreid. Deze grove waterzuivering is later verplaatst naar een locatie halverwege de afvoersloot. Het vrijkomende slib werd gedeponereerd in een naastgelegen bezinkbassin en na bezinking overgebracht naar een naastgelegen put voor ontwatering. Na ontwatering werd het slib uit de put overgebracht naar een perceel elders in het gebied. Door het verplaatsen van de grove voorzuivering zijn de percelen ten zuidwesten van de nieuwe voorzuivering tot circa 1972 bevoeid met ongezuiverd afvalwater. In 1972 is de rioolwaterzuivering Noord, gebouwd op een gedeelte van de vloeivelden, in gebruik genomen. De bevoeiing van de vloeivelden heeft echter nog tot 1980 geduurd, omdat de zuivering gedurende de eerste jaren nog niet in staat was om het volledige aanbod te verwerken. Het afvalwater werd wel op de zuiveringsinstallatie voorgezuiverd door mechanische zeping, zand- en vetverwijdering en voorbezinking en via een nieuwe aanvoersloot het gebied ingebracht [Beek en Harmsen, 1977]; [Heidemij, 1992]. Tijdens deze periode zijn enkele percelen vrijwel continue bevoeid [Heidemij, 1992]. Na 1980 zijn de vloeivelden alleen nog maar in gebruik geweest om ten tijde van piekafvoer de grote hoeveelheden (gezuiverd) afvalwater kwijt te kunnen.

2.2 Verontreinigingssituatie

Het jarenlange gebruik van het gebied als vloeiveldencomplex heeft geleid tot een grootschalige bodemverontreiniging. Met het afvalwater is onder meer een grote hoeveelheid chroom en arseen, die door de leerlooierijen in Tilburg veelvuldig zijn gebruikt, het gebied binnengebracht. Deze metalen zijn met het zwevend stof neergeslagen op de vloeivelden en hebben de bovenste 40 cm van de bodem verontreinigd. Met name nabij de inlaatsuizen, vlak langs de aanvoersloten en op de percelen waar het slib is gedeponeed, is een overschrijding van de interventiewaarde voor arseen en chroom gemeten. Maar ook andere metalen en organische verontreinigingen zijn in de bodem en het grondwater aanwezig [Heidemij, 1986, 1992, 1993a, 1993b]. De verontreinigingssituatie is aangegeven in figuur 2.

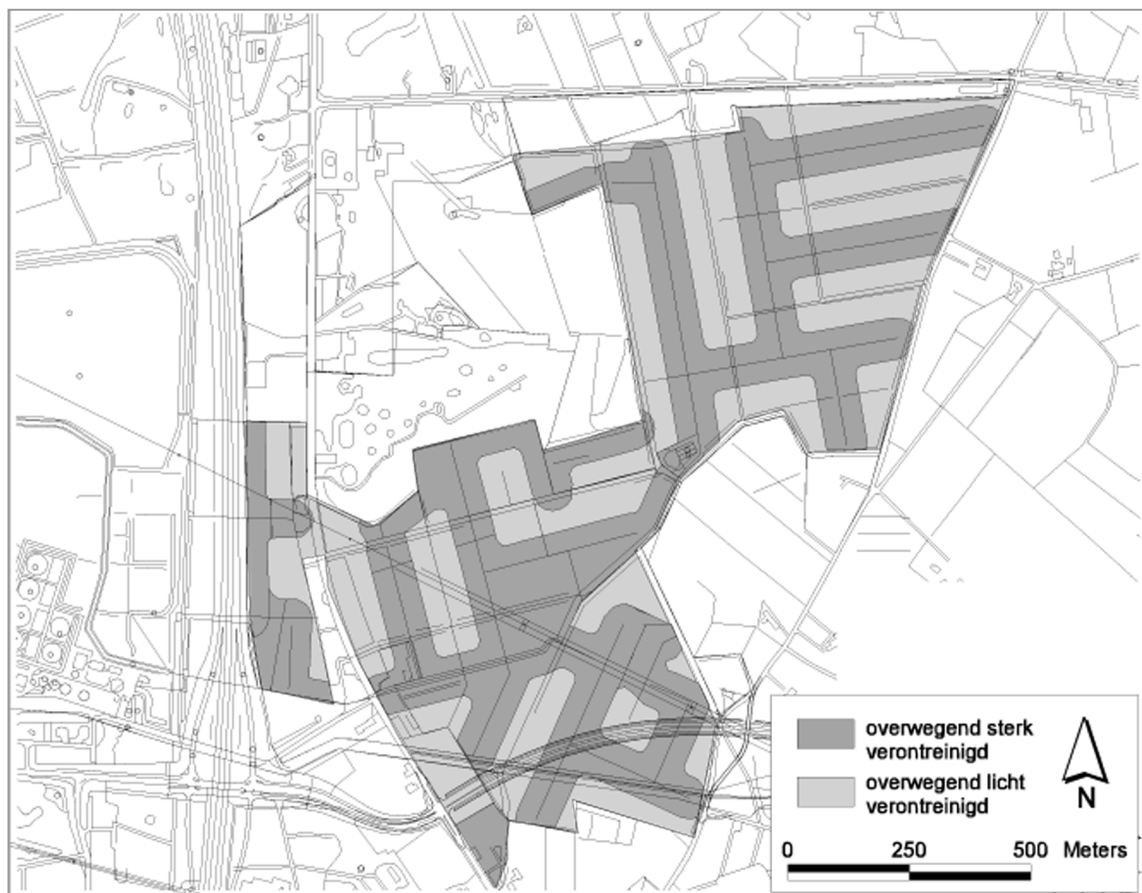


Fig. 2. Verontreinigingssituatie in het Noorderbos (0-0,2 m-mv).

De locatie zal vanwege de omvang en de beperkte risico's niet worden gesaneerd, maar zal worden heringericht tot een parkbos. Dit parkbos, het Noorderbos genaamd, zal een extensieve recreatieve functie gaan vervullen voor de bewoners uit Tilburg en omstreken. Daarnaast zal het bos deel gaan uitmaken van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS), die naburige natuurgebieden met elkaar zal verbinden. Uit een uitgebreide risicostudie door Alterra [Groenenberg et al., 1999b] met chemisch en biologisch onderzoek, is gebleken dat de aanwezigheid van bodemverontreiniging onder de huidige omstandigheden slecht beschikbaar is en geen negatieve effecten heeft op het ecosysteem. Uit dit onderzoek is gebleken dat de probleemstoffen chroom en arseen respectievelijk voorkomen als 3-waardig chroom en arsenaat. Het zeer toxische 6-waardig chroom komt in zeer lage concentraties voor, waarbij voor de meest gevoelige soorten geen effecten zijn te verwachten. Doordat chroom hecht gebonden is aan het aanwezige organisch ma-

teriaal of gebonden in een ijzer-chroom-aluminium-fosfaat-neerslag en arseen is gebonden aan ijzer- en aluminiumoxiden, zijn deze verontreinigingen slecht biologisch beschikbaar. Bij de uitgevoerde bioassays zijn geen toxische effecten gemeten. Uit het onderzoek blijkt dat de bodem gevoelig is voor verzuring en dat bij bebossing, met stopzetting van bekalking, de bodem in enkele decennia zal verzuren. Verzuring van de locatie kan de biologische beschikbaarheid van zware metalen verhogen en daardoor negatieve effecten hebben. Daarom is geadviseerd maatregelen te treffen om dit te voorkomen [Groenenberg, et al., 1999a,b].

Gebaseerd op de resultaten uit voorgaande onderzoeken is een bodembeheersplan opgesteld dat beschrijft hoe om te gaan met de aanwezigheid van bodemverontreiniging [Witteveen+Bos, 1999]. Eén van de aspecten uit het bodembeheersplan is de advisering om het gebied met kalk te behandelen om verzuring tegen te gaan. Daarnaast beschrijft het bodembeheersplan richtlijnen voor de werknemers, een grondstromenplan en specifieke maatregelen om risico's van de aanwezigheid van bodemverontreiniging te beperken. Specifieke aandacht gaat uit naar waar wandel- en ruiterspaden sterk verontreinigde terreingedeelten doorkruisen, waar inademing van stuwend bodemmateriaal een reëel gevaar voor de gezondheid kan zijn.

2.3 Bosontwerp

Het definitieve bosontwerp [H+N+S, 1999] is mede tot stand gekomen op basis van het bodembeheersplan [Witteveen+Bos, 1999] en het onderzoek van Alterra [Groenenberg, et al., 1999a,b]. Het bos wordt zodanig aangelegd dat betreding van sterk verontreinigde gedeelten wordt voorkomen. De wandelroutes zijn zoveel mogelijk parallel aan de afvoersloten voorzien, waar de concentraties het laagst zijn. Waar een wandelpad een aanvoersloot kruist, zal een betonnen constructie worden geplaatst, waardoor het betreden van de sterk verontreinigde kades wordt voorkomen.

Niet alleen de aanwezigheid van bodemverontreiniging heeft het definitieve bosontwerp bepaald. Ook de aanwezigheid van een hoogspanningsleiding en ondergrondse leidingen en de aanleg van een ontsluitingsweg voor het noorden van Tilburg die door het gebied loopt, heeft invloed gehad op het bosontwerp. Daarnaast zal in de toekomst een gedeelte van het Noorderbos worden gebruikt als retentiebekken om tijdens pieken de waterafvoer te bufferen. Hierbij zullen de velden niet langer dan een paar dagen onder water komen te staan. Het langdurig onder water zetten van delen van het gebied zal eveneens de beschikbaarheid van de aanwezige verontreiniging met zware metalen verhogen [Groenenberg et al., 1999b].

De aanwezigheid van bodemverontreiniging heeft ook invloed op de keuze van de boomsoorten [H+N+S, 1999]. Zo is het niet mogelijk beuken te plaatsen in de sterk verontreinigde zones, doordat deze door hun slechte strooiselvertering verzuring zullen stimuleren. Het overgrote deel van het Noorderbos zal worden aangeplant met eiken, berken, beuken en robinia. Onder de hoogspanningsleiding is een hakhoutbos van zomereik gesitueerd. De zomereiken zullen periodiek worden gehakt om te voorkomen dat de bomen in de nabijheid van de hoogspanningskabels komen. Het hakhout zal (commercieel) worden afgezet. Met de aanleg van het Noorderbos is eind 1999 een begin gemaakt.

VOORSTUDIE EN SELECTIE VAN GESCHIKTE ADDITIEVEN

3.1 Achtergrond

Door het toevoegen van bepaalde stoffen aan de verontreinigde bodem kunnen de beschikbaarheid en de mobiliteit van zware metalen en arseen verlaagd worden of een toename in de beschikbaarheid en mobiliteit voorkomen worden. Binnen dit project wordt de werking van dergelijke additieven op proefvakschaal in het veld onderzocht. Om, voorafgaand aan deze veldexperimenten, een goede selectie te maken van mogelijk te gebruiken stoffen, is een literatuurstudie uitgevoerd tezamen met enkele aanvullende model- en laboratoriumexperimenten.

In principe kunnen voor de werking van immobiliserende stoffen twee werkingsmechanismen onderscheiden worden, namelijk:

- verhoging van de bindingscapaciteit;
- buffering of verhoging van de pH.

Hierdoor kan de aanwezige bindingscapaciteit beter benut worden en de oplosbaarheid van precipitaten verlaagd worden. De werking van een aantal additieven kan aan beide mechanismen toegeschreven worden. Omdat voor het Noorderbos geen toxische effecten verwacht worden [Groenenberg et al., 1999b] onder de huidige omstandigheden, is de werking van een additief voldoende wanneer deze mobilisatie door verzuring tenietdoet of verzuring tegengaat. De bruikbaarheid van de verschillende stoffen voor toepassing in het Noorderbos wordt hieronder per stof(groep) besproken.

3.1.1 *Kalk*

Het toevoegen van kalk verlaagt de pH van de bodem waardoor de concentraties van metalen (vrije metaalionen) in oplossing dalen. Uit verschillende opname-experimenten met gewassen blijkt een verminderde beschikbaarheid van metalen als zink en nikkel en in mindere mate van cadmium en koper bij toevoegen van kalk. De mate van invloed van bekalking vertoont een grote variëteit die afhankelijk is van bodem, gewas en metaal [Singh en Osté, 2001]. Het effect van kalk op de beschikbaarheid van chroom en arseen is gering. Door het regelmatig toevoegen van kalk kan er voor gezorgd worden dat de zuurgraad van de bodem niet onder een bepaalde waarde zakt. Gezien de geringe beschikbaarheid van chroom onder de huidige omstandigheden, volstaat een kalkgift die de huidige pH tussen de 5 en 6 kan handhaven. Een te hoge pH is ongunstig omdat bij hogere waarden de oxidatie van chroom(III) tot het toxischer chroom(VI) gestimuleerd wordt [Bartlett en James, 1979]. Uit onderzoek door Groenenberg et al. [1999a], blijkt dat een kalkgift equivalent aan $100 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1}$ de pH ongeveer 20 jaar op een niveau boven pH 5 kan handhaven. Een nadeel van kalk is dat het toedienen regelmatig herhaald moet worden, wat na aanleg van het bos lastig uitvoerbaar is.

3.1.2 *Olivijn*

De werking van olivijn is gebaseerd op de verwerking van dit mineraal onder invloed van zuur, waarbij zuur geconsumeerd wordt. Deze zuurconsumptie buffert de pH. Olivijn is een orthosilicaat met een voor silicaten hoge verwerkingssnelheid. De verwerking is echter duidelijk langzamer dan die van kalk, wat als voordeel heeft dat grote hoeveelheden olivijn toegevoegd kunnen worden met een grote zuurbufferende capaciteit en langdurige werking zonder dat de huidige zuurgraad van de bodem veranderd wordt. Bij de verwerking van olivijn worden onder andere kwarts en ijzeroxiden gevormd. Er is geen experimentele ervaring met het toedienen van olivijn aan de bodem.

De geschiktheid van olivijn als additief hangt af van de mogelijkheid om met olivijn de zuurgraad op een niveau van pH 5 te handhaven. Omdat experimentele gegevens niet beschikbaar zijn, zijn modelberekeningen uitgevoerd met het model Profile [Sverdrup en Warfvinge, 1992]. Profile berekent de verwerking van mineralen en de daarbij behorende zuurneutralisatie onder *steady state* condities. Met het model is voor verschillende hoeveelheden toegevoegd olivijn de pH doorgerekend bij de huidige atmosferische depositie van verzurende stoffen (SO_2 1,1 ton.ha⁻¹.jaar⁻¹, NO_3 0,8 ton.ha⁻¹.jaar⁻¹ en NH_3 1,5 ton.ha⁻¹.jaar⁻¹). De resultaten van deze berekeningen zijn in tabel 1 samengevat.

Tabel 1. Gemodelleerde pH-waarde bij toepassing van verschillende percentages olivijn als buffer. Gearceerde cellen geven de met olivijn behandelde bodemlagen aan.

diepte (cm-mv)	percentage olivijn					
	0	5	10	20	5	20
0-5	3.6	4.3	4.5	4.7	4.3	4.7
5-10	3.5	3.9	4.1	4.4	3.9	4.4
10-30	3.7	4.9	6.0	7.0	4.1	4.9
30-60	4.0	7.4	7.5	7.7	4.4	7.4
60-90	4.1	7.7	7.8	7.9	4.6	7.7
90-120	4.1	7.9	7.9	8.0	4.6	7.9

Zoals uit de modelberekeningen blijkt, is het mogelijk de zuurgraad in de toplaag van de bodem te bufferen op een pH van circa 4. Dit betekent dat de bodem, ondanks de toevoeging van olivijn, nog behoorlijk zal verzuren. Met olivijn is dus niet te voorkomen dat de beschikbaarheid van zware metalen in de bovengrond flink zal toenemen bij bebossing. De zuurgraad in de ondergrond wordt door de toevoeging van olivijn wel sterk gebufferd. Toevoeging van olivijn kan er dus wel voor zorgen dat de uitspoeling van metalen tegengegaan wordt. De dikte van de met olivijn te mengen laag is eveneens van invloed op de zuurgraad van diepere bodemlagen. Met name de invloed van lage doseringen is minimaal.

3.1.3 Beringiet

Beringiet is een gemodificeerd aluminiumsilicaat dat vrijkomt als afval bij de wervelbedverbranding van steenkool uit de kolenmijn in Beringen (België). Van beringiet is in verschillende studies aangetoond dat het metaalconcentraties in oplossingen en metaalopname door planten verlaagt [Mench et al., 1994]; [Vangronsveld et al., 1995] en [Vangronsveld et al., 1998]. Tijdens de verhitting van het materiaal wordt een product gevormd met een hoog zuurneutraliserend vermogen en een hoge bindingscapaciteit voor kationen. Het bindingsmechanisme van beringiet voor metalen berust volgens deze onderzoekers op precipitatie, adsorptie en kristalgroei. Uit onderzoek door Alterra [Dolfing, 2000] blijkt dat de werking op korte termijn volledig is te verklaren uit een verhoging van de zuurgraad.

Nadelen van beringiet zijn dat het materiaal zelf een hoog gehalte zware metalen bevat. Bovendien is beringiet niet tot slecht verkrijgbaar. Binnen Alterra vinden experimenten plaats om te onderzoeken of met verhitte klei vergelijkbare resultaten kunnen worden bereikt.

3.1.4 Hoogovencement

Hoogovencement bestaat voornamelijk uit calciumoxide, siliciumoxide en aluminiumoxide. Hoogovencement is een sterk alkalische stof en zal bij toevoeging de zuurgraad van de bodem verhogen, waardoor de beschikbaarheid van metalen wordt verlaagd. Hoogovencement is een sterk reactieve stof en bindt mogelijk zware metalen aan bijvoorbeeld aluminium- en ijzeroxiden. Experimenten met het toevoegen van hoogovencement laten een duidelijke verlaging van de

concentraties cadmium en zink in oplossing zien [Dolfing, 2000]. Toevoegen van hoogovencement leidt al bij lage doseringen tot een sterke verhoging van de pH.

Om te onderzoeken of hoogovencement naast de pH ook additioneel metalen immobiliseert, is een laboratoriumexperiment in duplo uitgevoerd op gronden uit het Noorderbos. Hiervoor is gekeken naar de concentratie metaal in oplossing als functie van de pH voor verschillende toevoegingen van cement en/of loog/zuur. Er is gewerkt met toevoegingen van 0, 0,5 en 1% cement op gewichtsbasis, omdat grotere hoeveelheden cement de pH te extreem zou verhogen wat ongewenste effecten tot gevolg kan hebben. Het cement is toegevoegd aan vochtige grond. Na toevoegen zijn de monsters twee dagen blijven staan. Vervolgens is een verdunde zoutoplossing aan de bodem toegevoegd en zijn voor de drie toevoegingniveaus verschillende pH's ingesteld door toevoeging van loog of zuur. Daarna zijn de monsters een nacht geschud en is vervolgens de pH gemeten en eventueel weer loog of zuur toegevoegd om de gewenste pH te bereiken. De monsters zijn opnieuw een dag geschud en, indien noodzakelijk, is de pH bijgesteld met loog of zuur. Na opnieuw een dag schudden is de eind-pH gemeten. De monsters zijn tenslotte gecentrifugeerd en in de vloeistof zijn de concentraties aan metalen en DOC (Dissolved Organic Matter) gemeten.

Figuur 3 laat zien dat de concentratie in oplossing van de metalen duidelijk van de zuurgraad afhangt, voor cadmium en zink is dit effect het sterkst. Zoals in de figuur te zien is, wordt de concentratie van het metaal bepaald door de zuurgraad en niet door de hoeveelheid toegevoegd hoogovencement. Uit de resultaten van dit experiment kan geconcludeerd worden dat de immobiliserende werking van hoogovencement, bij toediening in kleine hoeveelheden, het gevolg is van een verhoging van de pH. Rond neutrale waarden (pH 6) blijkt het toedienen van hoogovencement de concentratie chroom te verhogen.

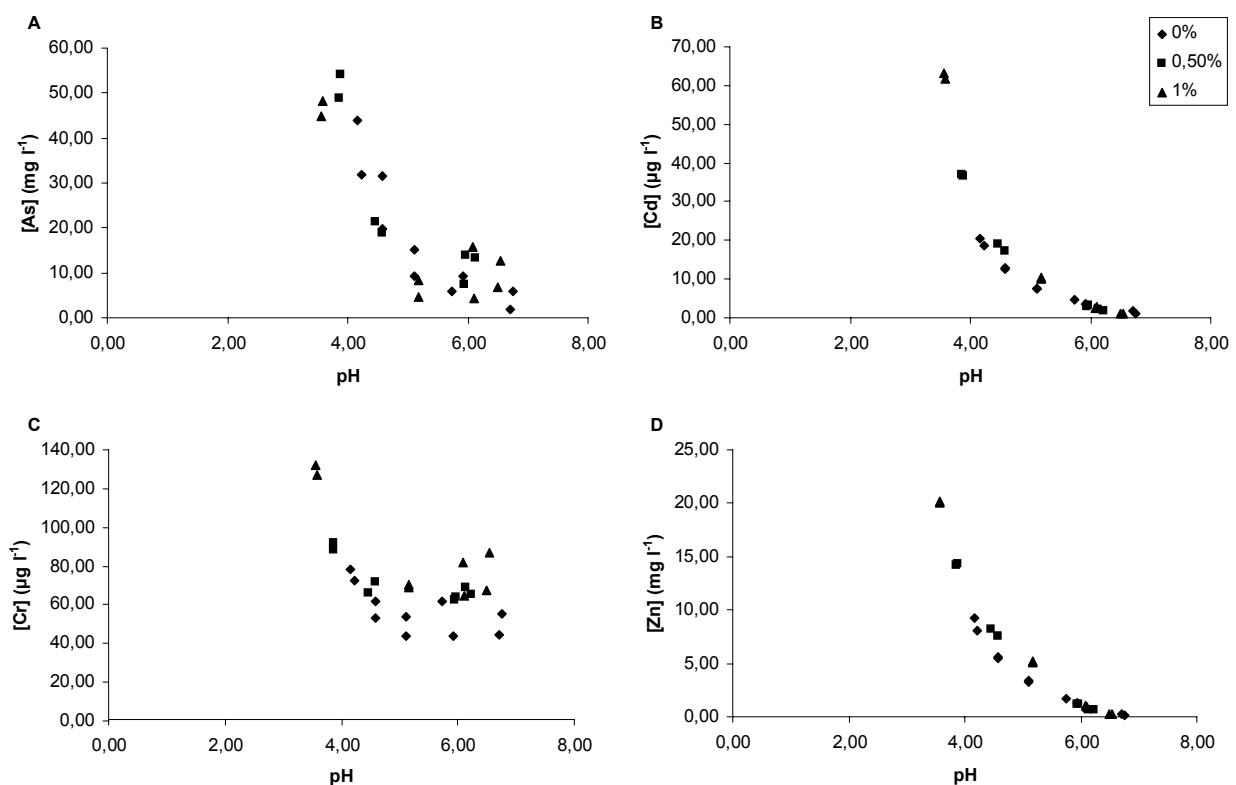


Fig. 3. Concentraties arseen (A), cadmium (B), chroom (C) en zink (D) in eluaat na toepassing van verschillende doseringen (gewichtspcenten) hoogovencement.

3.1.5 Zeolieten

Zeolieten worden onder andere gebruikt in de waterzuivering voor het verwijderen van zware metalen en ammonium. In Japan zijn zeolieten sinds lange tijd in gebruik om de bodemkwaliteit te verbeteren met betrekking tot zuurgraad en stikstofretentie. [Singh en Osté, 2001]. Zeolieten verhogen zowel de pH en de bindingscapaciteit van de bodem voor kationen. De binding aan zeolieten is elektrostatisch en de selectiviteit voor bepaalde ionen is gebaseerd op fysische eigenschappen (onder andere vorm kristalrooster). Er zijn zeolieten met een duidelijk hogere affiniteit voor tweewaardige metaalionen boven calcium. Specifieke binding van chroom is niet gerapporteerd. Kunstmatige zeolieten hebben een duidelijk sterkere bindingscapaciteit dan natuurlijke zeolieten.

Bij het toepassen van kunstmatige zeolieten moet voorzichtigheid betracht worden. Door de sterke bindingscapaciteit voor tweewaardige metaalionen, kan het toegediende zeoliet calcium aan de bodem onttrekken. Omdat calcium een bindmiddel voor organische stof is, kan door onttrekking van calcium organische stof met de daaraan gebonden zware metalen in oplossing gaan. Dit kan dan de beschikbaarheid van met name sterk complexerende metalen als koper, lood en chroom sterk verhogen.

3.1.6 Mangaanoxiden

Mangaanoxiden komen in verschillende vormen voor. De immobiliserende werking van mangaanoxiden is afhankelijk van de structuur en van oppervlaktegroepen. De meest reactieve vorm is synthetisch birnesiet [Singh en Osté, 2001]. In een vergelijkende studie door Mench et al. [1994], waarin de immobiliserende werking van birnesiet vergeleken werd met andere additieven zoals ijzeroxide, basische slakken, beringiet en kalk, werden met birnesiet de beste resultaten behaald in het reduceren van de opname van cadmium en lood door planten. Mangaanoxiden kunnen echter chroom(III) oxideren tot het toxischer chroom(VI). Bartlett en James [1979] vonden een positief verband tussen chroom(VI) en het gehalte aan mangaanoxiden in de bodem.

3.1.7 IJzer

Ijzeroxiden kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan de binding van zware metalen in de bodem. Het toevoegen van ijzeroxiden kan concentraties zware metalen in oplossing of makkelijk extraheerbare fracties reduceren (bijvoorbeeld een reductie van $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -extraheerbaar cadmium [Mench et al., 1994]. Het arsenaat anion wordt sterk geadsorbeerd door ijzer-(hydr)oxiden [Pierce en Moore, 1982]. De adsorptie van arsenaat is afhankelijk van de zuurgraad en bij hoge concentraties fosfaat kan competitie optreden.

Behalve door adsorptie kunnen metalen ook geïmmobiliseerd worden wanneer ze ingebouwd worden in ijzeroxides [Ainsworth et al., 1994] [1]. Daarom werkt de additie van metallisch ijzer, dat in de bodem oxideert tot ijzer-(hydr)oxide, mogelijk beter dan de toevoeging van ijzeroxides. Experimenten met het toedienen van metallisch ijzer zijn gerapporteerd door Boisson et al. [1998] en Mench et al. [1994]. Uit deze experimenten blijkt dat het toedienen van metallisch ijzer de hoeveelheid metalen (cadmium, koper, zink en lood) geëxtraheerd met $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ verlaagt. Dit is niet het geval bij het toedienen van ijzeroxiden. De concentratie nikkel wordt door toediening van metallisch ijzer niet verlaagd.

3.1.8 Organisch materiaal

Organisch materiaal is één van de belangrijkste metaalbindende media in de bodem. Verhoging van het gehalte organisch materiaal in de bodem zal door het sterk bindend vermogen de concentratie van metalen in oplossing kunnen verlagen. Brummer en Herms [1983] vonden dat metalen werden geïmmobiliseerd door organisch materiaal in afnemende sterkte, volgens koper>cadmium>zink>lood in het zure tot licht zure pH-traject, maar dat in het neutrale tot licht basische pH-traject het toedienen van organische stof de concentratie van metalen juist ver-

hoogde. Dit kan een gevolg zijn van het in oplossing gaan van organisch materiaal bij hogere zuurgraad waardoor de concentratie metalen in oplossing juist verhoogd wordt.

3.2 Selectie van geschikte additieven

Uitgangspunten bij de selectie van geschikte additieven zijn een zo effectief mogelijke buffering van de zuurgraad of immobilisatie van zware metalen en arseen bij een zo gering mogelijke verstoring van de bodem in het gebied, vanwege de toekomstige functie van het gebied als bos.

3.2.1 *Zuurbufferende of pH-verhogende additieven*

Kalk heeft het nadeel dat het slechts voor een beperkte tijd werkzaam is en herhaald zal moeten worden toegediend. Het alternatief olivijn blijkt niet in staat de zuurgraad in de bovengrond op een gewenst niveau te handhaven en is daarom niet te gebruiken als additief om de beschikbaarheid in de bovengrond te beperken. Beringiet is een goede pH-buffer, maar is niet te verkrijgen. Hoogovencement heeft een hoge bufferende werking maar bestaat uit zeer fijn materiaal en is daarom zeer reactief. Het verhoogt de pH te sterk waardoor de pH sterk gaat afwijken van de natuurlijke pH. Bovendien bestaat het risico dat bij hoge pH Chroom(III) geoxideerd wordt tot het toxischer Chroom(VI). Van de zuurbufferende middelen blijkt kalk het meest geschikt voor toepassing in het Noorderbos

3.2.2 *Immobiliserende additieven*

De immobiliserende werking van beringiet, anders dan door het verhogen van de pH, is twijfelachtig. Beringiet valt bovendien af als alternatief, omdat het op dit moment niet verkrijgbaar is. Mangaanoxiden kunnen cadmium en zink goed binden maar oxideren chroom(III) tot het toxischer en mobielere chroom(VI). Voor het Noorderbos, waar de bodem hoge gehalten chroom bevat, is de toevoeging van mangaanoxiden daarom geen optie.

Uit de experimenten blijkt dat bij lage toedieningsniveau's de werking van hoogovencement berust op de verhoging van de pH en geen extra toegevoegde waarde heeft voor de binding van metalen.

Het toedienen van organische stof kan de concentratie van metalen als chroom, koper, cadmium en zink in oplossing verlagen. Organische stof is echter niet stabiel en zal afgebroken worden. Momenteel bevat de bodem van de voormalige vloeivelden een vrij hoog gehalte organische stof dat als gevolg van de bevloeiing in de bodem is geaccumuleerd. Door de aanplant met bos is een constante input van vers organisch materiaal door bladval en wortelsterfte gewaarborgd. Het effect op het gehalte aan organische stof in de bodem door toedienen van extra organisch materiaal, zoals compost, is naar verwachting marginaal. Het toedienen van organisch materiaal is daarom niet zinvol.

Ijzeroxides kunnen de concentratie arseen in oplossing beperken door adsorptie. Door ijzer als metallisch ijzer toe te voegen aan de bodem, wordt naast de adsorptie van arseen mogelijk een deel van de beschikbare metalen als cadmium, koper en zink ingebouwd in het oxide. De beschikbaarheid van chroom wordt door het toedienen van metallisch ijzer mogelijk beperkt. Gezien de zekere werking van ijzer voor arseen en de kansen op immobilisatie van chroom en overige zware metalen, maakt het uitproberen van metallisch ijzer als additief interessant.

Het toevoegen van zeolieten zal de beschikbaarheid van arseen niet verminderen, de werking voor chroom is onbekend. Het uittesten van zeoliet is toch interessant omdat door verzuring, als gevolg van bebossing, met name de mobiliteit en beschikbaarheid van tweewaardige kationen zal toenemen. Zeolieten zijn goede immobilisatoren voor tweewaardige kationen en kunnen daardoor mogelijk negatieve effecten van verzuring op mobiliteit van tweewaardige metalen teniet doen.

3.2.3 *Geselecteerde additieven*

Op basis van de resultaten is besloten om metallisch ijzer en zeoliet op proefveldschaal toe te passen. Tevens zal kalk worden toegepast, omdat kalk de beste mogelijkheid is om verzuring van de bodem tegen te gaan. Daarnaast is kalk toegepast bij de aanleg van het Noorderbos. Een vierde proefveld zal onbehandeld blijven (blanco).

MATERIAAL EN METHODEN

4.1 Inrichting van de proeflocaties en meetpunten

Bij aanvang van het project zijn in het Noorderbos vier potentiële proeflocaties geselecteerd. Elke proeflocatie is zo gekozen dat er binnen de locatie een gradiënt aanwezig is in de mate van verontreiniging (van sterk tot matig verontreinigde grond). Deze potentiële proeflocaties zijn tijdens de aanleg van het bos vrijgehouden van bekalking. Op twee van deze vrijgehouden gebieden zijn de proeflocaties gesitueerd (proeflocatie I en II). Voorafgaand aan de inrichting van de proeflocaties is het verloop van de concentratiegradiënt gecontroleerd door bepaling van het percentage organisch materiaal. Het organisch materiaal is sterk gecorreleerd met de mate van verontreiniging, omdat het gelijktijdig afgezet is. Uit het onderzoek is gebleken dat op beide proeflocaties de gradiënt aanwezig is. De bodem van proeflocatie II is bovendien vergraven.

In figuur 4 is de inrichting van de proeflocaties weergegeven. Op elke proeflocatie zijn 3 proefvelden aangelegd op respectievelijk sterk, matig en licht verontreinigde grond. Op elk proefveld zijn 4 proefvakken aangelegd van circa 4 bij 4 meter. Drie van deze proefvakken zijn behandeld met respectievelijk zeoliet, ijzerstof en kalk, het vierde is onbehandeld gebleven (blanco).

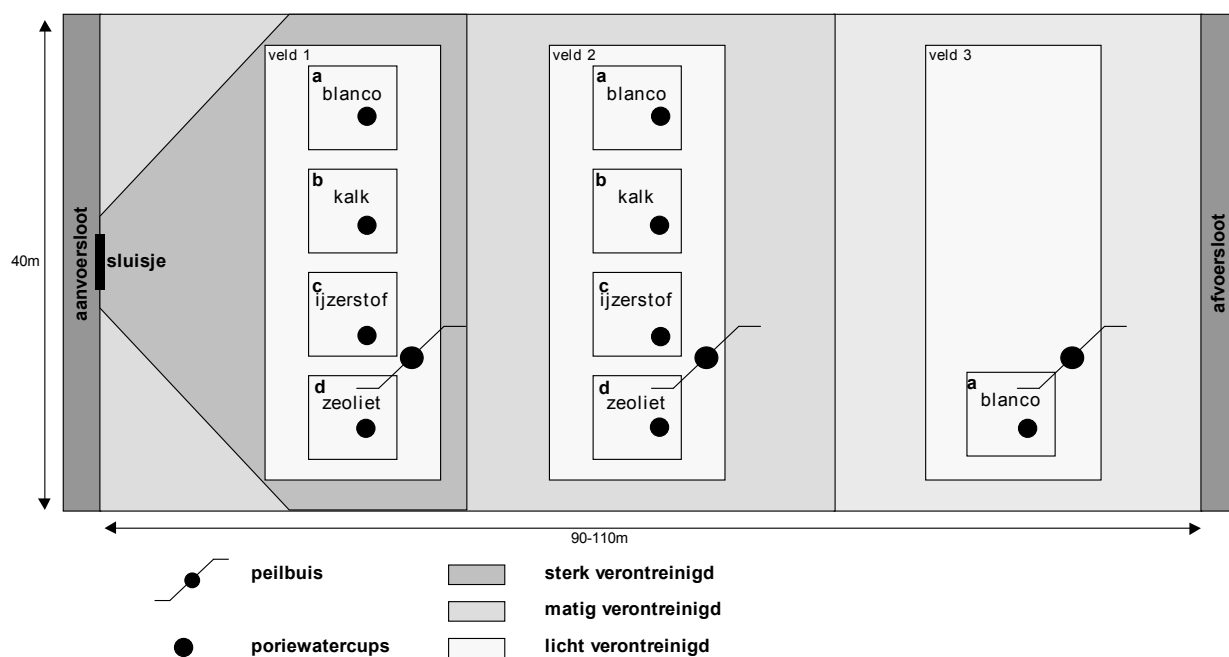


Fig. 4. Inrichting van de proeflocatie.

Voorafgaand aan het toevoegen van de additieven is het gras gemaaid en verwijderd. Voor de proefvakken met zeoliet en ijzerstof zijn doseringen toegepast van respectievelijk $37,5$ en 25 kg m^{-3} . De stoffen zijn gelijkmatig over het oppervlakte van het desbetreffende proefvak verdeeld en met een motorfrees met de bovenste 25 cm-mv van de bodem vermengd (ploegen). Kalk (Dolocal, een calcium-magnesium carbonaat) is in de vorm van grove pellets over de oppervlakte van het desbetreffende proefvak gestrooid. De toegepaste dosering bedraagt $0,1$ kg m^{-2} . Het gebruikte kalk, de dosering en de methode van behandeling, komt overeen met de kalkbehandeling die is toegepast in het Noorderbos. Zowel de met kalk- als de onbehandelde proefvakken zijn niet geploegd.

In elk proefvak zijn 2 sets met poreuze cups voor bemonstering van het poriewater geplaatst op twee verschillende diepten (0-20 cm en 40-60 cm–mv). Elke set bestaat uit 4 cups die verspreid in het horizontale vlak geplaatst zijn. Bemonstering vindt plaats door het aansluiten van een vacuümfles op de set met cups zodat op eenvoudige wijze bemonstering van het poriewater mogelijk is [Alterra werkvoorschriften no. E3200, E3202 en E3203]. In elk proefveld is 1 peilbuis geplaatst in het freatische grondwater (filterinstelling circa 1,5-2,5 m-mv) conform de richtlijnen van [NEN-5766, 1990]. De peilbuizen zijn geplaatst aan de benedenstroomse zijde van het proefveld.

Tevens zijn verspreid over het Noorderbos op 24 meetpunten monsters genomen ter bepaling van de potentieel beschikbare fracties zware metalen. De posities van de meetpunten zijn zodanig dat zowel sterk als minder verontreinigde zones zijn bemonsterd, zodat een goed beeld is verkregen van de verspreiding van de potentieel beschikbare metaalfraction. Bij de bepaling van de posities van de meetpunten is gebruik gemaakt van de beschikbare bodemkwaliteitskaart [Witteveen+Bos, 1999]. De meetpunten zijn door middel van dGPS de x- en y-coördinaten bepaald (meetnauwkeurigheid $\pm 0,5$ m). Dit is echter niet in alle gevallen mogelijk gebleken, omdat door een nabij gelegen radio- en TV-toren het voor dGPS vereiste FM-radiosignaal gestoord wordt. Deze locaties zijn door middel van GPS (nauwkeurigheid ± 20 m) en ten opzichte van een vast punt ingemeten.

4.2 Bemonstering van de proefvelden en meetpunten

De 24 meetpunten zijn bemonsterd op 13 april 2000. Met een Edelmanboor is tot een diepte van 1 meter beneden maaiveld de grond opgeboord en is het bodemprofiel beschreven. In principe zijn de bodemlagen 0,0-0,2 en 0,4-0,8 meter beneden maaiveld bemonsterd, waarbij is voorkomen dat op het oog verschillende bodemlagen zijn gemengd.

Tijdens deze meetronde zijn eveneens de proefvelden uitgezet en zijn de monsters genomen voor de controle van het gradiënt.

De monsters voor de eerste monitoringsronde (t_0) zijn genomen op 15 mei 2000. Het benodigde monstermateriaal is verzameld door per proefvak met een Edelmanboor de bovenste 20 centimeter van de grond te bemonsteren. De aanwezige strooisel- en/of zodenlaag is verwijderd. Voor de ecologische analyses zijn per proefveld de monsters van de 4 proefvakken samengevoegd tot 1 mengmonster. Voor de chemische analyses is per proefvak bemonsterd.

Tijdens de eerste monitoringsronde is eveneens het grondwater bemonsterd conform NEN-5744, [1991]. De genomen grondwatermonsters zijn in het veld gefiltreerd over een $0,45 \mu\text{m}$ filter. De grondwatermonsters zijn met salpeterzuur geconserveerd. Omdat het niet mogelijk was om, voorafgaand aan het toedienen van de additieven, de poriewatercups te plaatsen, zijn de grondmonsters geëxtraheerd met $0,002$ M calciumnitraat.

De tweede monitoringsronde ($t_{1/2}$) is uitgevoerd op 28 en 29 november 2000, circa een half jaar na toediening van de additieven. De bemonsteringsstrategie voor de grond is gelijk aan de eerste monitoringsronde, met het verschil dat voor de ecologische analyses per proefvak is bemonsterd en dat voor bemonstering van het poriewater gebruik is gemaakt van de poriewatercups.

Een gedeelte van het bemonsterde poriewater is direct na aankomst in het laboratorium ingevroren en overgebracht naar AquaSense voor de uitvoering van de Microtox-test.

4.3 Chemisch onderzoek

De uitgevoerde chemische analyses zijn samengevat in tabel 2. De chemische analyses zijn uitgevoerd door Alterra conform de geldende werkvoorschriften [nr. E0100, E0103, E1004, E1301, E1304, E1306 en E1307].

Tabel 2. Uitgevoerde chemische analyses.

onderdeel	matrix	analyses
monitoringsronde t_0	grond	<ul style="list-style-type: none"> - totaal gehalte zware metalen (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) - totaalgehalte overige elementen (Al, Fe, Mg, Ca, K, Mn, Na, P, S) - organische stof
	poriewater (extractie)	<ul style="list-style-type: none"> - zware metalen (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) - overige elementen (Al, Fe, Mg, Ca, K, Mn, Na, P, S) - DOC - zuurgraad en elektrisch geleidingsvermogen
	grondwater	<ul style="list-style-type: none"> - zware metalen (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) - overige elementen (Al, Fe, Mg, Ca, K, Mn, Na, P, S) - zuurgraad en elektrisch geleidingsvermogen
monitoringsronde $t_{1/2}$	grond	<ul style="list-style-type: none"> - totaal gehalte zware metalen (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) - totaal gehalte overige elementen (Al, Fe, Mg, Ca, K, Mn, Na, P, S) - potentieel beschikbaar gehalte metalen (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) - potentieel beschikbaar gehalte overige elementen (Al, Fe, Mg, Ca, K, Mn, Na, P, S) - zuurgraad
	poriewater	<ul style="list-style-type: none"> - zware metalen (As, Cd, Cr, Zn) - nutriënten (P) - zuurgraad
meetpunten	grond	<ul style="list-style-type: none"> - potentieel beschikbaar gehalte zware metalen (As, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) - potentieel beschikbaar gehalte overige elementen (Al, Fe, Mg, Ca, K, Mn, Na, P, S) - organische stof
	poriewater (extractie)	<ul style="list-style-type: none"> - zware metalen (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) - overige elementen (Al, Fe, Mg, Ca, K, Mn, Na, P, S) - DOC - zuurgraad en elektrisch geleidingsvermogen

Met betrekking tot de concentraties aan zware metalen en overige kationen zijn twee extractie-methoden uitgevoerd. De eerste methode betreft een extractie met koningswater (aqua regia), waarbij gedroogd bodemmateriaal wordt gekookt in een mengsel van salpeterzuur (HNO_3) en zoutzuur (HCl). Met deze extractie worden metalen en overige elementen uit de bodem bijna volledig geëxtraheerd. De tweede methode betreft een mildere zuurextractie waarbij het bodemonster wordt geschud met 0,43 M salpeterzuur. Met deze methode wordt alleen de chemisch reactieve fractie geëxtraheerd, dit is de fractie die potentieel beschikbaar is.

4.4 Ecologisch onderzoek

Tabel 3 geeft een overzicht van de uitgevoerde ecologische analyses.

Tabel 3. Uitgevoerde ecologische analyses.

onderdeel	matrix	analyses
monitoringsronde t_0	grond	<ul style="list-style-type: none">- biomassa en groeisnelheid bacteriën- Bait-Lamina test- functionele groepen nematoden- bioassay met de regenworm <i>Lumbricus rubellus</i>- bioassay met de springstaart <i>Folsomia candida</i>
	poriewater	<ul style="list-style-type: none">- Microtox
monitoringsronde $t_{1/2}$	grond	<ul style="list-style-type: none">- biomassa en groeisnelheid bacteriën- Bait-Lamina test- functionele groepen nematoden- bioassay met de regenworm <i>Lumbricus rubellus</i>- bioassay met de springstaart <i>Folsomia candida</i>- bioaccumulatie in regenwormen
	poriewater	<ul style="list-style-type: none">- Microtox

Op basis van de resultaten van de eerste ronde is de bioassay met de regenworm op proeflocatie II komen te vervallen. In plaats daarvan zijn door Alterra op proeflocatie I per proefvak regenwormen verzameld en geanalyseerd op zware metalen.

De biomassa en groeisnelheid van bacteriën en de functionele groepen nematoden zijn tijdens de najaarsbemonstering alleen gemeten op de proefvelden I1 en I3, waarbij het aantal replica's is verdubbeld om de onzekerheid te verkleinen. De Microtox-test is tijdens de tweede monitoringsronde alleen uitgevoerd op proeflocatie I. De poriewatercups op proeflocatie II bevatten onvoldoende poriewater.

4.4.1 Veldinventarisaties

Met veldinventarisaties wordt in het veld of in grondmonsters een opname van de veldsituatie verricht, bijvoorbeeld de dichtheid en biodiversiteit van bodemorganismen. Tijdens fase A is een viertal veldinventarisaties uitgevoerd, namelijk biomassa van bacteriën, groeisnelheid van bacteriën, Bait-Lamina test en samenstelling van de nematodenpopulatie.

Biomassa en groeisnelheid bacteriën

Verontreiniging heeft dikwijls een direct verband met de groeisnelheid en soms ook met de biomassa van bacteriën. Vaak leiden oplopende concentraties verontreinigingen tot afname van deze parameters. De biomassa van de bacteriële populatie wordt vastgesteld met behulp van microscopische aantals- en volumebepalingen. De groeisnelheid van bacteriën wordt bepaald door het meten van de snelheid waarmee zij radioactief gelabeld leucine en thymidine inbouwen. Leucine is een aminozuur en wordt ingebouwd in eiwitten die onder andere worden gebruikt bij de celdeling. Hiermee wordt een indicatie verkregen over de snelheid van de eiwitsynthese en daarmee informatie over de activiteit van de bacterie. Thymidine is een base, één van de onderdelen waaruit het erfelijk materiaal (DNA) is opgebouwd. Hoe meer van het radioactief gelabelde thymidine wordt opgenomen, hoe sneller de reproductie van het DNA verloopt. Wanneer het DNA is gereproduceerd, zal de bacterie zelf delen. Inbouw van thymidine geeft dus informatie over de groeisnelheid.

Het totale aantal bacteriën en de afmetingen van de cellen is bepaald door middel van directe microscopische tellingen. Uit het aantal en de afmetingen zijn het biovolume en de biomassa be-

rekend. Deze metingen zijn uitgevoerd met behulp van een confocale laserscan microscoop en automatische beeldverwerking. De groeisnelheid van bacteriën is bepaald door de inbouw van radioactief gelabelde ^3H -thymidine en ^{14}C -leucine in respectievelijk DNA en eiwitten te meten. Omdat de thymidine met ^3H en de leucine met ^{14}C is gelabeld kunnen beide parameters (de microbiële DNA- en eiwitsynthese) in één bepaling worden gemeten. Het verband van de groeisnelheid met thymidine-inbouw is constanter dan met leucine-inbouw. Daar staat tegenover dat sommige soorten bacteriën, vooral anaërobe, thymidine niet kunnen inbouwen, terwijl leucine door vrijwel alle bacteriën kan worden ingebouwd. Daarom worden beide methoden gelijktijdig gebruikt.

Bait-Lamina test

De Bait-Lamina test is oorspronkelijk ontwikkeld om de activiteit van microflora en macrofauna in strooisellagen te meten [Kratz, 1998]. Bij normaal gebruik worden de strips in de organische bosbodem gestoken en wordt de substraatconsumptie na enkele weken gescoord. De test wordt sinds enkele jaren ook toegepast in minerale bodems ter beoordeling van ecotoxicologische effecten.

De Bait-Lamina test bestaat uit PVC-strips met een lengte van circa 0,5 bij 15 cm. In de strips zijn 16 gaatjes geboord die zijn opgevuld met cellulosesubstraat, zemelen en actieve kool. De strips worden in de bodem of strooisellaag gestoken. Dit kan direct in het veld plaatsvinden, maar ook in bodemmonsters onder laboratoriumomstandigheden, zoals in dit project is gebeurd. Het substraat zal worden geconsumeerd door het aanwezige bodemleven. Door na een gegeven blootstellingsduur het aantal geconsumeerde eenheden te tellen ("lege gaatjes"), kan de activiteit van het aanwezige bodemleven worden bepaald. Naar verwachting zal het bodemleven in niet verontreinigde bodems meer substraat consumeren dan op verontreinigde bodems, doordat het bodemleven in grotere aantallen aanwezig en actiever zal zijn. Voor meer informatie over de Bait-Lamina test wordt verwezen naar Kratz [1998].

De grond is met demi-water bevochtigd tot 50% van de Water Holding Capacity. Per proefveld zijn 5 potten gevuld. Na 1 week incuberen bij 18°C en een dag/nacht cyclus van 12/12 uur zijn in elke pot 5 Bait-Lamina strips gestoken. Elke strip bevat 16 gaatjes die zijn gevuld met een substraat van zemelen, cellulose en actieve kool. De potten zijn 4 weken geplaatst in een klimaatkamer onder dezelfde omstandigheden als tijdens de incubatie. Elke week zijn de strips gecontroleerd en is de substraatconsumptie geteld (aantal gaatjes). Indien nodig is het vochtgehalte met demi-water aangevuld tot het oorspronkelijke gewicht van de potten met strips. Het effect van de Bait-Lamina strips wordt weergegeven als de totale substraatconsumptie (aantal gaatjes) per pot.

Functionele groepen nematoden

Het aantal nematoden is afhankelijk van de bodemkwaliteit en (vooral) van de gewasproductie. Bodemverontreiniging kan leiden tot lagere aantallen nematoden. Ook kan bodemverontreiniging de taxonomische samenstelling van de nematodenpopulatie veranderen. Verontreinigde bodems bevatten vaak een relatief groter aandeel van snel reproducerende soorten (r-strategen), terwijl in schone bodems ook traag groeiende en langzaam reproducerende soorten (K-strategen) aanwezig zijn. Deze soorten zullen de r-strategen in stabiele bodems wegconcurreren.

Nematoden werden uit de grond geïsoleerd met een Oostenbrink trechter (elutriator) en vervolgens geteld en gedetermineerd onder de microscoop.

4.4.2 Bioassays

Bij bioassays worden organismen toegevoegd aan bodemmonsters en na een gestandaardiseerde blootstellingsduur de effecten gemeten. Bij beide meetronden zijn drie bioassays

gebruikt, namelijk de bioassays met de regenworm *Lumbricus rubellus*, de bioassays met de springstaart *Folsomia candida* en de Microtox test.

Bioassay met de regenworm *Lumbricus rubellus*

Regenwormen zijn ideale testorganismen. Doordat regenwormen intensief contact hebben met de bodem, zijn regenwormen gevoelig voor bodemverontreiniging. Bovendien vormen regenwormen een belangrijke voedselbron voor kleine zoogdieren, amfibieën, reptielen en (roof)vogels, zijn zij belangrijke organismen bij afbraak van (dood) organisch materiaal en zorgen zij voor beluchting van de bodem. De bioassays met regenwormen geven daarom informatie over het functioneren van de bodem en over risico's voor organismen hoger in de voedselketen.

Bij de bioassay worden regenwormen gedurende een bepaalde tijdsduur blootgesteld aan (verontreinigde) grond. Bodemverontreiniging kan leiden tot verhoogde sterfte en een verminderde groei en reproductie (coconproductie).

Reproductieproef regenwormen

Potten met 0,6 liter grond zijn geënt met batches van vijf wormen (*Lumbricus rubellus*). Als controle is een standaardgrond (KOBG), die door Alterra wordt gebruikt als referentie, in de proef meegenomen. De potten zijn geïncubeerd bij een constante temperatuur van 15°C. Na een periode van vier weken zijn de geproduceerde cocons verzameld en geteld.

Groeiproef regenwormen

Potten met 0,5 liter grond zijn geënt met pas uit de cocon gekomen juveniele regenwormen (*Lumbricus rubellus*). Als referentie is de KOBG grond in de proef meegenomen. De potten zijn geïncubeerd voor een periode van 9 weken bij een constante temperatuur van 15°C. Na 9 weken zijn de wormen verzameld en is het natgewicht per batch bepaald.

Bioassay met de springstaart *Folsomia candida*

Springstaarten zijn vleugelloze insecten. Door hun springvork ("staart") snel uit de klappen, kunnen zij enkele centimeters ver springen. De toegepaste bioassay maakt gebruik van de springstaart *Folsomia candida* (Willem). Deze springstaart is een algemene bewoner van bosbodems en kan dichtheden bereiken van 1.000.000 exemplaren per vierkante meter.

De bioassay met de springstaart is een gestandaardiseerde test voor het bepalen van de effecten van nieuwe en bestaande chemicaliën. De test is eveneens goed bruikbaar om ecologische effecten van bodemverontreiniging te bepalen. Voor de test worden de springstaarten onder laboratoriumomstandigheden gedurende een bepaalde tijdsduur blootgesteld aan (verontreinigde) grond. De aanwezigheid van bodemverontreiniging kan leiden tot een toename van de sterfte en afname van groei en reproductie.

De bioassays is uitgevoerd door AquaSense volgens een methode die is afgeleid van de ISO 11267 richtlijn [1999]. Per locatie zijn 4 glazen potten met een inhoud van 100 ml gevuld met 20 gram grond, welke is bevochtigd tot 60% WHC. Aan elke pot zijn 10 springstaarten (*Folsomia candida*), in leeftijd variërende tussen de 10 en 12 dagen, toegevoegd. De springstaarten zijn gevoerd met enkele korrels bakkersgist (dr. Oetker). De organismen zijn vier weken aan de grond blootgesteld bij een temperatuur van 20±2 °C en een dag-nacht cyclus van 16/8 uur. Gedurende de blootstellingsduur zijn twee maal per week de potjes met milli-Q water tot het oorspronkelijke gewicht aangevuld. Er was echter nauwelijks sprake van vochtverlies. Indien nodig zijn de springstaarten met gist gevoerd.

Na vier weken blootstelling zijn de bioassays beëindigd. De inhoud van de potten is met water gespoeld en opgevangen in een bekersglas. De monsters zijn vervolgens gefixeerd met ethanol (50%). Het aantal adulte en juveniele springstaarten is geteld onder een binoculair.

Voor de bioassays met de springstaart *Folsomia candida* is als controle OECD getest. Deze grond bevat 10 % organisch materiaal en 20 % lutum. Reproductie op deze grond moet minimaal 100 juvenielen bedragen voor een geldige test.

Microtox-test

Bij de Microtox-test wordt gebruikt gemaakt van de mariene bacterie *Vibrio fischeri* en wordt, in tegenstelling tot de overige bioassays, uitgevoerd in poriewater. De Microtox-test is een veel gebruikte en gestandaardiseerde test. De bacterie zendt onder normale omstandigheden licht uit (bioluminescentie) dat wordt gemeten met een fotospectrometer (Microtox-apparaat). De aanwezigheid van verontreiniging leidt tot afname van de bioluminescentie.

Voor de test wordt een verdunningsreeks gemaakt van het poriewater met een zoutoplossing en een oplossing met de bacterie. Na verschillende tijdstippen wordt de bioluminescentie in de verdunningsreeks gemeten. Op basis van de resultaten kan een EC₂₀-waarde worden berekend. De verdunning die leidt tot 20% afname van de bioluminescentie ten opzichte van de blanco (zoutoplossing). Hoe lager deze EC₂₀-waarde is, hoe toxischer het monster.

De Microtox is uitgevoerd conform een methode die is afgeleid van ISO 11348-3 [1998]. Van de bodemextracten is een verdunningsreeks gemaakt met de testoplossing waarin de bacterie *Vibrio fischeri* aanwezig is. De volgende verdunningen zijn getest: 45; 22,5; 11,3 en 5,6 volume%. Met een lichtmeter (Microtox®) is de afname van de bioluminescentie na 5, 15 en 30 minuten gemeten bij een incubatietemperatuur van 15°C. De analyses zijn in duplo uitgevoerd.

Voor aanvang van de test zijn in de testoplossing ter controle een aantal fysische en chemische parameters gemeten (zuurstof, pH, nitraat, ammonium en geleidbaarheid) en vergeleken met de randvoorwaarden. Wanneer de testen voldoen aan de randvoorwaarden, worden geen negatieve effecten van deze parameters verwacht en kunnen eventueel waargenomen effecten worden toegeschreven aan de verontreinigingen in de monsters.

4.4.3 Bioaccumulatie in regenwormen

Bij het meten van bioaccumulatie worden in het veld verzamelde- of in het laboratorium blootgestelde organismen geanalyseerd op de opgenomen verontreinigingen. Hierdoor kan een indicatie worden verkregen van de biologische beschikbaarheid, effecten en risico's op doorvergiftiging naar organismen hoger in de voedselketen.

Voor bepaling van bioaccumulatie zijn tijdens de najaarsbemonstering op de proefvelden uit proeflocatie I regenwormen verzameld. De verzamelde regenwormen zijn in het laboratorium met kraanwater schoongespoeld en vervolgens enkele dagen geplaatst op vochtig filterpapier. Gedurende deze tijd legen de wormen hun darmen, zodat wordt voorkomen dat tijdens de analyse grond en/of darminhoud (eveneens grond) wordt geanalyseerd.

De regenwormen zijn geanalyseerd op zware metalen conform de bij Alterra geldende werkvoorschriften [werkvoorschriften 1304 en 1307].

4.5 **Literatuurstudie naar doorvergiftiging van zware metalen**

Om een indicatie te verkrijgen van doorgifte van de aanwezige verontreiniging met zware metalen naar organismen hoger in de voedselketen, is een literatuurstudie uitgevoerd. Hierbij zijn de resultaten van de analyses van de metaalconcentraties in regenwormen uit het Noorderbos vergeleken met resultaten van vergelijkbare onderzoeken. Doordat in enkele studies naast de concentraties aan metalen in regenwormen ook de concentraties in zoogdieren zijn bepaald, kan tevens een indruk worden verkregen van de risico's van doorvergiftiging.

RESULTATEN

5.1 Chemisch onderzoek

In deze paragraaf worden de resultaten van het uitgevoerde chemisch onderzoek besproken. De data van de voor- en najaarsbemonstering zijn opgenomen in respectievelijk bijlage A en B.

5.1.1 Proeflocaties

Bodem

Tijdens de voorjaarsbemonstering (t_0) is op proeflocatie I een duidelijk gradiënt zichtbaar in de verontreiniging met metalen. De concentraties zijn het hoogst in proefveld 1 nabij de inlaat en nemen af met toenemende afstand tot de inlaat (velden 2 en 3). Het met aqua regia ('totaalgehalte') geëxtraheerde gehalte chroom in veld 1 van proeflocatie I is met gemiddeld 3.800 mg kg^{-1} zeer hoog. Proeflocatie II laat een minder duidelijke gradiënt van de verontreiniging zien. De verontreinigingsgraad ligt voor locatie II lager dan voor locatie I.

Figuur 5 geeft de resultaten weer van de totale- en chemisch reactieve fractie (respectievelijk Aqua Regia en HNO_3) voor arseen, cadmium, chroom en zink voor de najaarsbemonstering ($t_{1/2}$). Omdat de behandeling met de additieven geen invloed heeft op de totale en chemisch reactieve fracties, is in de figuur de gemiddelde concentraties (\pm standaarddeviatie) van de vier oppervlakbehandelingen weergegeven.

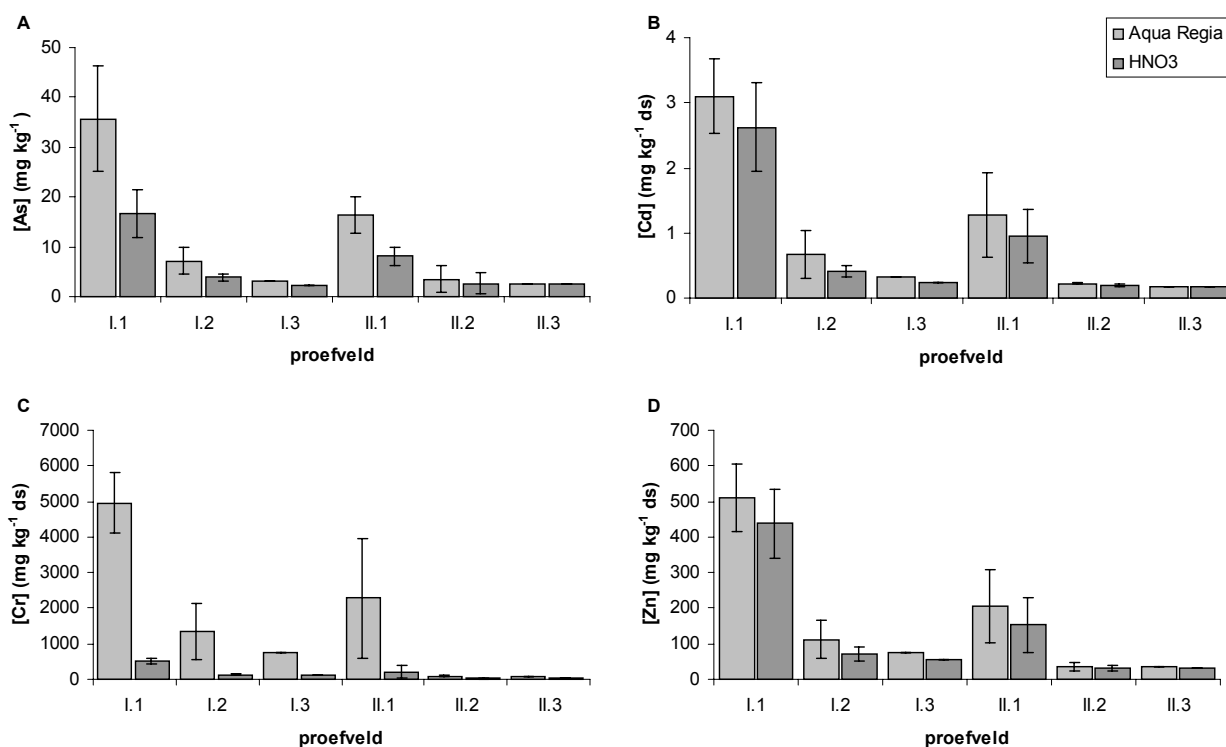


Fig. 5. Concentratieverloop van arseen (A), cadmium (B), chroom (C) en zink (D) in de grond op de proeflocaties I en II geëxtraheerd met aqua regia en $0,43 \text{ M HNO}_3$. Waarden zijn gemiddelden \pm standaarddeviatie ($n=4$).

Proeflocatie I laat een duidelijk gradiënt zien in de verontreiniging met metalen, maar ook met fosfor en zwavel (bijlage A). Vergelijkbaar als bij de voorjaarsbemonstering laten de concentraties een duidelijk gradiënt zien. Uit de met 0,43 M HNO₃ geëxtraheerde fractie blijkt dat van de totale hoeveelheid chroom maar 10% chemisch reactief is. Voor cadmium en zink ligt dit tussen de 80 en 90%.

In de met ijzer behandelde proefvakken zijn ijzerconcentraties gemeten tot circa 30.000 mg kg⁻¹. Dit is een factor 3 of meer hoger dan de resterende proefvakken. De concentraties aan kalium en natrium is in de met zeoliet behandelde proefvakken duidelijker hoger dan de overige proefvakken. De concentraties van de overige elementen zijn niet beïnvloed door de oppervlaktebehandelingen (bijlage A).

De concentraties in diepere bodemlagen (40-60 cm) zijn lager dan aan de oppervlakte. De gradiënt is niet meer zichtbaar.

Poriewater

Tijdens de voorjaarsbemonstering zijn de poriewaterconcentraties bepaald door middel van een extractie met CaNO₃, omdat de poriewatercups nog niet geplaatst konden worden. Uit de resultaten blijkt dat er sprake is van een duidelijk gradiënt met metalen die afneemt bij toenemende afstanden van de aanvoersloot. De verschillen tussen de verschillende proefvelden zijn minder groot dan bij de bodemconcentraties. Dit is veroorzaakt door het hoge percentage organisch materiaal en ijzeroxiden nabij de aanvoersloten (proefveld I.1 en II.1), die de beschikbaarheid van metalen beperken.

Figuur 6 geeft de resultaten weer van de poriewaterconcentraties tijdens de najaarsbemonstering. De gemeten concentraties metalen in het bodemvocht op de onbehandelde proefvakken vertonen een vergelijkbaar gradiënt als tijdens de voorjaarsbemonstering. De resultaten van beide monitoringsronden zijn moeilijk vergelijkbaar vanwege de verschillen van het verkrijgen van het poriewater.

Voor de proefvelden I2 (zeoliet) en II1 (kalk) zijn geen gegevens beschikbaar met betrekking tot de bodemvochtconcentraties. Deze poriewatercups bevatten onvoldoende poriewater voor analyses. Er is een duidelijke invloed waarneembaar van de behandeling op de concentraties metalen in het bodemvocht. De concentraties van chroom en arseen worden sterk verlaagd door toevoeging van ijzer. Toevoeging van ijzer of zeoliet verlaagt de concentraties van tweewaardige metaalionen zoals zink. Het effect van kalk is vergelijkbaar met de onbehandelde proefvelden.

De behandeling met ijzer leidt niet tot hogere ijzerconcentraties in het poriewater. Wel leidt ijzer tot verlaging van de uitspoeling van fosfaat. De natriumconcentratie in het poriewater bij de met zeoliet behandelde proefvelden is wel verhoogd. De genoemde effecten zijn niet waargenomen bij de behandeling met kalk. De behandelingen hebben geen effect op de overige elementen, de zuurgraad en de pH.

In diepere bodemlagen (40-60 cm-mv) zijn in het poriewater de concentraties duidelijk lager dan in de toplaag. De gradiënt en de invloed van de additieven zijn in diepere bodemlagen niet meer zichtbaar.

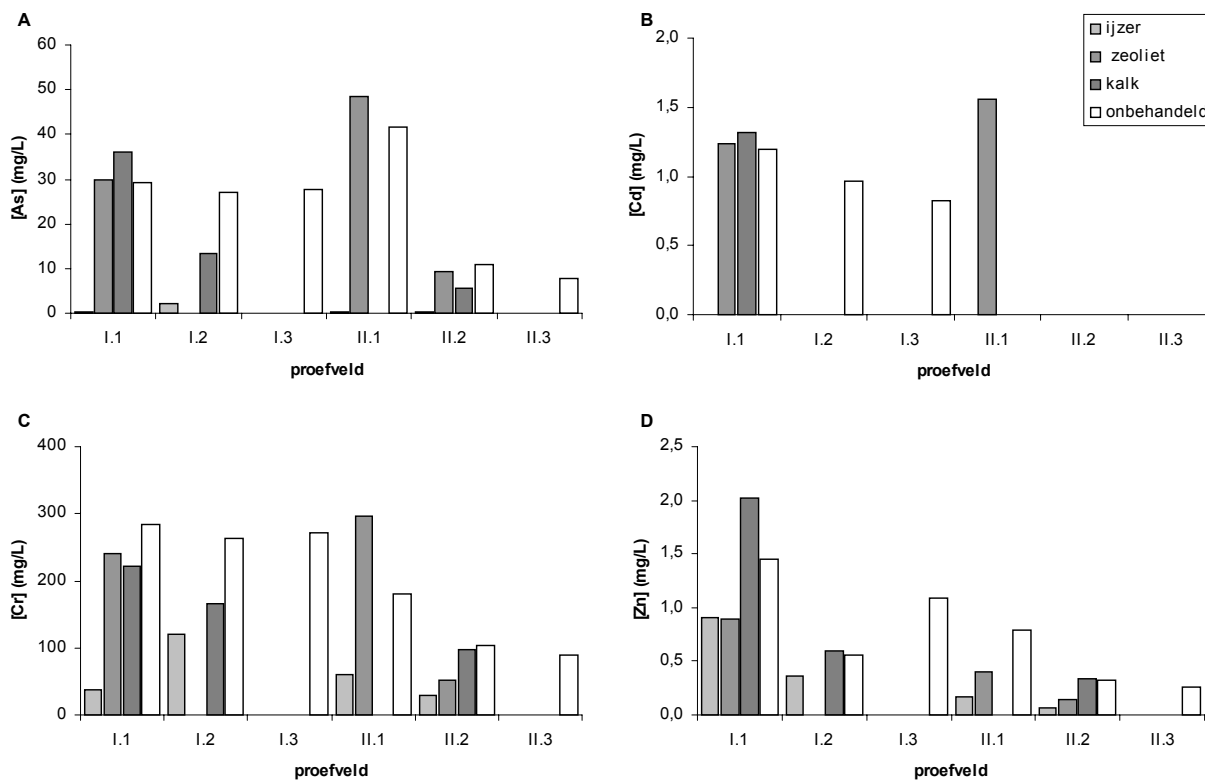


Fig. 6. Concentratieverloop van arseen (A), cadmium (B), chroom (C) en zink (D) in het bodemvocht op de proeflocaties.

Grondwater

In het grondwater is niet tot nauwelijks een gradiënt van de zware metaalverontreiniging zichtbaar. De hoogste concentraties worden gemeten in het grondwater ter plaatse van proefveld I.3. Met name de concentraties chroom en nikkel zijn hoog (respectievelijk 33,78 en 159,94 $\mu\text{g l}^{-1}$) en overschrijden de interventiewaarde.

5.1.2 Monitoringslocaties

Op de meetpunten verspreid over het Noorderbos zijn de bodemmonsters geëxtraheerd met 0,43 M HNO_3 , zodat een beeld is verkregen van de potentiële beschikbaarheid van zware metalen. Verspreid over het Noorderbos komen hoge concentraties potentieel beschikbaar arseen voor. De hoogste concentraties worden gemeten in de bovenste 40 centimeter nabij de voormalige aanvoersloten. De resultaten komen overeen met voorgaande onderzoeken. De concentraties aan zink en nikkel zijn nabij de aanvoersloten eveneens hoger dan bij de afvoersloten. De concentraties aan de overige metalen zijn onderling vergelijkbaar en vertonen geen relatie met de ligging ten opzichte van de voormalige aanvoersloten. De concentraties aan fosfor en zwavel zijn nabij de aanvoersloten hoger dan bij de afvoersloten.

In het poriewater zijn geen eenduidige relaties gevonden tussen macronutriënten en de ligging ten opzichte van de voormalige aanvoersloten. Het bodemvocht is over het algemeen licht zuur, variërend tussen 4 en 6. De concentraties arseen, chroom, cadmium en zink in het poriewater worden duidelijk beïnvloed door de pH. Voor chroom en zink wordt dit in figuur 7 geïllustreerd.

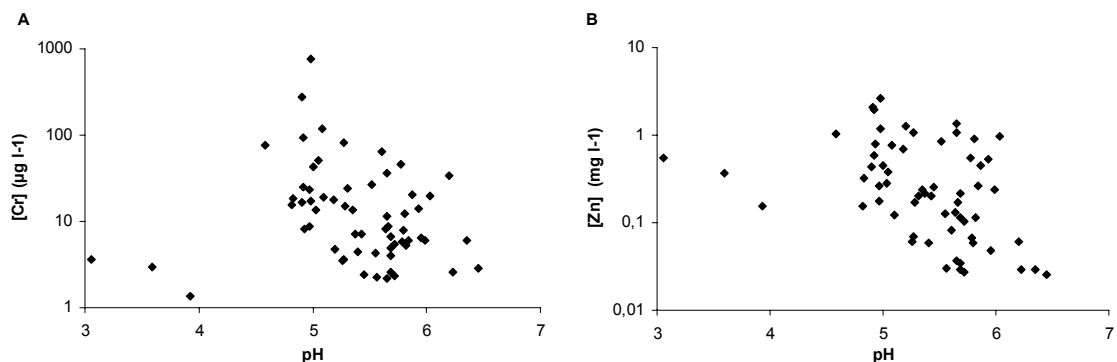


Fig. 7. Relatie tussen pH en concentraties aan chroom (A) en zink (B) in het bodemvocht op de meetpunten.

5.2 Ecologisch onderzoek

In deze paragraaf zijn de resultaten van het uitgevoerde ecologische onderzoek beschreven.

5.2.1 Veldinventarisaties

Biomassa en groeisnelheid bacteriën

De bacteriële biomassa tijdens de voorjaarsbemonstering (t_0) is extreem laag en variabel. De kwaliteit van de preparaten is goed. Ze zijn 3 keer geteld en de gemiddelden en standaardfout zijn weergegeven in tabel 4. De biomassa lijkt toe te nemen met de verontreiniging. Ook de bacteriële thymidine inbouw (maat voor DNAsynthese, celdeling en groei) is buitengewoon laag. Waarom de leucine inbouw (eiwitsynthese = turnover en groei van biomassa) wel hoog is, is niet duidelijk. De thymidine en leucine inbouw tijdens de voorjaarsbemonstering is laag en daarom is tijdens de najaarsbemonstering ($t_{1/2}$) de incubatieduur verlengd van 2 uur naar 4 uur.

Tabel 4. Biomassa en groeisnelheid (inbouw thymidine en leucine) bacteriën. Waarden zijn gemiddelden \pm standaardfout (t_0 : n=3, $t_{1/2}$: n=6). n.b. = niet bepaald.

proefveld	behandeling ($t_{1/2}$)	biomassa bacteriën ($\mu\text{g C/g droge grond}$)		thymidine-inbouw (pmol/g/h)		leucine-inbouw (pmol/g/h)	
		t_0	$t_{1/2}$	t_0	$t_{1/2}$	t_0	$t_{1/2}$
I1	ijzerstof	25,30 \pm 2,13	85,00 \pm 12,14	3,11 \pm 0,97	23,74 \pm 1,21	415 \pm 42	383 \pm 21
	zeoliet		104,24 \pm 24,57		22,09 \pm 0,91		372 \pm 9
	kalk		43,72 \pm 9,35		33,28 \pm 0,26		518 \pm 3
	onbehandeld		104,83 \pm 16,64		19,62 \pm 1,63		309 \pm 1,63
I2		12,03 \pm 8,19	n.b.	5,07 \pm 0,91	n.b.	545 \pm 77	n.b.
I3	onbehandeld	10,57 \pm 5,33	17,97 \pm 6,04	3,58 \pm 0,52	17,54 \pm 0,60	416 \pm 22	300 \pm 8
II1		7,34 \pm 2,48	n.b.	15,82 \pm 6,27	n.b.	836 \pm 46	n.b.
II2		20,98 \pm 4,03	n.b.	2,19 \pm 0,84	n.b.	322 \pm 22	n.b.
II3		10,53 \pm 4,53	n.b.	2,89 \pm 0,85	n.b.	238 \pm 16	n.b.

De bacteriepopulatie (biomassa) is gedurende het seizoen toegenomen (tabel 4). Dit is ook te zien bij de inbouw van thymidine, maar niet bij de inbouw van leucine. De biomassa tijdens de najaarsbemonstering is vijfmaal hoger in het zwaar verontreinigde onbehandelde proefvak dan in het licht verontreinigde onbehandelde proefvak. De bacteriële groeisnelheid (gemeten als thymidine en leucine inbouw) is echter ongeveer gelijk. Er zijn dus wel verschillen tussen licht en

zwaar verontreinigde grond, maar er zijn geen aanwijzingen voor negatieve (toxische) effecten van de verontreiniging op de bacteriën.

Toevoeging van zeoliet en ijzer hebben geen duidelijk effect op de biomassa en groeisnelheid van bacteriën. Kalk heeft dit wel, het verhoogt de groeisnelheid terwijl het de biomassa verlaagt.

Bait-Lamina test

Tijdens de voorjaarsbemonstering is nauwelijks sprake van substraatconsumptie en er zijn geen verschillen waarneembaar tussen de verschillende proefvelden. De consumptie is op het meest verontreinigde proefveld van proeflocatie I (± 7 gaatjes) hoger dan bij de overige proefvelden. Door de grote spreiding, die bij alle proefvelden waarneembaar is, zijn de verschillen niet significant.

De spreiding van de waarnemingen is groot. Een mogelijke oorzaak kan de aanwezigheid van grotere organismen zijn, zoals keverlarven en regenwormen die zich eveneens voeden met het substraat uit de strips. Door hun lagere dichtheden is de kans dat deze in enkele potten aanwezig zijn groot. Daarom is tijdens de najaarsbemonstering getracht zoveel mogelijk van dergelijke organismen te verwijderen.

De resultaten van de najaarsbemonstering zijn grafisch weergegeven in figuur 8. Substraatconsumptie tijdens de najaarsbemonstering op de onbehandelde proefvelden is circa een factor 1,5 tot 10 hoger dan tijdens de voorjaarsbemonstering.

De spreiding tijdens de najaarsbemonstering van de verschillende replica's is duidelijk lager dan tijdens de voorjaarsbemonstering. De aanbeveling om zoveel mogelijk macrofauna te verwijderen uit de monsters lijkt effect te hebben gehad. De afgenomen spreiding kan ook worden verklaard door de hoge substraatconsumptie.

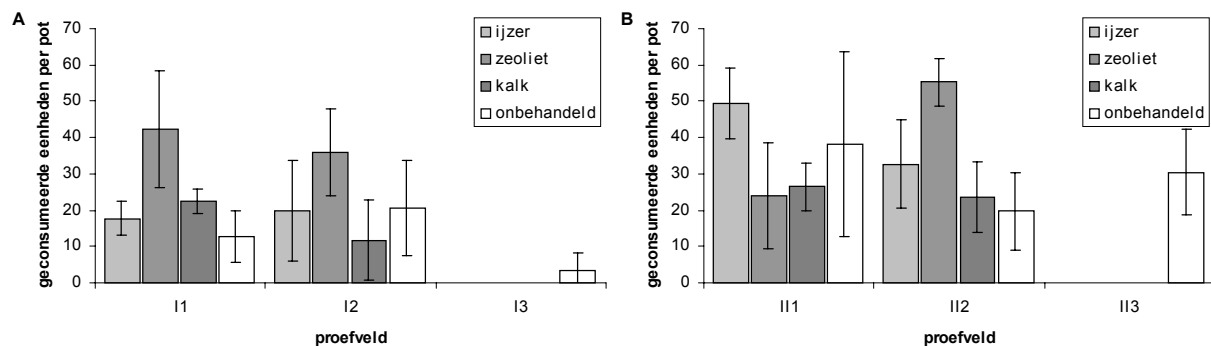


Fig. 8. Resultaten najaarsbemonstering Bait-Lamina test op de proeflocaties I (A) en II (B). Foutbalken geven de standaarddeviatie weer (n=4).

Op beide proeflocaties is geen toenemende substraatconsumptie te zien bij afnemende gehalten aan zware metalen. Substraatconsumptie op de met zeoliet behandelde proefvakken is significant hoger dan bij de overige proefvakken. De overige additieven hebben geen effecten laten zien.

Functionele groepen nematoden

Tabel 5 geeft de resultaten weer van de nematodentellingen. Op proeflocatie I is een duidelijke toename waarneembaar bij afnemende verontreiniging voor zowel de voor- als najaarsbemonstering. Dit beeld is niet zichtbaar op proeflocatie II. Het aantal nematoden op het meest verontreinigde proefveld (I1) is gedurende het seizoen toegenomen, op het minst verontreinigde proefveld (I3) is echter een afname waargenomen.

Tabel 5. Nematodenaantallen. Waarden zijn gemiddelden \pm standaardfout (t_0 : n=3, $t_{1/2}$: n=6). n.b. = niet bepaald.

proefveld	behandeling ($t_{1/2}$)	aantal nematoden per 100 g grond	
		t_0	$t_{1/2}$
I1	ijzer	6.072 \pm 170	15.822 \pm 223
	zeoliet		16.032 \pm 1.126
	kalk		12.815 \pm 1.956
	onbehandeld		15.666 \pm 3.123
I2		5.693 \pm 459	n.b.
I3	onbehandeld	15.452 \pm 1.631	7.725 \pm 1.129
II1		5.665 \pm 364	n.b.
II2		7.036 \pm 1.472	n.b.
II3		2.421 \pm 360	n.b.

Een tweetal monsters met extreme aantallen nematoden (I.3 en II.3) en een monster met een gemiddeld aantal (I.2) zijn tijdens t_0 taxonomisch geanalyseerd. Tabel 6 vat deze resultaten samen. Er zijn twintig taxa geïdentificeerd die in alle monsters voorkwamen. Dominant zijn de bacterivore Cephalobidae en herbivore *Tyleuchorhynchus* sp. Hogere (4.350) en extreem hoge (15.950) aantallen komen tot stand door hoge aantallen van de twee dominante taxa, onder min of meer gelijkblijvende aantallen behorende tot de andere taxa.

Tabel 6. Resultaten taxonomische analyses van een drietal monsters.

Soort	Aantal nematoden per 100 gram grond (%)		
	I.2	I.3	II.3
Bacterivoren	2.871 (66%)	5.385 (34%)	1.689 (59%)
Cephalobidae	1.740 (40%)	4.469 (28%)	880 (31%)
<i>Rhabditis</i>	58 (1%)	610 (4%)	162 (6%)
<i>Teratocephalus</i>	290 (7%)	102 (+)	126 (4%)
<i>Metateraocephalus</i>	435 (10%)	102 (+)	287 (10%)
<i>Plectus</i>	203 (5%)	+ (+)	126 (4%)
<i>Monhystera</i>	87 (2%)	+ (+)	90 (3%)
<i>Prismatolaimus</i>	58 (1%)	102 (+)	18 (1%)
<i>Diplogaster</i>		+ (+)	
Herbivoren	1.421 (33%)	10.464 (66%)	1.078 (39%)
<i>Tyleuchorhynchus</i>	870 (30%)	10.159 (64%)	521 (19%)
<i>Pratylenchus</i>	174 (6%)		72 (3%)
<i>Rotylenchus</i>	87 (3%)	203 (1%)	54 (2%)
<i>Trichodorus</i>	174 (6%)	102 (+)	305 (11%)
<i>Tylenchus</i>	116 (4%)		126 (4%)
<i>Hemicycliophora</i>		+ (+)	+
Fungivoren			36 (1%)
<i>Aphelenchoides</i>			36 (1%)
Omnivoren/predatoren	58 (1%)	102 (+)	(1%)
<i>Mononchus</i>	29 (0,5%)	102	+
<i>Dorylaimus</i>	29 (0,5%)		+
totaal	4.350 (100%)	15.951 (100%)	2.803 (100%)

Het aantal nematoden in het onbehandelde proefvak met zwaar verontreinigde grond is hoger dan in het proefvak met de onbehandelde licht verontreinigde grond (tabel 5). Behandeling van de zwaar verontreinigde grond heeft geen invloed op de nematodenaantallen.

5.2.2 Bioassays

Bioassay met de regenworm *Lumbricus rubellus*

De resultaten van de bioassay met de regenworm *Lumbricus rubellus* op proeflocatie I zijn weergegeven in figuur 9. Op de onbehandelde proefvakken op proeflocatie I neemt het gewicht van de regenwormen toe bij afnemende verontreiniging. Dit is zichtbaar tijdens zowel de voor- als de najaarsbemonstering en duidt op een toxisch effect op het meest verontreinigde proefveld. Op proeflocatie II zijn geen gewichtsveranderingen zichtbaar. Er zijn geen verschillen waarneembaar tussen de voor- en najaarsbemonstering.

De aanwezigheid van de gradiënt met zware metalen lijkt geen effect te hebben op de coconproductie. Op de onbehandelde proefvakken is geen toe- of afname gemeten. Wel is de coconproductie tijdens de voorjaarsbemonstering hoger.

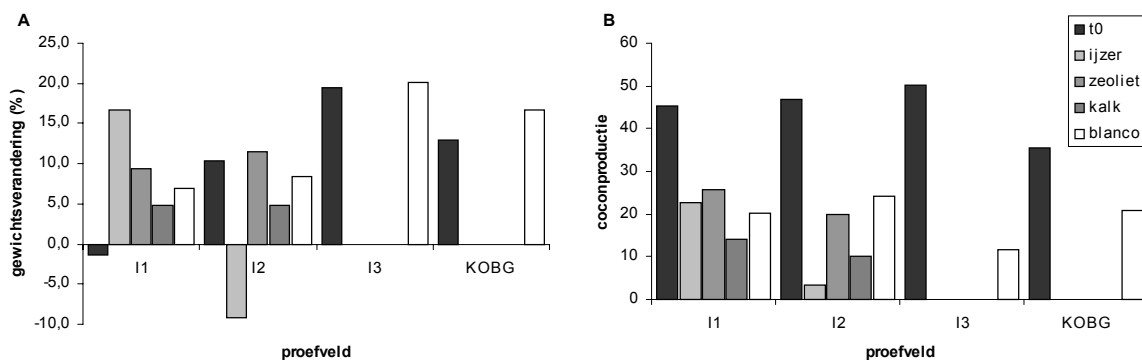


Fig. 9. Gewichtsverandering (A) en coconproductie (B) van *Lumbricus rubellus* na blootstelling aan verontreinigde grondmonsters en een controlemonster (KOBG).

De toevoeging van ijzer leidt tot tegenstrijdige resultaten. Ijzer geeft een positief effect voor het sterkst verontreinigde proefveld terwijl het een negatief effect heeft op het minder sterk verontreinigde proefveld. Zeoliet leidt tot een klein positief effect op zowel het sterk als minder sterk verontreinigde proefveld.

Bioassay met de springstaart *Folsomia candida*

Bij de bioassay met de springstaart *Folsomia candida* is een extra controlemonster getest, namelijk een gestandaardiseerde kunstgrond (OECD). Voor deze grond zijn randvoorwaarden opgesteld waaraan de resultaten van de test (groei en overleving) dienen te voldoen. Overschrijding van deze randvoorwaarden kan duiden op een slechte conditie van de testorganismen of storingen van de gebruikte voorzieningen. Voor zowel de voor- als de najaarsbemonstering hebben de resultaten op deze grond aan de randvoorwaarden voldaan.

De resultaten van de bioassay met de springstaart *Folsomia candida* worden weergegeven in figuur 10. De aanwezigheid van bodemverontreiniging heeft geen effect op de overleving van springstaarten. Voor zowel de voor- als najaarsbemonstering was deze op de onbehandelde proefvakken circa 80%. Reproductie van springstaarten lijkt toe te nemen met afnemende concentraties zware metalen, maar deze toenames zijn voor de proeflocaties I en II niet significant (ANOVA, $p=0,2753$ respectievelijk $p=0,1177$, $n=4$). Dit wordt bevestigd met de najaarsbemonstering.

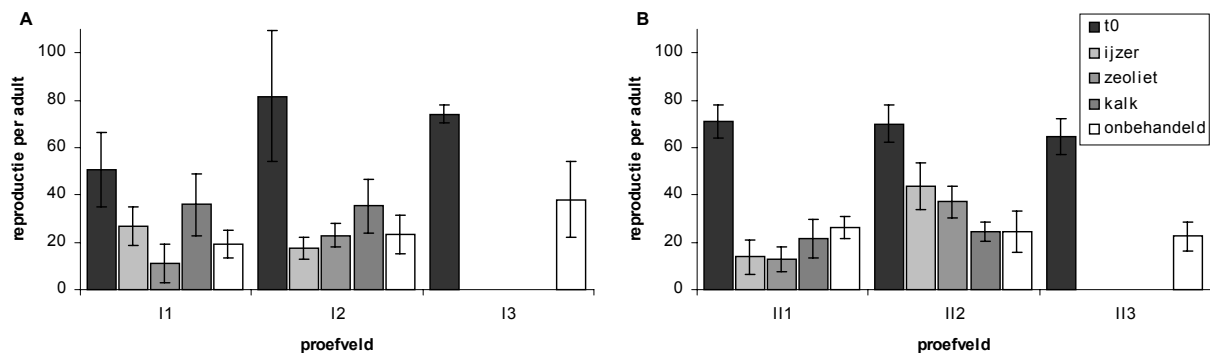


Fig. 10. Resultaten van de reproductietest met de springstaart *Folsomia candida* op proeflocatie I (A) en II (B). Waarden zijn gemiddelde \pm standaarddeviatie (n=4).

Reproductie tijdens de najaarsbemonstering is circa een factor 2 lager dan tijdens de voorjaarsbemonstering. Dit effect is ook waarneembaar op de interne standaard (OECD), zodat dit kan worden toegeschreven aan de conditie van de testorganismen, storingen van de klimaatvoorziening en dergelijke. In laboratoriumkweken van dergelijke toetsorganismen is vaker een dergelijke tijdelijke afname van reproductie te zien.

De behandelingen met ijzer, zeoliet en kalk hebben geen significante effecten ten opzichte van de onbehandelde proefvakken. Wel lijkt de behandeling met zeoliet en kalk op proefveld I1 een respectievelijk negatief en positief effect te hebben. Op proefveld II2 lijkt sprake te zijn van een positief effect van ijzer en kalk.

Microtox-test

Voor de Microtox-test zijn randvoorwaarden opgesteld voor onder andere zuurgraad en zuurstofgehalte waaraan het te testen medium dient te voldoen. Wanneer aan de randvoorwaarden wordt voldaan, kan aannemelijk worden gemaakt dat eventuele negatieve effecten worden veroorzaakt door de aanwezigheid van verontreinigingen. Zowel tijdens de voor- als najaarsbemonstering hebben alle monsters aan de gestelde randvoorwaarden voldaan.

Figuur 11 geeft de resultaten weer van de Microtox-test, voor zowel de voor- als najaarsbemonstering, na 30 minuten op de hoogst geteste concentratie (45%) op proeflocatie I. Tijdens de voorjaarsbemonstering neemt de remming van de bioluminescentie af met afnemende verontreiniging. Op proefveld I3 is sprake van een lichte toename van de bioluminescentie. De gemeten effecten komen overeen met de concentraties van met name cadmium en chroom in het poriewater die eveneens een afname vertonen bij afnemende concentraties in de bodem.

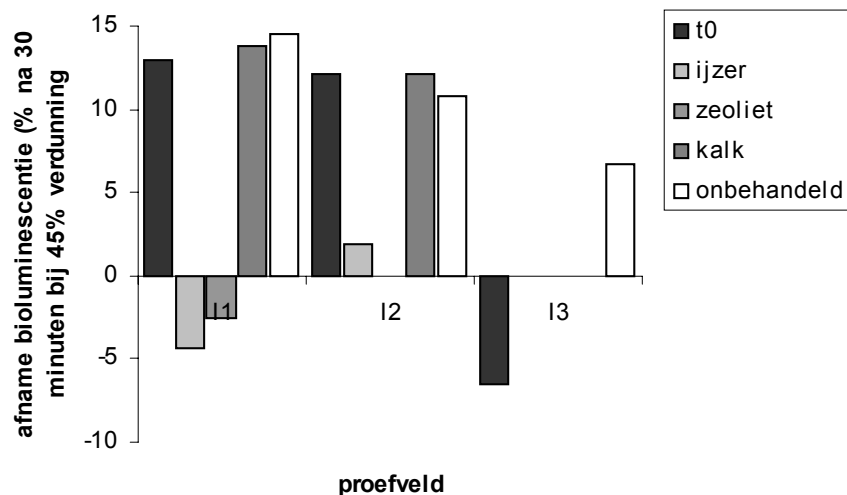


Fig. 11. Remming van de bioluminescentie van de bacterie *Vibrio fischeri* bij de hoogste testconcentratie (45%) na een blootstelling van 30 minuten.

Tijdens de najaarsbemonstering is een effect te zien van de behandeling met ijzerstof en zeoliet. De bioluminescentie op deze proefvakken wordt niet tot nauwelijks geremd en op een aantal proefvakken zelf gestimuleerd. Op de met kalk behandelde en onbehandelde proefvakken is daarentegen wel sprake van remming van de bioluminescentie. Deze remming is vergelijkbaar met de remming tijdens de voorjaarsbemonstering. Er zijn geen gegevens bekend over de toxiciteit van het poriewater van het met zeoliet behandelde proefvak I2. Er zat onvoldoende poriewater in de cups om zowel de chemische als ecologische analyses uit te voeren. Zowel tijdens de voor- als de najaarsbemonstering is het niet mogelijk geweest om een EC_{20} -waarde te berekenen. De remming van de bioluminescentie is in vrijwel alle monsters kleiner dan 20%. Het poriewater kan hierdoor worden gezien als niet toxisch.

5.2.3 Bioaccumulatie in regenwormen

Tabel 7 geeft de resultaten weer van de analyses van in het veld verzamelde regenwormen.

Tabel 7. Interne concentraties zware metalen van in het veld verzamelde regenwormen ($mg\ kg^{-1}$).

proefveld	behandeling	arsen	cadmium	chroom	koper	nikkel	lood	zink
I1	zeoliet	3,73	14,26	142,1	22,44	18,25	13,09	1069,2
	ijzer	5,49	11,91	442,3	54,36	48,7	23,21	698,4
	kalk	3,18	12,99	359,4	23	20,22	14,79	912,7
	blanco	1,76	10,9	137,2	17,59	13,19	8,77	630,1
I2	zeoliet	1,55	6,97	106,7	12,45	11,19	5,39	514,3
	ijzer	2,25	9,57	161,6	23,37	19,95	11,17	633,3
	kalk	1,61	6,91	230,7	14,79	16,34	10,27	511,4
	blanco	1,08	9,21	142,9	12,22	13,36	4,97	665,2
I3	blanco	0,61	5,46	10,4	10,23	3,48	0,96	702,7

Met uitzondering van zink leidt toename van de concentratie aan zware metalen (zowel de totale als de potentiële beschikbare fractie) tot een toename van de interne concentraties. Voor poriewater concentraties is deze relatie alleen op te maken voor chroom. Effecten van de oppervlakbehandelingen zijn niet zichtbaar.

Om de resultaten van de verschillende proefvakken en -velden onderling te vergelijken, is voor elke behandeling de bioaccumulatiefactor (BCF) berekend volgens de formule:

$$BCF = \frac{C_{worm}}{C_{bodem}}$$

waarbij:

- BCF Bio Concentration Factor;
- C_{worm} concentratie in de worm;
- C_{bodem} concentratie in de bodem.

Uit deze berekeningen blijkt dat voor de metalen cadmium en zink sprake is van hyperaccumulatie. De concentraties in de regenwormen zijn hoger dan de concentraties in de bodem ($BCF > 1$). Uit de berekeningen blijkt tevens dat er geen verschillen zichtbaar zijn tussen de toegepaste addities.

Figuur 12 geeft de bioaccumulatie weer per proefveld van arseen, cadmium, chroom en zink in regenwormen uit het Noorderbos. De resultaten van de verschillende addities zijn per proefveld samengevoegd.

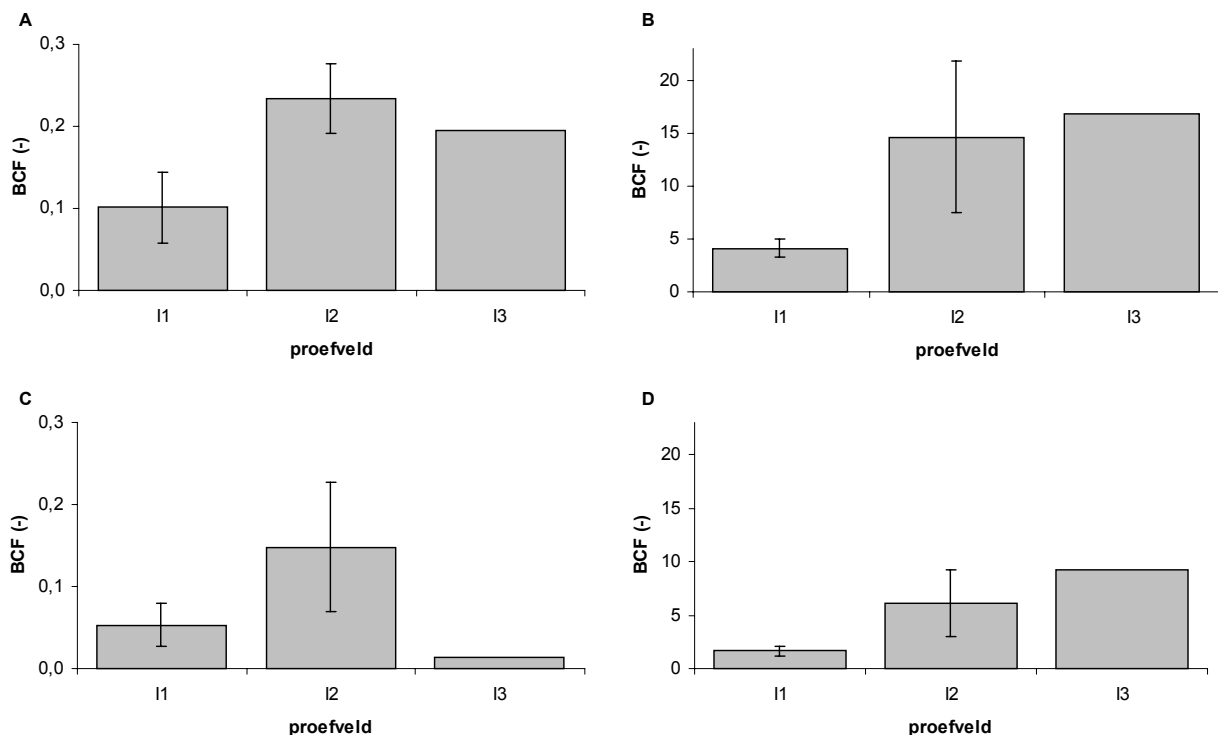


Fig. 12. Bioconcentratiefactoren (BCF) voor arseen (A), cadmium (B), chroom (C) en zink (D) in regenwormen in het Noorderbos. Waarden zijn gemiddelden \pm standaarddeviatie ($n=4$).

Uit de figuur blijkt dat sprake is van toenemende accumulatie bij toenemende afstand van de aanvoersloten en afnemende gehalten aan organisch materiaal in de bodem. Dit is eveneens zichtbaar voor de overige geanalyseerde metalen (nikkel, koper en lood).

5.3 Literatuurstudie doorvergiftiging van zware metalen

Om een indicatie te verkrijgen van risico's op doorvergiftiging van zware metalen naar organismen hoger in de voedselketen, zijn de interne concentraties van wormen uit het Noorderbos vergeleken met onderzoeksresultaten van wormen afkomstig van onbelaste locaties [Van Gestel et al., 1992]; [Ma, 1987] en [Ma et al., 1992]. De resultaten van deze onderzoeken voor de regenwormen *Lumbricus rubellus* en de resultaten van het bioaccumulatieonderzoek in het Noorderbos zijn weergegeven in tabel 8. De resultaten zijn vergeleken voor de regenworm *Lumbricus rubellus*, omdat dit een veelvoorkomende regenworm is in het Noorderbos [Groenenberg et al., 1999b].

Tabel 8. Vergelijking interne concentraties (mg kg^{-1}) aan zware metalen in regenwormen in het Noorderbos met regenwormen (*Lumbricus rubellus*) afkomstig van onbelaste locaties. Waarden geven de laagste en hoogste gemeten concentratie aan.

	Noorderbos	van Gestel et al., [1992]	Ma, [1987]	Ma et al., [1992]
arseen	0,61-5,49	0,19-12		<0,9-8,9
cadmium	5,46-14,26	2,7-26	18-21	2,8-22
chromium	10,4-442,3	1,2-3		0,9-9,3
koper	10,23-54,36	5,6-30	20-21	8-22
nikkel	3,48-48,7	<0,2-3,0		
lood	0,96-23,21	3,2-52	10-13	3,4-151
zink	511,4-1069,2	260-730	717-742	219-1441

Uit vergelijking van de onderzoeksresultaten met de gegevens van Van Gestel et al. [1992] blijkt dat de interne concentraties aan arseen, cadmium en lood in regenwormen uit het Noorderbos binnen de range die op schone gronden verwacht mogen worden liggen. De interne concentraties aan koper, nikkel en zink zijn op de meest verontreinigde proefvelden duidelijk hoger, terwijl de interne concentraties aan chromium ook op het minst verontreinigde proefveld hoger zijn (zie tabel 7). Vergelijking van de interne concentraties van regenwormen uit het Noorderbos met de resultaten van Ma [1987] en Ma et al. [1992], die eveneens de interne concentraties van regenwormen afkomstig van onbelaste gebieden hebben gemeten, laten een vergelijkbaar resultaat zien. Opgemerkt moet worden dat het onderzoek van Ma [1987], in tegenstelling tot de overige 2 onderzoeken, zich heeft beperkt tot 1 onbelaste locatie.

HOOFDSTUK 6

DISCUSSIE

6.1 Beginsituatie

6.1.1 Verontreinigingssituatie

Met de resultaten van de voor- en najaarsbemonstering is de beginsituatie van het Noorderbos vastgesteld. Op de proefvelden zijn hoge concentraties aan zware metalen gemeten die afnemen met toenemende afstand tot de aanvoersloten. Met name de concentraties aan chroom liggen op vrijwel alle proefvelden boven de interventiewaarde. De verwachte overschrijding van de interventiewaarde voor arseen, is alleen op de meest verontreinigde proefvelden op proeflocatie I gemeten. Op de overige locaties liggen de concentraties op of rond de streefwaarde.

De hoogste concentraties potentieel beschikbare zware metalen zijn gemeten op proefveld I.1. In vergelijking met de tweede proeflocatie en met de meetpunten verspreid over het Noorderbos zijn deze hoog. Deze verschillen kunnen zijn veroorzaakt door de intensiviteit van de bevoeiing van de verschillende percelen.

Doordat een groot deel van het zwevende stof in het afvalwater bezonk nabij de inlaatsluizen, zijn de gehalten aan organische stof en oxiden dichtbij de inlaatsluizen het hoogst en nemen deze af in de richting van de afvoersloten. De gehalten aan organische stof en oxiden vertonen een vergelijkbare gradiënt als de verontreiniging. Dit verklaart (deels) waarom de concentraties metalen in het bodemvocht van de onbehandelde proefvakken een minder sterke gradiënt vertonen dan de gehalten in de vaste fase. Waar de bodem het sterkst verontreinigd is met metalen zijn namelijk ook de hoogste gehalten aan organische stof en oxiden die de verontreiniging binden aanwezig.

6.1.2 Ecotoxicologie

De grotere hoeveelheid organisch stof bij de inlaatsluizen heeft eveneens geleid tot stimulatie van de biomassa en groei van bacteriën en een verhoogde substraatconsumptie bij de Bait-Lamina test. Dit lijkt niet toe te kunnen worden geschreven aan verlaging van de beschikbaarheid van metalen. De hoogste concentraties in het poriewater zijn immers gemeten op de meest verontreinigde proefvelden. Het effect lijkt daarom te zijn veroorzaakt doordat de bodem een geschikter substraat is voor micro-organismen. In niet verontreinigde bodems leidt een toename van het organisch materiaal tot positieve effecten bij de uitgevoerde testen [Muijs et al., 2000].

Biomassa en groeisnelheid van bacteriën worden beïnvloed door de gradiënt, maar dit is naar alle waarschijnlijkheid een effect van het organisch materiaal waarvan het percentage op de proefvelden nabij de aanvoersloten hoger is. Een hoge biomassa en groeisnelheid kan eveneens zijn veroorzaakt door een verlaagde predatiedruk door bacterivore nematoden, omdat de aantallen nematoden hier laag waren. De waargenomen effecten kunnen daarom niet direct worden toegeschreven aan de aanwezige verontreiniging met zware metalen. De biomassa van bacteriën in het Noorderbos is laag, maar is normaal voor zandgronden.

Met de Microtox-test is in beide monitoringsronden een licht negatief effect gemeten. Dit effect is waarschijnlijk toe te schrijven aan verhoogde poriewaterconcentraties aan tweewaardige metaalionen (met name zink) en niet aan chroom en arseen. De Microtox-test liet namelijk geen negatief effect zien op de met zeoliet behandelde proefvakken, terwijl zeoliet alleen de concentratie tweewaardige metaalionen in het bodemvocht verlaagde en de concentraties chroom en arseen

in oplossing onveranderd liet. De negatieve effecten zijn conform de beoordelingscriteria [Maas et al., 1993], echter niet als toxisch te classificeren.

Met de regenwormen is in beide monitoringsronden een negatief effect gemeten op het meest verontreinigde proefveld (proefveld I1). Dit kan verband houden met verhoogde beschikbaarheid van chroom, koper, nikkel en zink voor de regenwormen. In het veld verzamelde regenwormen lieten namelijk verhoogde concentraties van deze metalen zien.

In eerder onderzoek is aangetoond dat de dichtheid en samenstelling van de regenwormenpopulatie in het Noorderbos onafhankelijk is van de aanwezige verontreiniging. De bijbehorende concentraties aan zware metalen in de bodem waren echter circa een factor 2 lager dan de concentratie in het meest verontreinigde proefveld van deze studie [Groenenberg et al., 1999b]. Beïnvloeding van de aanwezige metaalverontreiniging op groei van regenwormen is daarom waarschijnlijk.

Bij de overige uitgevoerde ecologische analyses zijn geen of minimale effecten gemeten. Dit is in overeenstemming met eerder uitgevoerd onderzoek [Groenenberg et al., 1999b] en toont aan dat er in de huidige situatie geen onacceptabele risico's zijn. De nulsituatie is hiermee goed vastgelegd. Eventuele toename van de toxiciteit door verzuring van de bodem kan met de gebruikte ecologische analyses worden aangetoond.

6.1.3 *Bioaccumulatie*

Voor cadmium en zink is sprake van hyperaccumulatie; de concentraties in de regenwormen zijn hoger dan de concentraties in de bodem. Zink is voor alle organismen een essentiële voedingsstof [Begon et al., 1990]. Bij een tekort aan zink zullen organismen actief zink uit de omgeving opnemen, terwijl bij te hoge concentraties wordt getracht het overtollige zink uit te scheiden. Regenwormen vertonen vaak constante interne concentraties aan zink over een brede range aan zinkconcentraties in de bodem. De gemeten concentraties aan zink in regenwormen komen overeen met de resultaten van eerder uitgevoerd onderzoek ([Van Gestel et al., 1992]; [Ma, 1987], [Ma et al., 1992]). Alleen op de meest verontreinigde proefvelden zijn de interne zinkconcentraties hoger.

Cadmium is daarentegen niet essentieel [Begon et al., 1990] en toxisch voor veel organismen. In tegenstelling tot zink is bij cadmium wel een relatie zichtbaar tussen interne- en bodemconcentraties.

Er kan geen onderscheid worden gemaakt tussen de verschillende behandelingen. De proefvelden zijn klein, waardoor het aannemelijk is dat wormen niet continue op het proefvak aanwezig zijn en dat wormen van buiten het proefvak in het proefvak terecht zijn gekomen. Dit probleem kan ondervangen worden door bioaccumulatie te meten middels laboratoriumproeven (potproeven). Het nadeel hiervan is dat bioaccumulatieonderzoek onder laboratoriumomstandigheden de bioaccumulatie kan beïnvloeden.

Tussen de proefvelden is wel een verschil zichtbaar in de bioaccumulatie van metalen in regenwormen, waarbij bioaccumulatie in het meest verontreinigde proefveld naar verhouding lager is dan in de overige proefvelden. Dit wordt veroorzaakt door het hoge percentage organisch materiaal, waardoor de uitspoeling en de biologische beschikbaarheid wordt verminderd.

6.1.4 *Doorvergiftiging*

Regenwormen vormen een belangrijke voedselbron voor (roof)vogels, kleine zoogdieren, amfibieën en reptielen, zodat verontreinigingen via het consumeren van regenwormen in de voedselketen terecht kunnen komen. Mollen voeden zich voornamelijk met regenwormen. Uit onderzoek is gebleken dat de concentraties in levers van mollen uit verontreinigde gebieden hoger zijn dan

in schone gebieden [Pankakoski et al., 1992]. Door Ma [1987] zijn op een aantal (verontreinigde) locaties regenwormen en mollen verzameld en geanalyseerd op een aantal zware metalen. Uit deze analyses is gebleken dat toenemende concentraties aan cadmium, koper, lood en zink in de grond leiden tot toenemende concentraties in regenwormen. Hierdoor stijgen eveneens de concentraties van deze metalen in de levers en nieren van mollen. De interne concentraties cadmium en zink in regenwormen afkomstig uit het Noorderbos liggen onder of rond de waarden die door Ma [1987] zijn gemeten op een niet belaste referentielocatie. Daarom kan worden verwacht dat de interne concentraties in de levers en nieren van mollen in het Noorderbos vergelijkbaar zullen zijn met mollen afkomstig uit schone gebieden. De hoogst gemeten concentraties koper en lood in regenwormen van respectievelijk 54,3 en 23,2 mg kg⁻¹ zijn hoger dan de door Ma [1987] gemeten waarden op niet verontreinigde gronden. Voor koper wordt op het desbetreffende proefvak een verhoogde concentratie in levers en nieren van mollen verwacht van respectievelijk 38,0 en 41,2 mg kg⁻¹, op basis van lineaire regressie van de resultaten van Ma [1987] (r^2 is respectievelijk 0,9548 en 0,4190). Voor lood wordt op basis van de resultaten van Ma [1987] geen verhoogde concentraties in mollen verwacht ten opzichte van niet verontreinigde locaties.

De concentratieverhouding voor arseen en chroom tussen mollen (nieren en lever) en regenwormen bedragen respectievelijk <0,6 en 0,1 [Groenenberg et al., 1999a]. Op basis van deze verhoudingen kunnen in mollen op het meest verontreinigde proefveld concentraties aan arseen en chroom van respectievelijk 1-3,2 en 13,7-44,2 mg kg⁻¹ worden verwacht. Toxische effecten voor zoogdieren worden bij deze voorspelde concentraties niet verwacht. De concentraties liggen ver beneden de LD₅₀-waarden (lethal dosis). Voor anorganisch arseen is bij dieren een LD₅₀ gemeten tussen 10 en 300 mg kg⁻¹ lichaamsgewicht [Groenenberg et al., 1999a]. Bij muizen is voor 3-waardig chroom een LD₅₀-waarde van 260 mg kg⁻¹ gemeten [Steven et al., 1976]. Deze vormen van arseen en chroom komen ook voor in het Noorderbos [Groenenberg et al., 1999a, 1999b].

Regenwormen staan eveneens op het menu van diverse muizensoorten. Op basis van vergelijkbare concentraties aan arseen, cadmium, lood en zink in regenwormen uit het Noorderbos en regenwormen afkomstig van een 12-tal niet verontreinigde natuurgebieden [Ma et al., 1992], valt te verwachten dat de in het Noorderbos aanwezige muizensoorten geen verhoogde hoeveelheden van deze metalen zullen accumuleren. De interne gehalten in de nieren zullen overeenkomen met de door Ma et al., [1992] gemeten waarden. Voor chroom, koper en nikkel kunnen in het Noorderbos wel verhoogde concentraties in muizen worden verwacht. De gemeten concentraties in regenwormen zijn hoger dan die gemeten in regenwormen afkomstig van onbelaste natuurgebieden [Ma et al., 1992]. Toxische effecten voor muizen in het Noorderbos worden echter niet verwacht, omdat de LD₅₀-waarde voor 3-waardig chroom relatief hoog is [Steven et al., 1976].

Naast regenwormen voeden muizen zich eveneens met andere bodeminvertebraten (kevers, spinnen en dergelijke) en planten. Over het algemeen worden hogere concentraties zware metalen in regenwormen gemeten dan in spinnen en kevers [Ma et al., 1992]. Doorvergiftiging door het consumeren van kevers en spinnen lijkt daarom minder waarschijnlijk. Ook doorvergiftiging via planten en de strooisellaag lijkt onwaarschijnlijk. In het Noorderbos zijn in planten en in de strooisellaag geen verhoogde concentraties aan zware metalen gemeten [Groenenberg et al., 1999b].

Het risico van doorvergiftiging hangt af van het voedselpatroon van organismen. Aardmuizen bijvoorbeeld voeden zich voornamelijk met planten, terwijl bosspitsmuizen voornamelijk keverlarven en regenwormen consumeren. Omdat keverlarven en regenwormen door hun intensieve contact met de bodem grote hoeveelheden verontreinigingen kunnen accumuleren, lopen predatoren die deze organismen consumeren grotere risico's. De interne concentraties aan zware metalen in

bosspitsmuizen is daarom hoger dan in aardmuizen [Ma et al., 1992]. Over de doorvergiftiging naar organismen hoger in de voedselketen is weinig bekend. Deze is eveneens sterk afhankelijk van het voedselpatroon. Doordat aaseters (door verontreiniging) verzwakte en dode dieren consumeren, nemen zij meer verontreinigingen op dan predatoren die jagen op actieve en gezonde organismen [Straalen en Verkleij, 1993].

6.2 Toegepaste additieven

6.2.1 Effecten van de additieven

IJzer

De effecten van het toevoegen van ijzerstof aan de bodem zijn voor een periode van enkele weken zichtbaar geweest. Het is duidelijk te zien dat de planten op het met ijzer behandelde proefveld minder snel opkomen dan in het met zeoliet behandelde proefveld. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt doordat ijzer reageert met zuurstof (oxidevorming), waardoor een groot deel van het aanwezige zuurstof verbruikt. De hierdoor ontstane anaërobe omstandigheden kunnen nadelig zijn voor de plantengroei. Tevens kan door de reductie van mangaan mangaantoxiciteit zijn ontstaan. Na enkele weken is dit hersteld en zijn de verschillen met de met zeoliet behandelde proefvakken niet meer zichtbaar.

De met ijzer, maar ook de met zeoliet behandelde proefvelden zijn herkenbaar doordat deze qua vegetatie verschillen van de overige proefvakken en de directe omgeving. In deze twee proefvakken is de bodem omgeploegd en daarbij de aanwezige vegetatie beschadigd. De vegetatie op deze twee proefvakken bestaat voor een groot deel uit pioniersoorten en grassen. Naar verwachting zal deze situatie het komende seizoen herstellen, zodat verschillen in vegetatie met de overige proefvakken en de directe omgeving niet zichtbaar zullen zijn.

IJzer wordt onder aërobe omstandigheden geoxideerd (roestvorming) en is zeer slecht oplosbaar. Daarom wordt verwacht dat ijzer langzaam zal uitloggen en een langdurige werking zal hebben.

Het toevoegen van ijzerstof leidt tot verlaging van concentraties aan metalen in het bodemvocht en daardoor tot een verlaging van de biologische beschikbaarheid. Op de met ijzer behandelde proefvelden heeft de Microtox-test een duidelijke afname laten zien van de toxiciteit van de aanwezige metalen voor de bacterie *Vibrio fischeri*. IJzer leidt eveneens tot een verlaging van de uitspoeling van fosfaat. IJzer lijkt daarom geschikt om de effecten van eutrofie tegen te gaan. Voor natuurontwikkeling is dit een pluspunt, omdat eutrofie vaak leidt tot verlaging van de biodiversiteit aan planten.

Het toevoegen van ijzer geeft tegenstrijdige resultaten bij testen met de regenworm *Lumbricus rubellus*. Op één proefvak is een negatief effect gemeten, op een ander proefvak weer een positief effect. In hoeverre dit een effect is van de behandeling met ijzerstof of dat dit wordt veroorzaakt door andere (methodische) effecten is niet duidelijk.

Hoewel ijzer heeft geleid tot verlaging van de concentraties zware metalen in het poriewater, is dit effect niet terug te vinden in de interne concentraties in regenwormen. Deze zijn vergelijkbaar met de interne concentraties van regenwormen op het onbehandelde proefveld. De periode tussen toedienen van het ijzer en de bemonstering van regenwormen is waarschijnlijk te kort om effecten te zien of omdat regenwormen niet continue in de proefvakken aanwezig zijn.

De behandeling leidt niet tot negatieve effecten en verlaagt de (biologische) beschikbaarheid van zware metalen. IJzer lijkt een geschikt additief te zijn om de negatieve effecten van verzuring te-

gen te gaan. Het effect van dosering en de effecten op lange termijn, met name de effecten van bodemverzuring op de immobilisatie van metalen door ijzer, zijn echter nog niet bekend.

Zeoliet

Het gebruikte zeoliet (philipsite) heeft een natuurlijke herkomst en leidt tot verlaging van de concentratie van tweewaardige metalen in het bodemvocht, met name de zinkconcentratie, maar het effect is minder sterk dan bij ijzer. Desondanks leidt zeoliet tot een verlaging van de toxiciteit voor de bacterie *Vibrio fischeri* tot een vergelijkbaar niveau als bij de ijzerbehandeling. Door de behandeling met zeoliet zijn de totale en potentiële beschikbare fracties kalium en natrium in de bodem verhoogd ten opzichte van het onbehandelde proefvak. Deze stoffen zijn belangrijke bestanddelen van zeoliet, zodat het niet is uitgesloten dat deze stoffen met het toedienen van zeoliet in de bodem zijn terechtgekomen. De verhoogde natriumconcentraties in het poriewater kan duiden op verwerking van het materiaal.

Het toevoegen van zeoliet leidt tot een verhoging van de substraatconsumptie bij de Bait-Lamina test. Dit effect is niet direct te relateren aan het feit dat zeoliet de toxiciteit van metalen verlaagt. Dit kan ook een effect zijn van het omploegen van de bodem of doordat het zeoliet zelf micro-organismen bevat waarmee de bodem wordt geënt. Er is echter geen toename zichtbaar van de biomassa en groeisnelheid van bacteriën. Bij de regenwormen is een toename van de groei en reproductie (coconproductie) gemeten. Negatieve effecten van zeoliet zijn bij geen van de ecologische analyses gemeten, zeoliet lijkt niet toxisch.

Ook het toevoegen van zeoliet leidt niet tot verlaging van de interne concentraties aan zware metalen in regenwormen. De periode tussen toedienen van zeoliet en de bemonstering van regenwormen is waarschijnlijk te kort om effecten te zien.

Zeoliet lijkt geschikt te zijn als middel om de negatieve effecten van verzuring tegen te gaan. Het verlaagt de (biologische) beschikbaarheid van tweewaardige metalen, maar zeoliet lijkt niet de uitspoeling van arseen en chroom tegen te gaan. Samengevat lijkt zeoliet een geschikte stof om de negatieve effecten van verzuring tegen te gaan, al is het effect minder duidelijk dan bij ijzer. De stof is niet toxisch. Evenals bij ijzer zijn de effecten op lange termijn en de effecten van verzuring niet bekend.

Kalk

Op de met kalk behandelde proefvakken zijn geen effecten waargenomen. Kalk leidt niet tot vermindering van de concentraties in het poriewater van zowel metalen als overige elementen, zoals calcium, en laat geen effecten zien bij de ecologische analyses. De lage dosering kalk, zoals toegepast bij de aanleg van het Noorderbos, verandert nauwelijks de zuurgraad van de bodem. Derhalve zijn ook geen effecten op beschikbaarheid en toxiciteit te verwachten. Alleen de biomassa en groeisnelheid van bacteriën zijn respectievelijk af- en toegenomen. Deze metingen zijn slechts op één proefveld uitgevoerd (I1) en kunnen daarom niet via een replica op een ander proefveld worden bevestigd. Kalk leidt niet tot verlaging van de interne concentraties aan zware metalen in de regenwormen.

6.2.2 Toepasbaarheid van de additieven

Zowel ijzer als zeoliet kunnen voorafgaand aan bosaanplant relatief eenvoudig worden toegediend. De benodigde additieven worden verdeeld over het oppervlakte en gemengd met de bovenste 25 cm van de bodem. De bodembehandeling dient met droog weer te worden uitgevoerd om klontvorming te voorkomen. De behandeling gaat dan echter gepaard met stofvorming, wat uit oogpunt van veiligheid en verspreiding ongewenst is.

Kalk is eenvoudig toe te dienen door deze als pellets over de oppervlakte uit te strooien, zodat dit alternatief ook kan worden toegepast in een reeds ontwikkeld bos. Vermengen met de boven-

ste bodemlagen is niet nodig. Kalk is verwerkbaar bij vochtig weer en leidt niet tot stofvorming. Het middel is goedkoop en lijkt niet te leiden tot toxische effecten. De korte werkingsduur maakt het middel echter minder geschikt.

6.2.3 *Samenvattend*

De bevindingen met de toegepaste additieven staan samengevat in tabel 9.

Tabel 9. Voor- en nadelen van de onderzochte additieven.

additief	voordelen	nadelen
kalk	<ul style="list-style-type: none"> - goedkoop - eenvoudig toe te dienen, ook in een ontwikkeld bos 	<ul style="list-style-type: none"> - korte werkingsduur
ijzer	<ul style="list-style-type: none"> - verlaagd uitspoeling en toxiciteit van metalen - verlaagd beschikbaarheid van fosfaat - niet toxisch - kan goedkoop verkregen worden (afvalproduct uit de metaalindustrie) 	<ul style="list-style-type: none"> - stofvorming en klontvorming bij verwerking - niet verwerkbaar in reeds ontwikkeld bos - tijdelijk negatief effect op de aanwezige flora
zeoliet	<ul style="list-style-type: none"> - verlaagd uitspoeling en toxiciteit van metalen - niet toxisch 	<ul style="list-style-type: none"> - stofvorming en klontvorming bij verwerking - niet verwerkbaar in reeds ontwikkeld bos

Bij het uitgevoerde onderzoek moet, met betrekking tot de toepasbaarheid van de additieven, enkele kanttekeningen worden geplaatst. Zeoliet en ijzer mogen in beginsel werkbare additieven lijken te zijn, er is een aantal aspecten dat nadere aandacht behoeft. Het eerste aspect is de dosering. In het project is een relatief hoge dosering gebruikt wat hoge kosten met zich mee brengt.

Een tweede aspect is de acceptatie. Het toevoegen van kalk zal op weinig bezwaren stuiten. Bij andere stoffen is dit niet het geval. In dit verband speelt ook de veiligheid (gezondheidseffecten) wellicht een rol. In de vervolgfase van het project zal aan beide aspecten aandacht worden geschonken.

6.3 **Geschiktheid monitoringspakket**

Voor de voor- en najaarsbemonstering zijn een groot aantal chemische en ecologische analyses gebruikt. Eén van de doelstellingen van fase A is de selectie van een geschikt monitoringspakket om tijdens vervolgfases de effecten van de toegepaste additieven te bepalen.

6.3.1 *Chemische analyses*

De analyses van de totale fractie aan zware metalen geeft relevante informatie over de concentraties en spreiding van metalen over de proefvelden. Voor vervolgfases is het echter niet nodig deze analyses jaarlijks uit te voeren, omdat de totale fractie zware metalen aan weinig verandering onderhevig zal zijn. Dit geldt ook voor de potentiële beschikbare fracties (HNO₃-extracties). De gemeten concentraties tijdens de voor- en najaarsbemonstering vormen een geschikte uitgangssituatie.

Met de analyses van het poriewater zijn zowel de gradiënt als de effecten van additieven zichtbaar. Analyses van het poriewater geven meer informatie over het actuele risico dan totaalanalyses alleen. De concentraties aan zware metalen in het poriewater worden duidelijk beïnvloed door de toegepaste additieven. Alleen lood is niet meetbaar in het poriewater. Analyses van zware metalen in het poriewater zijn zinvol en dienen daarom te worden toegepast in de continuering van de monitoring. Daarnaast geeft de analyse van fosfaat informatie over de beschikbaarheid van deze meststof, die door de toevoeging van ijzerstof wordt verlaagd. Wel kleven een aantal nadelen aan analyses van poriewater. De hoeveelheid poriewater en de concentraties zijn sterk afhankelijk van de hoeveelheid neerslag. Analyse van poriewater is daarom een momentopname. Tijdens droge perioden bestaat het risico dat de poriewatercups onvoldoende poriewater be-

vatten voor de analyses. Om variabiliteit door seizoenseffecten uit te sluiten, is het beter in een vaste periode van het jaar te bemonsteren.

6.3.2 *Ecologische analyses*

Met de uitgevoerde ecologische analyses is een goed beeld verkregen van de effecten van bodemverontreiniging en de oppervlaktebehandelingen op ecosysteemniveau. De testen die zijn uitgevoerd beslaan meerdere ecologische functies en niveaus in de voedselketen. De analyses van de biomassa en groeisnelheid van bacteriën, samenstelling van de nematodenpopulatie en de Bait-Lamina test geven inzicht in het functioneren van de microflora en processen in de bodem, terwijl de test met regenwormen en springstaarten informatie heeft opgeleverd over hogere trofische niveaus. Alleen testen met planten ontbraken in de gehanteerde set, zodat geen inzicht is verkregen in de effecten op planten.

Voor fase A is een breed scala aan beschikbare ecologische analyses uitgevoerd, met als uiteindelijk doel een geschikte set te selecteren die gebruikt kan worden voor continuering van de monitoring in het kader van verantwoord bodembeheer, zoals vastgelegd in het bodembeheersplan. Een definitieve selectie is nog niet mogelijk. De testen vertonen vergelijkbare resultaten en de effecten van verzuring zijn nog niet zichtbaar. In het navolgende worden de uitgevoerde testen besproken met betrekking tot hun potentiële geschiktheid voor continuering van de monitoring.

Veldinventarisaties

Met de analyse van biomassa en groeisnelheid van bacteriën en de dichtheid en samenstelling van de nematodenpopulatie is het gradiënt duidelijk te zien. De effecten van de oppervlaktebehandelingen zijn niet zichtbaar. Zowel bacteriën als nematoden spelen een belangrijke rol bij diverse processen in bosbodems, zoals (de)nitrificatie en afbraak van strooisel. Daarom leveren analyses op deze parameters relevante informatie op met betrekking tot het functioneren van de bosbodem.

In het Noorderbos is de gradiënt niet zichtbaar met de Bait-Lamina test. De substraatconsumptie is tijdens de voorjaarsbemonstering erg laag, zodat verschillen tussen de proefvelden niet significant kunnen worden aangetoond. Tijdens de najaarsbemonstering zijn wel hoge waarden voor de substraatconsumptie gemeten. Wederom was het effect van de gradiënt niet zichtbaar. Een effect bij de behandeling met zeoliet was daarentegen wel zichtbaar. De test levert weinig relevante informatie op ten opzichte van andere veldinventarisaties en kan daarom komen te vervallen bij continuering van de monitoring. Wel kan de test worden gebruikt om de activiteit van de nog te vormen strooisellaag te bepalen.

Bioassays

De gradiënt is met de groei van regenwormen zichtbaar. Deze neemt toe met afnemende concentraties zware metalen. Met deze test is toxiciteit op het meest verontreinigde proefveld aangetoond. Regenwormen zijn essentiële bodemorganismen. Zij zijn betrokken bij substraat-omzettingen (afbraak organisch materiaal) en beluchten te bodem. Daarnaast vormen zij belangrijk voedsel voor veel kleine zoogdieren en vogels. Het gebruik van deze test bij continuering van de monitoring is derhalve zinvol. Door het direct contact van regenwormen met de (verontreinigde) bodem, zijn zij gevoelig voor verontreinigingen. Bovendien levert deze test informatie op met betrekking tot risico's voor organismen hoger in de voedselketen.

Met de springstaartentest is het effect van de gradiënt zichtbaar, maar de gemeten verschillen zijn minimaal en niet significant. Met de springstaartentesten zijn eveneens geen significante effecten van de oppervlaktebehandelingen gemeten. Daarentegen is de springstaart *Folsomia candida* een zeer algemeen organisme in bosbodems. Bovendien is de test gevoelig voor zware metalen, zodat eventuele effecten van verzuring direct kunnen worden aangetoond.

De Microtox-test is als enige test uitgevoerd op het poriewater. De test is zeer gevoelig voor zware metalen en daardoor is het gradiënt duidelijk zichtbaar. Bovendien zijn de effecten van de verminderde uitspoeling van ijzer en zeoliet zichtbaar. Bij zeoliet is alleen de zinkconcentratie verlaagd, de concentraties chroom en arseen bleven onveranderd. Desondanks laat deze test geen toxiciteit meer zien. Bij de behandeling met kalk en op de referentie is wel toxiciteit zichtbaar. Vanwege de gevoeligheid is de Microtox-test een geschikte test om op te nemen in een monitoringspakket als een snelle en eenvoudige screening van de kwaliteit en toxiciteit van het poriewater. De test heeft echter geen relevantie met bosbodems; het gebruikte toetsorganisme. De bacterie *Vibrio fischeri* is een mariene bacterie.

Bioaccumulatie

De concentraties aan zware metalen in regenwormen wordt duidelijk beïnvloed door de aanwezigheid van de gradiënt. Effecten van de toegepaste additieven zijn niet zichtbaar. Het meten van bioaccumulatie in regenwormen geeft inzicht in de risico's op doorvergiftiging naar organismen hoger in de voedselketen. Desondanks lijken dergelijke analyses niet geschikt voor continuering van het monitoringsprogramma, vanwege de mobiliteit van regenwormen.

HOOFDSTUK 7

CONCLUSIES

De beginsituatie is vastgelegd, effecten van bosaanleg kunnen worden aangetoond

Met de uitvoering van fase A is de beginsituatie, de situatie vlak na de aanleg van het bos, vastgelegd. Behoudens een negatief effect bij de groei van regenwormen op de sterkst verontreinigde locatie, zijn er geen duidelijke toxische effecten gemeten. De resultaten van voorgaande onderzoeken worden hiermee bevestigd. Doordat geen toxiciteit is gemeten, kunnen met het gebruikte analysepakket eventuele negatieve effecten van de verwachte verzuring worden aangetoond. Ook kan worden bepaald of de toegepaste additieven de negatieve effecten van verzuring tegengaan.

Risico's voor hogere organismen lijken niet waarschijnlijk

Doorgifte van de aanwezige verontreiniging naar hogere organismen via de voedselketen kan voor het Noorderbos niet worden aangetoond. Op basis van vergelijking van de interne concentraties aan zware metalen in regenwormen met bekende literatuurgegevens, waarin relaties tussen concentraties in regenwormen, mollen en muizen onderzocht zijn, zijn risico's voor hogere organismen in de huidige situatie niet te verwachten.

IJzer en zeoliet lijken geschikt te zijn voor toepassing in het Noorderbos

IJzer en zeoliet lijken geschikte alternatieven voor kalk te zijn om de toekomstige negatieve effecten van verzuring tegen te gaan. IJzer leidt tot immobilisatie van zware metalen en fosfaat en daardoor tot verlaging van de concentraties van deze stoffen in het poriewater. Zeoliet leidt tot immobilisatie van tweewaardige metalen waaronder zink, maar niet tot immobilisatie van arseen en chroom. Desondanks leidt zeoliet evenals ijzer tot verlaging van de toxiciteit van het poriewater. Beide additieven zijn niet toxisch voor bodemorganismen, zijn eenvoudig toe te dienen en zijn relatief goedkoop. Er kan nog geen proefondervindelijke uitspraak worden gedaan of ijzer en zeoliet inderdaad de negatieve effecten van verzuring tegen gaan. Verzuring van de bosbodem is gedurende de eerste fase niet opgetreden.

De toegepaste analyses zijn geschikt voor monitoring, maar selectie is nog niet mogelijk

De toegepaste chemische- en ecologische analyses geven voldoende informatie over de verontreinigingssituatie, de toxiciteit en de effecten van de toegepaste additieven. Analyses van zware metalen, ijzer, fosfaat, natrium, kalium en de zuurgraad van het poriewater leveren relevante informatie op met betrekking tot de immobiliserende en bufferende werking en de houdbaarheid van de toegepaste additieven. Met betrekking tot de ecologische analyses kan nog geen selectie worden gemaakt. Alle testen vertonen een relatie met de aanwezige bodemverontreiniging, de toegepaste additieven en/of zijn ecologisch relevant voor bosbodems. Alleen de Bait-Lamina test levert onduidelijke informatie op. Met name tijdens de voorjaarsbemonstering vertoont deze test minimale resultaten. De test levert nauwelijks een meerwaarde op ten opzichte van analyses van de biomassa en groeisnelheid van bacteriën en de samenstelling van de nematodenpopulaties.

Nog geen effecten zichtbaar van de bosaanleg

Het effect van de aanleg van het Noorderbos op de aanwezige bodemverontreiniging met zware metalen is niet bekend. Verzuring is niet opgetreden tijdens deze projectfase. Wel is een toename geconstateerd van de activiteit van het bodemleven en van de biomassa van bacteriën. Dit is echter toe te schrijven aan de normaal aanwezige variatie die o.a. het gevolg is van het seizoen.

HOOFDSTUK 8

AANBEVELINGEN

Bodem verzuren om op korte termijn effecten inzichtelijk te maken

Verzuring van de bodem is een langzaam proces. Verwacht wordt dat na minimaal 10 jaar de zuurgraad van de bodem met 1 eenheid is gedaald ten opzichte van de huidige pH. Effecten van de toegepaste additieven om de negatieve effecten van verzuring tegen te gaan, zijn op korte termijn niet proefondervindelijk vast te leggen. Over circa 10 jaar dient de behandeling met kalk te worden herhaald. Het is daarom wenselijk om voor die tijd voldoende ervaring met de alternatieven voor kalk te hebben opgedaan, zodat deze kunnen worden toegepast in het Noorderbos. Daarom wordt aanbevolen om in de vervolgfase van het project de bodem kunstmatig te verzuren tot een pH van 4, de zuurgraad die als normaal kan worden verondersteld voor bosbodems. Zwavel is een geschikt middel om de bodem te verzuren. Door microbiële omzettingen ontstaat zwavelzuur. Voordeel van deze methode is dat er voldoende kennis en ervaring voorhanden is en de methode niet zal leiden tot toevoeging van additionele zouten in de bodem.

Toepassen van lagere doseringen voor ijzer en zeoliet

De toegepaste doseringen voor ijzer en zeoliet zijn hoog. Bij grootschalige toepassing van deze stoffen zal dit leiden tot zeer grote hoeveelheden. Daarom wordt aanbevolen om in de vervolgfase kennis en ervaring op te doen met een lagere dosering op laboratorium- of proefveldschaal.

Inzicht verkrijgen in accumulatie van zware metalen door de aanwezige bomen

Tijdens fase A was het niet mogelijk de accumulatie van metalen door de aangeplante bomen te bepalen en hiermee inzicht te verkrijgen in de commerciële afzet van hakhout. De bomen waren te klein en hadden nauwelijks blad. Aanbevolen wordt om in het vervolg het blad van de bomen te bemonsteren en te analyseren op zware metalen. Dit dient bij voorkeur te gebeuren in het najaar. De bomen hebben dan voldoende blad gevormd en de eventuele opgenomen zware metalen worden in het najaar naar het blad getransporteerd, zodat deze met de bladval worden uitgescheiden. Bemonsteren en analyseren van schors en takken met het oog op de afzet van hakhout zonder de bomen te beschadigen, is pas mogelijk wanneer de bomen voldoende zijn ontwikkeld.

Extensiveren van de monitoring

Een selectie van een geschikt pakket om de effecten van de bosaanleg en de toegepaste additieven te bepalen is in dit stadium niet mogelijk. Wel kan het monitoringsprogramma worden geëxtensiverd en worden toegespitst op proeflocatie I. Als proeflocatie is deze geschikter vanwege hogere concentraties en een duidelijker gradiënt. Ook kunnen enkele analyses 1-maal per jaar worden uitgevoerd in plaats van 2-maal. Na uitvoering van fase B, zal naar verwachting een definitief monitoringsplan voor het gehele gebied kunnen worden opgesteld. Dit kan parallel lopen aan de (op termijn geplande) actualisatie van het bodembeheersplan.

LITERATUUR

Ainsworth, C.C., J.L. Pilon, P.L. Gassman and W.G.v.d. Sluys, 1994. Cobalt, cadmium and lead sorption to hydrous oxide residence time effect. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1625-1623.

Bartlett, R.J. and B.R. James, 1979. Behaviour of Chromium in soils: III. Oxidation. *Journal of Environmental. Quality.* 5: 31-35.

Beek, J. en K. Harmsen, 1977. Vloevelden van Tilburg. Verwijdering van fosfaten en zware metalen uit rioolwater en accumulatie van deze componenten in de bodem. Interne mededeling van het Laboratorium voor Landbouwscheikunde nr. 32, Wageningen.

Begon, M., J.L. Harper, C.R. Townsend, 1990. *Ecology. Individuals, populations and communities.* Second edition. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Boisson, J., A. Ruttens, M. Mench and J. Vangronsveld, 1998. Short term in situ immobilization of Cd and Ni by beringiete and steel shots application to long term sludged plots. *Agronomie* 18:347-359.

Brummer, G. and U. Herms, 1983. Influence of soil reaction and organoic matter on the solubility of metals in soils. In: Ulrich, B. and J. Pankrath. *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems.* D. Reidel Publishing Co. Dordrecht, The Netherlands. pp. 233-243.

Dolfing, J., 2000. In-situ immobilisatie van verontreinigde grond. Alterra-rapport 035, Wageningen.

Doremalen, H. van, 1993. Blauwsloten en riolen. Een milieu-historische studie over Tilburg en zijn rioolstelsel. Stichting tot Behoud van Tilburgs Cultuurgoed, Tilburg.

Gestel, C.A.M. van, E.M. Dirven van Breemen, J.W. Kamerman, 1992. Beoordeling van gereinigde grond. IV. Toepassing van bioassays met planten en regenwormen op referentiegronden. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, RIVM-rapportnr. 216402004, Bilthoven.

Groenenberg, J.E., J. Bril, W.C. Ma, J. Harmsen, A. v.d. Toorn, 1999a. Risico-analyse van met chroom, arseen en zware metalen verontreinigde vloevelden "de Zandleij" Tilburg. Literatuur- en verkennend onderzoek. Wageningen Universiteit en Researchcentrum, Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied, rapport 512.1, Wageningen.

Groenenberg, J.E., J. Bril, W.C. Ma, J. Harmsen, A. v.d. Toorn, 1999b. Risico-analyse van met chroom, arseen en zware metalen verontreinigde vloevelden "de Zandleij" Tilburg. Ecotoxicologisch en bodemchemisch onderzoek. Wageningen Universiteit en Researchcentrum, Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied, rapport 512.2, Wageningen.

H+N+S, 1999. Noorderbos. Definitief ontwerp voor een 100 hectare bos. H+N+S Landschapsarchitecten, Utrecht.

Haan, F.A.M., de, 1972. Resultaten van belasting van de bodem met grote hoeveelheden afvalstoffen. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, februari 1972, Wageningen.

Heidemij, 1986. Oriënterend bodemonderzoek vloeveldencomplex "de Zandleij". Heidemij Adviesbureau, rapportnr. 632-31661-1, 's-Hertogenbosch.

Heidemij, 1992. Indicatief bodemonderzoek vloeveldencomplex "de Zandleij". Heidemij Adviesbureau, rapportnr. 632/ZA92/F490/33406-1, 's-Hertogenbosch.

Heidemij, 1993a. Nader bodemonderzoek (fase 1) vloeiveldencomplex "de Zandleij" te Tilburg. Heidemij Advies, rapportnr. 632/ZA93/C373/33769-1, 's-Hertogenbosch.

Heidemij, 1993b. Nader bodemonderzoek (fase 2) vloeiveldencomplex "de Zandleij" te Tilburg. Heidemij Advies, rapportnr. 632/ZA93/C826/34102, 's-Hertogenbosch.

ISO 11348-3, 1998. Water quality – Determination of inhibitory effects of water samples on the light emission of *Vibrio fischeri*. Part 3 method with freeze dried bacteria.

ISO 11267, 1999. Soil quality – Inhibition of reproduction of *Collembola (Folsomia candida)* by soil pollutants.

Kratz, W., 1998. The Bait-Lamina test. General Aspects, Applications and Perspectives. Environmental Science and Pollution Research 5, 94-96.

Ma, W.C., 1987. Heavy metal accumulation in the mole, *Talpea europea*, and earthworms as an indicator of metal bioavailability in terrestrial environments. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 39, 933-938.

Ma, W.C., H. van Wezel, D. van den Ham, 1992. Achtergrondgehalten van vijftien metaalelementen in de bodem, de vegetatie en de bodemfauna van twaalf natuurgebieden in Nederland. Instituut voor Bos en Natuuronderzoek IBN-DLO, RIN-rapport 92/11, Arnhem.

Maas, J.L., C. van de Guchte, F.C.M. van Kerkum, 1993. Methodebeschrijvingen voor de beoordeling van verontreinigde waterbodems volgens de TRIADE-benadering. Methodebeschrijvingen voor enkele bioassays, bioaccumulatiemetingen en veldstudies. Notanr. 93.027, Rijkswaterstaat RIZA, juli 1993.

Mench, J.M., J.D.V. Vangronsveld and H. Clijsters, 1994. Evaluation of metal mobility, plant availability and immobilisation by chemical agents in a limed silty soil. Environmental Pollution 86: 279-286.

Muijs, B., W. Hendriks, C.A.M. van Gestel, J. Bloem, W.C. Ma, 2000. Genereren en beoordelen van referentiegegevens voor terrestrische ecotesten. Rapporten Programma Geïntegreerd Bodemonderzoek, deel 36, Wageningen.

NEN-5766. 1990. Bodem – Plaatsing van peilbuizen en bepaling van stijghoogten van grondwater in de verzadigende zone. Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.

NEN-5744. 1991. Bodem – Monsterneming van grondwater ten behoeve van de bepaling van metalen, anorganische verbindingen, matige-vluchtige organische verbindingen en fysische-chemische eigenschappen. Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.

Pankakoski, E., H. Hyvärinen, M. Jalkanen, I. Koivisto, 1992. Accumulation of heavy metals in the mole in Finland. Environmental Pollution 80, 9-16.

Pierce, M.L. and C.B. Moore, 1982. Adsorption of arsenite and arsenate on amorphous ironhydroxide. Water Research 16: 1247-1253.

Singh, B.R. and L. Osté, 2001. In situ immobilisation of metals in contaminated or naturally metal-rich soils. Environmental Reviews. 9: 1-18.

Steven, J.D., L.J. Davies, E.K. Stanleu, R.A. Abbott, M. Ilnat, L. Bidstrup en J.F. Jaworski, 1976. Effects of chromium in the Canadian environment. NRCC 15071.

Straalen, N.M. van, J.A.C. Verkleij, redactie 1993. Leerboek Oecotoxicologie. VU-Uitgeverij, Amsterdam.

Sverdrup, H., and P. Warfvinge, 1992. Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model PROFILE. *Journal of Applied Geochemistry*. 27:273-283.

Vangronsveld, J., F. Van Asche and H. Clijsters, 1995. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals. In situ metal immobilisation and revegetation. *Environmental Pollution* 87: 51-59.

Vangronsveld, J., J.V. Colpeart and K.K. van Tichelen, 1996. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: Physicochemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation. *Environmental Pollution* 94, 131-140.

Vangronsveld, J., A. Ruttens and H. Clijsters, 1998. The use of cyclonic ashes of fluidized bed burning of coal mine refuse for immobilisation in soils. In trace elements in coal and coal combustion residues. Edited by K.S. Sajwan, R.F. Keefer and A.K. Alva. CRC Publishers. Cited after Singh And Osté (2001).

Witteveen+Bos, 1999. Saneringsplan Vloevelden/Noorderbos te Tilburg (NB/545/071). Witteveen+Bos Raadgevende Ingenieurs, projectcode Tb78.1, definitief 02, Deventer.

Toegepaste standaard werkvoorschriften Alterra:

E 0100: Bepaling van het gloeiverlies in grond.

E 0103: Bepaling van de pH in grond- en watermonsters.

E1004: Destructie van grond, compost en gewas met koningswater.

E1301: Bepaling van de actueel beschikbare fractie aan Al, As, Ca, Cd, Cu, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, en Zn in grond met ICP-AES na extractie met een calciumchloride oplossing.

E1304: Bepaling van de concentratie van Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, P, S, Zn in waterige oplossingen met behulp van ICP-AES.

E1306: Bepaling van de potentieel beschikbare fractie aan Al, As, Ca, Cd, Cu, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, en Zn in grond met ICP-AES na extractie met $0,05 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ Ca-EDTA (pH 5) of $0,43 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ salpeterzuur.

E1307: Bepaling van het gehalte aan Al, As, Ca, Cd, Cu, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, en Zn in grond, compost en gewas met behulp van ICP-AES na destructie met koningswater.

E3200: Het vervaardigen van polyesteracrylaat cups voor het nemen van watermonsters in de verzadigde en onverzadigde zone van de bodem.

E3202: Het installeren van cups in de bodem.

E3203: Het bemonsteren van geïnstalleerde cups.

BIJLAGE A

RESULTATEN CHEMISCH ONDERZOEK VOORJAARSBEMONSTERING

Concentraties metalen en nutriënten op de meetpunten (HNO₃-extractie)

meetpunt	diepte cm-mv	Al mg/kg	As mg/kg	Ca mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Fe mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg
1	0-30	390,60	0,10	696,70	9,10	5,60	114,50	108,40	105,80
1	60-85	362,60	1,40	335,90	0,90	0,80	61,20	25,90	26,70
1	85-110	355,00	0,60	331,80	0,30	0,20	23,70	26,80	26,10
2	0-20	1.385,60	4,60	781,20	117,60	13,60	875,00	57,30	60,60
2	40-45	1.401,70	12,10	646,70	12,40	9,40	609,70	25,80	33,70
2	60-80	301,80	2,70	120,90	0,80	0,90	113,40	27,00	15,10
3	0-20	1.493,70	3,10	672,20	24,30	5,90	239,90	180,10	58,80
3	20-45	1.544,50	2,70	595,70	24,80	5,80	241,20	57,60	81,50
3	60-80	543,30	1,40	181,50	1,30	1,00	126,50	44,00	24,90
4	0-20	825,10	1,10	772,70	59,00	5,80	832,60	154,80	57,40
4	110-130	414,80	0,10	91,10	0,20	0,10	11,40	12,80	12,40
4	45-110	718,20	1,80	527,50	2,50	1,70	151,90	34,20	30,50
5	0-20	980,90	0,80	327,40	26,60	2,90	213,60	90,90	55,50
5	40-80	624,80	1,40	361,80	4,10	2,90	91,20	43,60	33,30
5	80-110	299,20	1,50	90,90	0,70	0,70	30,90	33,40	14,30
6	0-20	987,60	2,00	619,00	73,90	7,40	325,40	102,20	95,50
6	50-90	492,00	0,40	364,60	2,00	0,40	6,40	25,80	21,90
6	90-110	623,30	0,30	351,70	2,80	0,60	23,70	24,40	28,10
7	0-35	1.004,60	1,50	819,30	192,50	13,30	503,60	55,10	83,20
7	70-90	400,10	1,50	139,20	4,30	0,80	86,40	24,70	23,70
8	0-20	1.737,30	8,10	1.119,60	296,60	29,50	1.251,90	29,20	82,10
8	20-45	1.994,20	7,80	2.646,80	751,90	45,10	2.114,70	31,80	185,40
8	60-80	549,70	1,10	129,10	6,30	2,30	180,40	12,60	14,30
9	0-10	161,80	0,40	72,80	0,40	0,70	553,20	21,90	16,30
9	10-20	301,00	-	46,70	0,40	0,40	367,80	16,70	11,50
9	60-80	339,00	0,20	42,50	0,20	0,40	251,30	17,10	11,80
10	0-20	812,70	1,80	593,60	31,40	3,80	287,10	109,60	94,60
10	25-50	1.144,00	1,20	1.336,30	6,00	6,20	41,40	32,50	87,20
10	60-80	854,40	3,20	397,60	1,70	0,70	20,70	38,40	40,30
11	0-20	1.267,80	2,30	839,90	16,70	5,10	141,60	43,60	63,20
11	60-80	619,60	0,50	167,40	0,70	0,50	25,90	21,50	21,00
12	0-30	650,70	1,00	402,50	13,00	2,90	318,00	131,80	64,80
12	60-80	430,10	1,50	262,80	1,90	1,00	631,40	135,60	34,00
13	0-15	837,90	1,10	525,10	16,40	3,60	195,60	98,50	36,10
13	15-30	961,00	1,80	426,10	12,00	1,30	75,00	38,40	21,50
13	60-80	767,20	0,20	199,80	0,40	0,30	23,00	19,30	22,40
14	0-20	1.075,40	2,30	636,30	21,40	4,30	179,60	87,80	66,10
14	60-80	573,00	3,00	260,90	1,50	0,70	22,60	46,70	22,30
16	0-20	840,70	2,40	868,00	107,80	26,40	1.367,90	158,80	99,60
16	30-45	380,60	2,20	479,80	6,80	4,50	290,20	56,40	54,30
16	80-100	331,00	1,20	254,20	0,70	0,60	164,00	101,60	33,80
17	0-20	2.141,80	2,70	1.232,80	57,70	5,70	201,50	60,00	92,90
17	60-70	642,10	2,80	462,20	4,10	1,10	18,90	21,90	38,10
17	60-70	988,70	2,10	899,20	26,30	4,10	77,50	23,80	49,60
18	0-20	1.043,50	2,10	828,60	55,70	5,50	185,80	191,50	79,20
18	45-90	1.204,90	3,50	728,70	9,70	2,80	55,50	77,70	37,60
18	90-100	1.696,10	6,50	699,40	1,30	0,60	21,40	166,40	75,80
19	0-20	1.595,40	1,90	1.405,30	30,60	5,40	143,20	18,70	73,60
19	60-80	880,40	1,30	220,10	3,10	0,50	247,80	17,00	26,40
21	0-20	655,90	0,50	540,70	4,70	3,10	188,90	75,50	77,40
21	40-50	2.252,60	5,40	1.399,50	0,80	1,00	171,90	25,50	133,80
21	80-100	1.131,80	0,30	213,10	0,30	-	13,20	26,20	26,30
22	0-20	935,80	1,40	680,50	59,90	8,80	616,40	22,00	42,50
22	30-60	690,70	2,40	814,80	4,10	4,30	195,20	10,50	46,80
22	80-100	462,90	1,20	450,60	2,10	1,00	87,00	10,00	30,80
23	0-20	622,90	2,60	352,40	24,30	10,50	545,10	64,30	91,60
23	110-130	1.135,50	2,50	176,80	1,10	0,30	116,00	54,20	21,30
23	50-110	2.145,40	2,40	463,50	3,30	0,30	375,80	79,20	37,90
24	0-30	923,50	3,00	694,90	49,90	6,40	667,10	52,10	64,20
24	60-100	844,80	2,90	285,90	3,30	1,70	765,00	29,70	29,30
25	0-10	819,20	3,30	1.013,40	44,20	7,50	382,10	84,30	90,80
25	60-80	356,60	1,20	261,00	1,30	0,50	374,90	68,10	26,00

Concentraties metalen en nutriënten op de meetpunten (HNO₃-extractie)

meetpunt	diepte cm-mv	Mn mg/kg	Na mg/kg	Ni mg/kg	P mg/kg	Pb mg/kg	S mg/kg	Zn mg/kg
1	0-30	18,80	52,30	5,60	166,40	8,20	19,60	27,00
1	60-85	7,00	69,70	1,40	65,40	1,20	10,50	3,40
1	85-110	2,10	45,40	0,30	13,70	0,10	10,70	0,60
2	0-20	14,60	53,40	26,30	608,50	22,00	33,00	76,70
2	40-45	9,10	164,30	19,20	134,50	4,30	32,70	50,50
2	60-80	1,30	44,70	1,40	12,20	0,50	6,50	8,20
3	0-20	20,50	55,80	9,30	556,70	9,00	25,80	23,70
3	20-45	15,40	170,40	8,60	541,50	10,00	25,40	19,80
3	60-80	6,60	48,40	1,60	30,40	0,60	8,20	5,30
4	0-20	11,20	52,80	22,30	518,60	14,20	26,40	40,50
4	110-130	0,20	63,80	-	29,90	0,10	9,30	0,20
4	45-110	10,10	55,10	3,70	79,00	1,60	16,70	9,90
5	0-20	7,10	49,80	5,10	435,70	11,60	18,10	14,50
5	40-80	31,10	47,10	4,40	213,00	3,80	13,00	11,80
5	80-110	3,00	113,70	0,80	22,20	0,50	6,40	2,50
6	0-20	5,00	60,40	8,40	490,60	20,00	27,60	35,30
6	50-90	5,80	49,20	1,40	17,00	0,30	9,90	4,40
6	90-110	1,30	115,00	1,00	31,50	1,10	15,00	3,20
7	0-35	8,70	63,50	30,70	634,20	30,10	29,70	57,90
7	70-90	2,20	47,70	1,60	7,50	0,90	8,30	6,70
8	0-20	48,00	64,20	74,00	976,80	39,60	45,00	164,40
8	20-45	99,20	72,60	136,10	1.715,30	76,80	106,70	359,40
8	60-80	2,60	54,60	4,80	14,40	0,30	10,80	14,60
9	0-10	1,60	51,40	0,20	32,20	10,00	10,80	1,80
9	10-20	0,70	48,20	0,10	9,00	3,80	13,00	1,20
9	60-80	2,50	50,30	-	7,30	0,80	12,70	0,60
10	0-20	14,10	53,50	8,30	400,80	14,30	20,20	19,90
10	25-50	110,70	55,50	42,50	507,00	5,70	23,80	55,10
10	60-80	2,40	49,80	1,70	204,40	0,50	15,60	6,10
11	0-20	27,60	51,10	9,60	543,00	14,20	24,10	20,90
11	60-80	5,50	47,20	0,40	15,80	0,50	8,10	0,60
12	0-30	7,60	50,40	3,80	310,50	28,40	16,60	13,00
12	60-80	14,30	53,10	2,00	77,20	2,20	11,50	9,00
13	0-15	26,70	50,70	4,30	318,70	12,40	18,70	14,60
13	15-30	23,70	47,40	1,90	289,50	4,40	18,50	7,80
13	60-80	0,70	82,20	0,10	15,90	0,50	10,30	1,00
14	0-20	37,30	55,80	9,20	562,00	9,00	19,70	20,60
14	60-80	5,60	49,80	1,70	166,10	0,50	9,00	8,10
16	0-20	111,40	60,40	25,10	632,40	119,80	31,20	74,20
16	30-45	39,40	49,50	6,50	159,70	10,70	13,00	21,20
16	80-100	6,30	49,90	0,30	51,30	1,30	8,70	3,30
17	0-20	50,40	57,30	21,70	557,50	16,10	28,60	36,80
17	60-70	1,80	55,40	1,50	133,20	1,10	15,70	5,90
17	60-70	11,70	54,40	8,10	376,70	7,70	23,10	19,10
18	0-20	45,50	57,80	15,60	543,80	16,20	24,50	33,20
18	45-90	13,60	52,50	5,60	395,70	3,90	20,60	15,60
18	90-100	1,90	91,10	0,20	119,30	1,40	18,10	2,80
19	0-20	57,60	48,40	26,00	715,80	11,70	32,90	33,20
19	60-80	0,80	51,80	1,90	168,80	0,90	10,20	5,90
21	0-20	17,40	54,50	3,50	227,00	7,60	16,90	15,50
21	40-50	28,70	67,90	5,80	50,00	6,70	28,50	27,90
21	80-100	0,40	48,90	-	34,20	0,40	12,80	1,30
22	0-20	14,10	54,40	24,50	677,60	14,90	28,70	42,30
22	30-60	25,80	54,40	20,70	275,50	5,70	18,10	27,60
22	80-100	5,40	49,60	2,60	53,10	1,10	13,20	5,50
23	0-20	2,90	55,60	1,10	206,50	29,90	18,10	5,70
23	110-130	2,00	47,50	0,20	8,60	0,50	12,50	19,10
23	50-110	10,20	56,50	1,20	54,00	1,40	20,80	14,70
24	0-30	53,80	53,60	22,10	571,40	29,90	22,70	34,40
24	60-100	24,50	51,80	3,10	177,60	2,20	12,40	9,30
25	0-10	47,40	61,90	20,10	413,70	15,50	23,10	34,50
25	60-80	1,80	47,60	0,80	30,20	0,70	8,30	1,30

Metalen en nutriënten bodemvocht meetpunten (Ca(NO₃)₂-extractie)

meetpunt	diepte cm-mv	Inweeg (g)	pH	Ec (µS/cm)	TC (mg/l)	IC (mg/l)	DOC (mg/l)	Al (mg/l)	As (µg/l)
1	0-30	20,0241	4,9	496	298,00	0	298	0,290	0,001
1	60-85	20,0351	5,4	457	88,01	2,78	85,23	0,198	35,949
1	85-110	20,0093	5,69	442	88,10	0,82	87,28	0,186	6,863
2	0-20	20,0235	4,92	454	98,11	1,02	97,09	0,307	0,001
2	40-45	20,1095	5,65	432	242,70	2,19	240,5	0,346	3,783
2	60-80	20,3136	5,99	428	6,89	0,81	6,07	0,095	18,593
3	0-20	20,0026	5,31	518	356,60	4,67	351,9	0,753	21,538
3	20-45	20,0842	4,97	478	253,10	4,58	248,6	0,513	4,572
3	60-80	20,1319	5,68	435	36,84	2,01	34,83	0,373	1,319
4	0-20	20,0567	4,58	488	194,50	4,41	190,1	0,668	2,739
4	45-110	20,0785	5,35	456	142,40	3,62	138,8	0,457	0,001
4	110-130	20,0285	5,26	452	56,75	1,06	55,69	0,337	0,001
5	0-20	20,1494	4,83	484	267,80	3,7	264,1	0,438	0,001
5	40-80	20,0945	5,37	464	102,00	3,29	98,7	0,317	15,765
5	80-110	20,1919	5,55	446	54,06	1,72	52,34	0,191	10,269
6	0-20	20,0687	5,05	515	291,90	3,54	288,3	0,551	7,308
6	50-90	20,0831	5,64	442	54,40	1,15	53,25	0,164	1,970
6	90-110	20,0202	5,66	449	61,63	1,18	60,45	0,250	23,895
7	0-35	20,1711	5,08	506	439,30	4,01	435,3	0,714	10,193
7	70-90	20,0698	5,82	443	14,97	1,56	13,41	0,048	0,001
8	0-20	20,0515	4,91	458	546,90	0	546,9	0,815	34,752
8	20-45	20,0433	4,98	549	800,00	3,65	797,2	1,953	23,554
8	60-80	20,0728	5,93	457	16,50	0,89	15,61	0,146	0,052
9	10-20	20,017	3,59	484	17,71	0	17,71	2,716	0,001
9	0-10	20,0566	3,06	558	108,60	0	108,6	1,452	0,299
9	60-80	20,1171	3,93	460	8,75	0	8,75	2,908	0,001
10	0-20	20,0357	5,61	450	439,50	5,61	433,9	0,586	2,198
10	25-50	20,1148	5,69	456	100,30	3,91	96,37	0,159	0,001
10	60-80	20,0548	5,95	461	43,10	2,89	40,21	0,295	20,834
11	0-20	20,0059	5,03	477	214,70	3,53	211,2	0,317	1,214
11	60-80	20,0232	5,69	444	10,46	0,81	9,65	0,102	0,001
12	0-30	20,0831	5,28	495	425,50	3,79	421,7	0,386	95,945
12	60-80	20,0232	5,79	461	123,00	3,66	119,4	0,390	0,001
13	0-15	20,1318	4,82	513	307,90	3,16	304,8	0,323	9,781
13	15-30	20,1329	4,97	458	96,42	3,76	92,67	0,311	14,275
13	60-80	20,0144	5,56	447	51,70	0,75	50,94	0,204	0,564
14	0-20	20,0056	5,18	491	47,99	4,15	43,83	0,463	9,007
14	60-80	20,0597	5,43	451	14,28	0	14,28	0,226	13,869
16	0-20	20,0022	4,98	485	112,30	3,7	108,6	0,301	4,990
16	30-45	20,0358	6,03	490	120,60	2,12	118,5	0,560	11,318
16	80-100	20,0329	5,72	448	15,11	0,92	14,18	0,105	2,600
17	0-20	20,0645	5,77	511	68,75	5,16	63,6	0,442	2,811
17	60-70	20,1311	6,35	447	44,95	4,31	40,64	0,220	0,001
17	60-70	20,0241	5,87	471	66,84	2,3	64,54	0,291	11,879
18	0-20	20,0552	5,27	513	164,50	2,66	161,9	1,021	9,839
18	45-90	20,0347	5,81	479	23,86	1,84	22,02	0,595	10,763
18	90-100	20,119	6,45	473	15,73	2,26	13,47	0,208	0,093
19	0-20	20,0592	5,52	493	62,10	3,92	58,18	0,468	0,113
19	60-80	20,0857	5,8	451	46,85	4,08	42,77	0,763	3,566
21	0-20	20,0428	4,93	506	146,00	2,09	143,9	0,491	0,001
21	40-50	20,0468	5,2	493	29,74	0,5	29,23	0,277	0,001
21	80-100	20,0727	5,65	445	96,49	0	96,49	0,458	0,355
22	0-20	20,0073	4,92	527	117,30	4,01	113,3	1,220	9,708
22	30-60	20,0302	5,65	496	57,29	3,26	54,03	0,255	15,565
22	80-100	20,0654	5,84	476	69,33	0,57	68,76	0,251	0,001
23	0-20	20,0396	5,1	487	214,00	2,26	211,7	0,237	4,781
23	50-110	20,1057	5,27	444	62,95	0	62,95	0,149	8,713
23	110-130	20,0431	5,45	436	49,17	0,5	48,67	0,037	2,480
24	0-30	20,0729	5	500	343,20	4,08	339,1	0,461	0,001
24	60-100	20,0061	5,72	452	13,24	1	12,24	0,158	0,001
25	0-10	20,0198	6,2	583	380,20	15,06	365,1	0,408	0,001
25	60-80	20,0048	6,23	447	51,61	0,97	50,64	0,223	3,598

Metalen en nutriënten bodemvocht meetpunten (Ca(NO₃)₂-extractie)

meetpunt	diepte cm-mv	Ca (mg/l)	Cd (µg/l)	Cu (µg/l)	Cr (µg/l)	Fe (µg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)
1	0-30	47,993	0,344	9,545	16,647	79,027	30,401	15,084	0,422
1	60-85	69,535	0,001	0,457	4,380	39,605	7,271	6,338	0,032
1	85-110	68,883	0,445	0,337	3,978	19,216	8,242	5,669	0,014
2	0-20	72,024	1,332	13,842	24,731	199,956	6,374	6,524	0,044
2	40-45	60,569	1,510	7,510	36,034	199,141	10,841	9,785	0,178
2	60-80	70,810	1,200	8,708	5,946	42,879	6,894	2,675	0,050
3	0-20	43,368	0,039	10,075	24,142	183,194	53,487	10,186	0,098
3	20-45	52,549	0,971	3,808	22,986	129,539	10,513	14,234	0,156
3	60-80	68,468	0,792	0,633	4,915	258,817	8,685	4,649	0,043
4	0-20	53,148	2,190	12,830	75,142	315,955	32,714	8,360	0,404
4	45-110	64,125	1,135	1,158	13,629	155,665	9,738	5,208	0,073
4	110-130	71,381	0,360	0,512	3,460	35,383	3,165	3,170	0,029
5	0-20	49,579	0,669	0,710	18,307	97,306	21,915	12,477	0,212
5	40-80	64,108	0,858	1,045	7,067	60,908	10,354	7,057	0,116
5	80-110	69,049	0,129	4,776	4,225	34,527	8,813	3,453	0,085
6	0-20	47,171	1,223	5,692	50,555	262,119	25,238	15,053	0,061
6	50-90	65,365	0,345	0,317	8,254	26,582	7,180	4,168	0,044
6	90-110	63,064	0,264	0,318	8,712	12,314	6,498	6,160	0,030
7	0-35	56,694	1,524	19,515	119,072	450,316	10,640	13,166	0,098
7	70-90	69,935	0,512	0,905	5,250	30,627	3,364	5,980	0,027
8	0-20	55,435	3,821	71,907	280,689	471,481	3,629	12,183	0,755
8	20-45	77,005	4,602	245,420	769,359	1167,322	2,169	16,634	1,560
8	60-80	77,630	1,387	8,596	13,988	98,846	1,919	3,298	0,085
9	10-20	69,881	3,691	0,742	2,992	276,274	4,176	1,925	0,071
9	0-10	59,941	3,282	4,943	3,652	380,008	5,428	3,826	0,293
9	60-80	70,399	1,914	0,314	1,365	44,077	4,025	1,794	0,184
10	0-20	49,205	0,393	18,655	63,838	234,244	20,867	13,512	0,209
10	25-50	65,266	0,179	0,554	6,668	7,572	4,678	9,604	0,047
10	60-80	68,888	0,001	0,275	6,450	12,892	7,920	7,769	0,010
11	0-20	67,937	1,046	5,258	13,599	51,861	5,061	7,368	0,202
11	60-80	73,074	0,783	0,354	2,575	5,429	2,841	4,837	0,053
12	0-30	50,614	0,566	3,149	14,789	200,236	34,054	11,099	0,098
12	60-80	55,769	1,050	0,725	5,796	782,069	33,006	5,028	0,046
13	0-15	56,638	0,001	0,411	15,571	80,398	30,387	7,677	0,320
13	15-30	69,172	0,830	0,292	8,713	21,272	8,821	4,212	0,187
13	60-80	68,166	0,890	0,285	2,287	25,344	2,038	7,143	0,012
14	0-20	53,688	0,823	0,928	17,532	89,761	8,989	11,364	0,093
14	60-80	67,638	1,276	0,567	7,173	29,803	10,873	4,658	0,051
16	0-20	52,625	4,807	31,790	17,416	259,768	25,849	10,924	0,212
16	30-45	55,466	0,594	16,367	19,530	626,683	3,989	10,004	0,177
16	80-100	59,261	0,940	0,934	2,339	62,121	23,480	6,015	0,009
17	0-20	58,000	0,345	4,028	45,291	121,721	2,539	12,615	0,018
17	60-70	69,819	0,117	0,381	6,116	12,482	3,749	6,671	0,003
17	60-70	66,402	0,947	4,737	20,238	37,541	0,854	6,928	0,018
18	0-20	40,188	0,452	6,673	81,547	226,981	23,758	8,764	0,075
18	45-90	57,280	0,589	4,586	12,308	57,671	4,353	5,388	0,032
18	90-100	53,164	0,328	0,341	2,866	30,867	16,688	6,740	0,001
19	0-20	64,276	0,001	3,482	26,696	100,778	0,842	8,974	0,049
19	60-80	72,266	0,029	0,436	7,889	354,201	2,699	5,999	0,024
21	0-20	53,988	0,543	0,808	8,196	147,742	8,237	12,343	0,130
21	40-50	48,225	0,584	0,177	4,780	45,767	0,923	13,237	0,031
21	80-100	71,565	0,217	0,143	2,204	30,586	3,443	5,679	0,010
22	0-20	63,470	2,218	22,662	93,606	674,350	1,419	9,238	0,300
22	30-60	65,253	0,676	0,534	11,483	79,569	0,787	6,845	0,058
22	80-100	69,247	0,496	5,659	6,065	61,223	1,187	6,420	0,055
23	0-20	55,892	0,876	7,335	18,797	138,518	11,934	16,079	0,050
23	50-110	53,408	0,230	0,130	3,652	69,229	22,265	6,794	0,034
23	110-130	62,131	0,977	-0,102	2,379	8,988	13,560	5,379	0,011
24	0-30	62,726	1,843	8,044	43,602	267,326	8,761	11,835	0,254
24	60-100	71,221	1,350	4,002	5,440	231,091	4,976	6,011	0,061
25	0-10	84,297	0,435	6,233	33,880	221,740	18,111	12,844	0,055
25	60-80	67,053	0,582	0,361	2,605	353,160	14,024	5,144	0,006

Metalen en nutriënten bodemvocht meetpunten (Ca(NO₃)₂-extractie)

meetpunt	diepte cm-mv	Na (mg/l)	Ni (µg/l)	P (mg/l)	Pb (µg/l)	S (mg/l)	Zn (mg/l)
1	0-30	11,412	20,424	5,611	0,065	2,308	0,431
1	60-85	8,165	11,409	0,535	0,001	1,725	0,058
1	85-110	7,811	2,770	-0,045	1,331	1,513	0,029
2	0-20	7,900	134,875	0,024	0,001	2,092	0,581
2	40-45	10,209	123,609	1,549	0,001	2,120	1,068
2	60-80	2,288	84,159	-0,056	1,766	1,239	0,240
3	0-20	9,846	38,548	2,383	5,550	1,695	0,203
3	20-45	8,973	44,618	2,039	2,823	1,419	0,262
3	60-80	1,853	49,669	0,010	0,001	1,164	0,114
4	0-20	11,649	178,430	1,898	15,256	1,993	1,026
4	45-110	7,744	56,612	0,175	7,246	1,680	0,235
4	110-130	7,397	4,039	-0,042	0,001	1,923	0,061
5	0-20	8,848	36,625	1,742	0,001	1,459	0,316
5	40-80	7,714	45,724	2,256	6,465	1,390	0,214
5	80-110	6,425	36,562	0,029	0,001	1,345	0,125
6	0-20	12,513	33,482	3,291	15,459	1,914	0,381
6	50-90	7,783	39,187	-0,010	7,220	1,444	0,130
6	90-110	7,352	17,473	-0,028	0,001	1,650	0,173
7	0-35	11,277	168,443	2,722	33,326	2,197	0,759
7	70-90	6,880	67,117	-0,041	8,021	1,685	0,113
8	0-20	11,216	538,803	3,860	28,749	5,097	2,062
8	20-45	9,623	834,349	6,528	34,297	15,553	2,610
8	60-80	6,505	243,329	-0,031	4,881	2,156	0,524
9	10-20	6,297	16,594	-0,002	20,081	2,056	0,367
9	0-10	8,485	25,117	0,366	42,539	1,629	0,545
9	60-80	6,028	6,670	-0,045	0,001	2,791	0,153
10	0-20	8,511	60,265	2,378	0,001	2,577	0,082
10	25-50	6,870	88,048	4,701	2,450	1,286	0,219
10	60-80	6,978	15,286	0,828	9,317	2,096	0,048
11	0-20	7,332	63,730	1,679	0,001	1,699	0,282
11	60-80	5,784	15,968	-0,014	0,001	1,485	0,034
12	0-30	7,139	26,004	2,061	232,732	1,995	0,169
12	60-80	6,544	32,490	0,212	9,149	1,815	0,067
13	0-15	10,369	13,826	1,540	0,001	2,279	0,155
13	15-30	9,102	16,344	0,603	0,001	1,759	0,177
13	60-80	8,713	-1,115	-0,038	1,932	1,560	0,031
14	0-20	22,328	40,917	1,992	0,001	3,957	0,704
14	60-80	8,244	49,190	1,624	0,001	1,405	0,199
16	0-20	10,663	192,367	1,229	6,989	2,042	1,179
16	30-45	27,557	74,992	1,216	33,622	4,668	0,982
16	80-100	7,115	6,062	0,151	0,001	1,754	0,027
17	0-20	26,114	29,433	1,210	0,001	4,596	0,545
17	60-70	6,250	7,927	0,236	0,001	1,414	0,029
17	60-70	18,935	40,429	1,032	4,173	4,538	0,446
18	0-20	35,650	36,810	1,953	15,747	6,699	1,073
18	45-90	30,673	32,921	0,866	5,536	5,478	0,919
18	90-100	21,705	1,595	-0,041	2,035	2,764	0,025
19	0-20	24,610	54,625	2,136	2,230	6,020	0,859
19	60-80	6,486	42,548	0,435	7,511	1,182	0,059
21	0-20	25,635	15,598	1,225	7,853	4,833	0,801
21	40-50	33,820	13,667	-0,006	0,905	6,939	1,258
21	80-100	8,089	1,251	0,006	13,998	1,683	0,037
22	0-20	32,049	249,322	2,797	17,269	6,976	1,930
22	30-60	27,064	93,394	0,697	4,655	7,362	1,355
22	80-100	16,938	25,029	-0,023	0,001	3,240	0,261
23	0-20	8,315	6,990	0,525	0,001	2,098	0,124
23	50-110	9,132	2,785	-0,006	5,932	1,374	0,068
23	110-130	6,882	0,990	-0,066	0,001	1,802	0,258
24	0-30	9,500	122,527	3,317	17,910	2,289	0,450
24	60-100	6,468	53,667	0,321	9,943	1,583	0,102
25	0-10	9,749	31,728	1,099	1,291	2,117	0,060
25	60-80	6,296	13,929	0,048	0,001	1,595	0,030

Concentratie metalen grondwater proefvelden

Proefveld	As µg/L	Cd µg/L	Cr µg/L	Cu µg/L	Ni µg/L	Pb µg/L	Zn µg/L
PI 1	< 20,0	< 0,54	20,14	< 0,07	< 3,60	< 0,02	0,02
PI 2	< 20,0	< 0,54	9,76	< 0,07	37,47	< 0,02	0,17
PI 3	< 20,0	< 0,54	33,78	< 0,07	159,94	< 0,02	0,11
PII 1	< 20,0	< 0,54	22,04	< 0,07	26,41	< 0,02	0,04
PII 2	< 20,0	< 0,54	5,14	< 0,07	14,99	< 0,02	0,01
PII 3	< 20,0	< 0,54	23,58	< 0,07	12,23	< 0,02	0,03

Proefveld	Al mg/L	Ca mg/L	Fe mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Na mg/L	P mg/L	S mg/L
PI 1	0,28	54,71	< 0,08	15,58	8,29	0,005	52,04	0,12	33,52
PI 2	-	28,27	< 0,08	16,23	3,26	0,237	27,12	< 0,04	21,34
PI 3	1,14	20,74	0,36	20,96	3,60	0,035	17,88	0,09	12,91
PII 1	-	62,18	< 0,08	25,43	9,84	0,080	38,12	0,06	38,29
PII 2	-	1,71	3,50	1,50	0,75	0,041	153,97	< 0,04	71,07
PII 3	0,21	29,97	0,15	8,54	4,91	0,222	23,27	< 0,04	14,01

peilbuis	filter m-mv	stijghoogte m-mv	pH µS/cm	Ec -
PI 1	2,5-3,5	1,6	6,7	288
PI 2	2,5-3,5	1,7	6,8	369
PI 3	2,1-3,1	1,6	6,5	638
PII 1	2,0-3,0	1,4	6,5	622
PII 2	2,4-3,4	1,9	6,7	717
PII 3	2,3-3,3	1,9	6,6	330

Concentraties metalen en nutriënten proefvelden

proefvak	inweeg (g)	Al (mg/kg d.s.)	As (mg/kg d.s.)	Ca (mg/kg d.s.)	Cd (mg/kg d.s.)	Cr (mg/kg d.s.)	Cu (mg/kg d.s.)	Fe (mg/kg d.s.)	K (mg/kg d.s.)
0-20 cm-mv									
I.1-1	10,010	6121	20,7	3559	2,72	4133	128,7	8178	650
I.1-2	10,041	6570	29,8	3909	3,23	3992	156,2	9065	588
I.1-3	10,006	5921	24,8	3158	2,85	4392	135,8	8467	440
I.1-4	10,010	5224	13,6	2226	1,65	2638	70,9	6280	473
I.2-1	10,069	7435	5,5	843	0,41	1474	18,0	7948	430
I.2-2	10,004	3922	7,9	1059	0,70	1194	30,3	4557	458
I.2-3	10,026	3984	7,4	966	0,64	1066	24,7	4137	399
I.2-4	10,072	3810	6,5	1235	0,66	1157	22,8	3430	384
I.3	10,048	3737	4,8	1296	0,43	572	17,5	3059	411
II.1-1	10,020	3734	8,9	2103	0,93	1794	58,4	3806	291
II.1-2	10,024	3532	14,7	1682	0,86	962	37,9	2708	298
II.1-3	10,047	3628	14,9	1817	0,97	1255	43,1	3140	318
II.1-4	10,028	2916	8,4	1021	0,34	262	15,4	1761	232
II.2-1	10,029	2167	2,4	1408	0,28	158	13,3	1315	223
II.1-2	10,050	2155	2,6	1421	0,28	155	13,3	1326	235
II.1-3	10,007	2386	5,3	1411	0,29	141	11,3	1436	203
II.1-4	10,059	2346	6,0	1422	0,29	154	11,4	1384	190
II.3	10,018	3224	4,5	1130	0,21	120	10,0	1744	235
40-60 cm-mv									
I.1	1,013	16355	35,3	39133	2,34	68	111,6	31888	4147
I.2	10,030	3028	8,4	812	0,39	267	18,5	1869	285
I.3	10,040	3488	6,7	489	0,27	275	10,2	3373	384
II.1	10,020	3274	5,9	411	0,16	51	3,0	2810	355
II.2	10,048	3260	5,7	423	0,16	109	5,2	2463	316
II.3	10,009	1907	3,5	1246	0,24	111	7,8	1028	160
blanco	10,025	2100	3,1	964	0,22	144	9,2	1203	191

Concentraties metalen en nutriënten proefvelden

proefvak	Mg (mg/kg d.s.)	Mn (mg/kg d.s.)	Na (mg/kg d.s.)	Ni (mg/kg d.s.)	P (mg/kg d.s.)	Pb (mg/kg d.s.)	S (mg/kg d.s.)	Zn (mg/kg d.s.)
0-20 cm-mv								
I.1-1	830	160	74	233	3805	285	1730	601
I.1-2	938	146	70	230	4025	341	1960	684
I.1-3	770	149	73	249	3550	272	1714	604
I.1-4	631	133	46	157	2374	136	1052	276
I.2-1	880	87	40	101	1893	37	390	76
I.2-2	523	74	37	70	1219	74	632	112
I.2-3	426	88	33	71	1268	54	505	106
I.2-4	365	116	29	79	1476	49	545	116
I.3	439	93	29	47	1147	37	434	82
II.1-1	422	69	39	100	1926	87	948	214
II.1-2	365	53	29	65	1155	60	658	148
II.1-3	397	56	55	75	1303	69	767	170
II.1-4	258	31	25	23	646	24	346	53
II.2-1	213	72	48	28	811	18	332	52
II.1-2	211	72	23	29	808	19	334	53
II.1-3	224	55	31	23	741	17	298	44
II.1-4	211	54	64	23	703	18	297	43
II.3	252	84	45	21	871	19	276	45
40-60 cm-mv								
I.1	6934	458	4608	50	920	261	15557	478
I.2	267	35	70	26	437	24	200	82
I.3	356	61	70	26	614	18	165	51
II.1	319	32	27	12	226	5	68	24
II.2	283	27	26	13	245	9	105	34
II.3	141	42	20	23	551	14	176	41
blanco	138	66	43	28	623	18	208	45

Concentraties metalen en nutriënten bodemvocht proefvelden (Ca(NO₃)₂-extracties)

proefveld veldje	Inweeg (g)	pH	Ec (µS/cm)	TC (mg/l)	IC (mg/l)	DOC (mg/l)	Al (mg/l)	As (µg/l)	Ca (mg/l)
0-20 cm-mv									
I.1-1	34,82	5,41	436	30,34	2,29	28,05	0,052	32,23	56,70
I.1-2	34,98	5,54	474	25,61	0,66	24,95	0,066	33,43	69,69
I.1-3	32,18	5,35	474	23,17	0,00	23,17	0,107	45,12	73,49
I.1-4	35,97	5,42	455	15,31	0,30	15,01	0,051	41,30	64,90
I.2-1	35,79	5,4	437	9,18	0,00	9,18	0,022	14,34	60,77
I.2-2	35,84	5,32	441	13,17	0,00	13,17	0,053	2,34	59,67
I.2-3	39,59	5,12	499	40,60	0,00	40,60	0,336	22,50	65,95
I.2-4	33,64	5,23	470	17,25	0,00	17,25	0,120	31,20	58,32
I.3	37,87	5,37	466	12,91	0,00	12,91	0,051	21,61	63,45
II.1-1	35,29	5,39	433	27,64	0,00	27,64	0,128	33,70	61,24
II.1-2	36,05	5,44	442	15,84	0,00	15,84	0,075	36,90	65,90
II.1-3	33,69	5,51	440	20,21	0,00	20,21	0,094	28,82	62,41
II.1-4	36,05	5,58	442	13,84	0,00	13,84	0,058	40,29	60,93
II.2-1	37,07	5,58	462	11,60	0,00	11,60	0,052	27,17	64,12
II.1-2	37,95	5,61	449	10,92	0,00	10,92	0,037	22,57	59,13
II.1-3	34,64	5,62	450	8,27	0,00	8,27	0,043	31,84	66,43
II.1-4	38,79	5,65	453	9,52	0,00	9,52	0,037	25,81	62,02
II.3	39,9	5,56	457	11,56	0,00	11,56	0,101	19,50	67,20
40-60 cm-mv									
I.1	38,06	5,58	434	10,61	0,00	10,61	0,064	33,81	75,16
I.2	45,03	5,52	450	9,12	0,00	9,12	0,032	23,54	67,57
I.3	43,98	5,61	438	7,66	0,00	7,66	0,065	13,44	67,33
II.1	41,64	5,59	462	11,57	0,00	11,57	0,084	48,23	76,96
II.2	41,46	5,81	442	10,52	0,00	10,52	0,058	30,96	70,01
II.3	36,86	5,51	456	19,24	0,00	19,24	0,257	42,23	74,57
blanco	0	5,16	430	2,48	0,41	2,07	-0,020	0,00	81,70

proefveld veldje	Inweeg (g)	Cd (µg/l)	Cu (µg/l)	Cr (µg/l)	Fe (µg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Na (mg/l)
0-20 cm-mv									
I.1-1	34,82	1,849	48,88	98,08	71,31	19,91	9,31	0,192	8,67
I.1-2	34,98	3,224	61,83	103,73	63,84	6,62	11,03	0,214	8,68
I.1-3	32,18	3,916	59,03	111,62	52,27	1,81	9,95	0,222	6,99
I.1-4	35,97	2,521	24,55	64,46	25,05	7,68	11,47	0,223	7,34
I.2-1	35,79	0,992	6,58	29,38	13,73	8,35	11,17	0,274	5,10
I.2-2	35,84	1,939	14,31	46,40	22,34	7,96	13,16	0,280	5,29
I.2-3	39,59	3,080	39,72	168,70	84,48	13,75	12,87	0,898	7,80
I.2-4	33,64	1,448	12,65	62,56	30,27	22,02	11,01	0,417	5,98
I.3	37,87	0,825	7,02	32,96	18,74	14,00	13,34	0,185	5,89
II.1-1	35,29	1,922	40,71	117,37	88,69	8,67	11,01	0,378	6,08
II.1-2	36,05	1,372	18,61	54,47	36,73	6,43	12,70	0,094	6,16
II.1-3	33,69	1,842	25,64	72,59	54,60	7,10	12,65	0,176	6,02
II.1-4	36,05	0,773	6,07	20,57	15,34	5,79	14,10	0,054	5,52
II.2-1	37,07	0,734	4,56	19,85	15,96	13,47	12,26	0,062	5,78
II.1-2	37,95	0,475	3,21	14,75	15,49	14,73	12,54	0,077	5,83
II.1-3	34,64	-0,015	0,54	12,86	12,02	7,26	12,24	0,046	5,48
II.1-4	38,79	-0,134	2,06	11,39	12,06	12,77	12,42	0,045	5,68
II.3	39,9	0,450	4,58	13,70	12,80	4,71	13,15	0,135	5,97
40-60 cm-mv									
I.1	38,06	1,597	21,02	27,22	14,64	2,48	5,72	0,088	4,92
I.2	45,03	2,189	14,53	23,32	9,42	14,19	6,82	0,527	5,18
I.3	43,98	1,152	0,44	12,92	35,12	14,83	5,32	0,137	4,87
II.1	41,64	2,081	19,54	34,00	31,64	4,61	6,45	0,207	4,86
II.2	41,46	-0,056	4,54	17,36	12,29	6,26	8,00	0,087	5,46
II.3	36,86	1,124	10,73	45,12	20,42	7,17	8,14	0,284	5,80
blanco	0	1,085	0,09	0,91	-4,80	-0,07	0,51	0,002	4,03

Concentraties metalen en nutriënten bodemvocht proefvelden (Ca(NO₃)₂-extracties)

proefveld veldje	Inweeg (g)	Ni (µg/l)	P (mg/l)	Pb (µg/l)	S (mg/l)	Zn (mg/l)
0-20 cm-mv						
I.1-1	34,82	223,70	3,37	-10,83	3,40	1,18
I.1-2	34,98	284,47	3,50	5,69	4,95	2,00
I.1-3	32,18	403,47	2,73	2,68	4,57	2,26
I.1-4	35,97	255,05	2,68	-6,41	2,92	1,33
I.2-1	35,79	133,08	1,53	3,17	1,75	0,67
I.2-2	35,84	167,11	2,19	-4,74	2,16	1,04
I.2-3	39,59	350,74	2,97	3,36	5,51	1,55
I.2-4	33,64	178,26	2,50	1,29	2,13	0,90
I.3	37,87	108,14	2,42	0,30	1,74	0,57
II.1-1	35,29	156,57	3,71	4,71	4,46	1,00
II.1-2	36,05	97,19	1,85	6,61	2,44	0,70
II.1-3	33,69	109,36	2,11	-0,13	2,56	0,77
II.1-4	36,05	40,75	0,63	1,82	1,68	0,31
II.2-1	37,07	57,66	3,22	-2,77	1,69	0,25
II.1-2	37,95	48,44	2,83	-3,74	1,68	0,22
II.1-3	34,64	36,06	1,60	2,33	1,38	0,19
II.1-4	38,79	29,31	1,68	3,36	1,58	0,18
II.3	39,9	52,20	2,39	4,10	1,83	0,31
40-60 cm-mv						
I.1	38,06	128,30	0,37	4,67	2,23	0,93
I.2	45,03	283,93	1,94	-1,31	1,98	1,29
I.3	43,98	94,81	0,42	2,16	1,59	0,40
II.1	41,64	173,24	1,96	-9,62	2,73	1,32
II.2	41,46	62,60	2,15	4,08	1,66	0,14
II.3	36,86	172,68	5,59	-8,06	2,01	0,53
blanco	0	2,17	-0,05	-0,66	0,88	0,03

BIJLAGE B

RESULTATEN CHEMISCH ONDERZOEK NAJAARSBEMONSTERING

Totale fracties metalen en nutriënten grond proefvelden

proefveld	behandeling	As mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
0-20 cm-mv								
I.1	zeoliet	37,47	2,703	3951,78	120,78	224,07	250,92	465,18
I.1	ijzer	33,90	3,449	5088,92	183,45	281,14	312,53	560,97
I.1	kalk	48,54	3,731	5994,47	166,91	315,32	308,23	615,05
I.1	refrentie	22,91	2,524	4812,26	91,77	250,53	183,04	401,78
I.2	zeoliet	5,82	0,481	961,73	19,19	60,14	38,22	90,92
I.2	ijzer	11,17	1,189	2402,15	63,36	143,64	100,84	188,44
I.2	kalk	5,84	0,612	1422,77	22,69	78,99	51,03	107,93
I.2	refrentie	5,59	0,373	568,57	14,91	44,05	24,45	62,83
I.3	refrentie	3,12	0,324	752,34	12,27	43,89	34,86	76,58
II.1	zeoliet	14,30	0,758	986,60	31,84	61,03	53,56	134,87
II.1	ijzer	19,72	1,051	1635,63	69,59	103,37	69,00	164,09
II.1	kalk	19,47	1,072	1757,19	47,15	87,69	91,89	160,43
II.1	refrentie	12,28	2,223	4742,30	90,16	207,22	160,43	357,56
II.2	zeoliet	7,48	0,215	51,21	5,91	9,20	8,53	23,79
II.2	ijzer	2,39	0,229	110,68	13,59	21,41	12,28	35,58
II.2	kalk	2,96	0,244	114,31	12,29	20,83	13,23	49,04
II.2	refrentie	1,16	0,211	81,41	8,94	15,30	9,88	35,40
II.3	refrentie	2,67	0,173	87,83	8,26	17,61	11,10	34,79
40-60 cm-mv								
I.1		8,93	0,255	95,61	9,67	17,69	8,75	52,00
I.2		4,28	0,183	272,93	7,16	20,31	13,61	38,49
I.3		8,71	0,234	23,84	3,52	14,01	2,89	27,28
II.1		4,99	0,291	154,18	9,72	18,73	12,53	70,43
II.2		4,06	0,245	122,43	7,75	24,43	13,45	40,66
II.3		2,23	0,225	82,63	7,14	24,70	12,38	37,42

proefveld	behandeling	Al mg/kg	Ca mg/kg	Fe mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Mn mg/kg	Na mg/kg
0-20 cm-mv								
I.1	zeoliet	6781	3877	7747	59,28	939	184,89	108,82
I.1	ijzer	6728	3937	29863	34,63	1021	253,93	75,44
I.1	kalk	7478	3793	10250	39,37	1097	202,40	78,76
I.1	refrentie	5959	3039	7380	33,70	812	192,33	55,74
I.2	zeoliet	3970	1226	3728	33,72	473	76,69	55,88
I.2	ijzer	4153	1521	18786	26,66	583	190,88	45,00
I.2	kalk	3522	1084	3932	21,34	434	77,16	35,08
I.2	refrentie	3317	858	1880	15,40	266	52,65	30,97
I.3	refrentie	3297	1070	3003	23,76	419	62,87	31,99
II.1	zeoliet	7107	3717	3948	107,28	789	87,80	176,13
II.1	ijzer	3642	2001	20797	16,41	425	156,70	45,12
II.1	kalk	3548	1658	4007	15,76	414	59,87	46,15
II.1	refrentie	5070	3728	6829	28,64	886	124,76	63,14
II.2	zeoliet	2246	883	1292	16,03	197	35,31	62,45
II.2	ijzer	1973	917	2880	11,22	159	58,08	33,84
II.2	kalk	2287	1309	1534	13,77	220	56,89	38,65
II.2	refrentie	1465	897	649	14,97	140	53,10	46,88
II.3	refrentie	2873	896	1066	11,57	208	53,76	41,16
40-60 cm-mv								
I.1		2784	725	1365	13,25	195	20,85	30,15
I.2		2671	358	2278	15,57	262	27,82	32,31
I.3		3325	403	3189	20,54	380	42,04	35,23
II.1		2669	641	1801	13,66	227	19,40	31,96
II.2		2082	1322	732	9,11	136	28,66	41,49
II.3		1678	917	839	8,93	100	72,18	40,68

Totale fracties metalen en nutriënten grond proefvelden

proefveld	behandeling	P mg/kg	S mg/kg
0-20 cm-mv			
I.1	zeoliet	3760	1767
I.1	ijzer	4182	2135
I.1	kalk	4558	2422
I.1	refrentie	3929	1592
I.2	zeoliet	1065	429
I.2	ijzer	2077	937
I.2	kalk	1437	585
I.2	refrentie	954	328
I.3	refrentie	1078	436
II.1	zeoliet	1178	799
II.1	ijzer	1406	846
II.1	kalk	1628	862
II.1	refrentie	3958	2006
II.2	zeoliet	495	170
II.2	ijzer	688	226
II.2	kalk	867	342
II.2	refrentie	545	261
II.3	refrentie	838	242
40-60 cm-mv			
I.1		319	116
I.2		541	128
I.3		237	36
II.1		644	158
II.2		682	197
II.3		476	168

Potentieel beschikbare fracties zware metalen en nutriënten (HNO₃-extractie) grond proefvelden

proefveld	behandeling	As mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
0-20 cm-mv								
I.1	zeoliet	20,1	2,54	480	85,70	99,82	231,0	464,6
I.1	ijzer	14,4	3,27	600	137,22	110,59	272,4	515,3
I.1	kalk	21,0	2,97	564	112,89	119,48	211,7	473,6
I.1	refrentie	10,8	1,70	429	55,95	96,46	126,2	294,7
I.2	zeoliet	3,3	0,37	123	13,37	30,79	30,6	66,9
I.2	ijzer	3,4	0,51	163	24,99	48,24	52,0	93,2
I.2	kalk	3,6	0,43	165	13,84	33,60	35,9	75,4
I.2	refrentie	5,0	0,32	89,61	11,28	29,33	18,6	47,2
I.3	refrentie	2,4	0,24	110	7,60	19,73	26,9	54,8
II.1	zeoliet	7,8	0,67	92	21,23	31,31	42,5	108,9
II.1	ijzer	7,5	0,70	101	32,79	41,07	47,8	110,9
II.1	kalk	10,5	0,88	156	33,06	35,07	75,8	126,8
II.1	refrentie	6,4	1,55	483	47,33	70,33	104,2	269,3
II.2	zeoliet	5,6	0,16	14,84	4,62	6,88	7,4	18,6
II.2	ijzer	2,0	0,22	24,06	7,97	17,54	11,6	32,3
II.2	kalk	2,0	0,21	24,20	7,57	16,14	11,1	40,4
II.2	refrentie	1,2	0,20	17,92	6,10	12,76	8,9	32,8
II.3	refrentie	2,5	0,16	24,53	6,00	14,87	9,8	29,9
40-60 cm-mv								
I.1		8,2	0,23	17,70	8,45	8,43	6,8	41,9
I.2		2,6	0,14	38,69	5,87	11,81	11,3	30,6
I.3		5,4	0,14	7,34	2,78	6,91	1,4	16,8
II.1		3,8	0,27	32,75	8,81	13,39	11,3	65,9
II.2		3,4	0,22	25,26	5,51	21,31	11,3	34,4
II.3		2,1	0,21	17,47	5,17	23,28	11,1	34,5

proefveld	behandeling	Al mg/kg	Ca mg/kg	Fe mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Mn mg/kg	Na mg/kg
0-20 cm-mv								
I.1	zeoliet	3169	3621	3440	644	253	137	50,0
I.1	ijzer	2199	4152	6427	163	233	205	25,4
I.1	kalk	2167	3462	3390	172	219	147	23,1
I.1	refrentie	1884	2414	1845	180	170	109	31,1
I.2	zeoliet	1415	1044	861	315	107	41	21,0
I.2	ijzer	1002	913	7008	117	95	101	12,4
I.2	kalk	1152	875	1024	122	109	39	4,7
I.2	refrentie	1723	803	379	95	65	31	4,5
I.3	refrentie	948	906	706	157	97	35	7,4
II.1	zeoliet	5025	3822	984	2010	413	66	136,3
II.1	ijzer	1660	1755	5804	89	168	103	16,9
II.1	kalk	1488	1588	1113	64	149	41	11,3
II.1	refrentie	1666	3179	1774	163	299	82	20,3
II.2	zeoliet	1453	908	418	150	106	31	15,2
II.2	ijzer	1188	1026	590	83	79	48	24,7
II.2	kalk	1326	1319	326	120	118	50	7,0
II.2	refrentie	931	975	162	175	98	47	4,1
II.3	refrentie	1902	940	165	47	97	43	12,7
40-60 cm-mv								
I.1		1407	705	208	27	31	14	5,2
I.2		817	279	488	45	24	15	8,2
I.3		878	253	707	50	18	17	5,5
II.1		1127	631	526	40	36	14	14,4
II.2		1259	1402	190	15	66	23	8,5
II.3		1036	985	134	23	44	53	1,6

Potentieel beschikbare fracties zware metalen en nutriënten (HNO₃-extractie) grond proefvelden

proefveld	behandeling	P mg/kg	S mg/kg
0-20 cm-mv			
I.1	zeoliet	2296	63,3
I.1	ijzer	2538	67,7
I.1	kalk	2213	70,9
I.1	refrentie	1668	50,7
I.2	zeoliet	595	26,3
I.2	ijzer	680	21,1
I.2	kalk	735	37,3
I.2	refrentie	671	27,8
I.3	refrentie	602	22,0
II.1	zeoliet	651	57,4
II.1	ijzer	587	36,0
II.1	kalk	847	40,8
II.1	refrentie	1833	67,8
II.2	zeoliet	423	20,2
II.2	ijzer	564	17,8
II.2	kalk	636	25,7
II.2	refrentie	405	18,6
II.3	refrentie	739	25,7
40-60 cm-mv			
I.1		252	22,8
I.2		421	17,6
I.3		185	8,6
II.1		596	30,8
II.2		590	23,4
II.3		389	18,1

Concentraties metalen en nutriënten poriewater

As					Zn				
[ug/l]					[mg/l]				
	zeoliet	ijzer	kalk	onbehandeld		zeoliet	ijzer	kalk	onbehandeld
I.1	29,96	0,35	36,04	29,36	I.1	0,90	0,91	2,03	1,45
I.2	-	2,22	13,45	27,14	I.2	-	0,37	0,60	0,56
I.3	-	-	-	27,64	I.3	-	-	-	1,09
II.1	48,52	0,20	-	41,60	II.1	0,40	0,17	-	0,78
II.2	9,19	0,43	5,66	10,95	II.2	0,15	0,07	0,33	0,32
II.3	-	-	-	7,88	II.3	-	-	-	0,26
Cd					P				
[ug/l]					[mg/l]				
	zeoliet	ijzer	kalk	onbehandeld		zeoliet	ijzer	kalk	onbehandeld
I.1	1,23	< 0,69	1,32	1,20	I.1	3,08	0,17	3,67	4,35
I.2	-	< 0,69	< 0,69	0,96	I.2	-	0,69	3,71	4,23
I.3	-	-	-	0,82	I.3	-	-	-	5,14
II.1	1,56	< 0,69	-	< 0,69	II.1	1,25	0,09	-	9,21
II.2	< 0,69	< 0,69	< 0,69	< 0,69	II.2	3,59	0,46	7,03	7,19
II.3	-	-	-	< 0,69	II.3	-	-	-	7,42
Cr					pH				
[ug/l]									
	zeoliet	ijzer	kalk	onbehandeld		zeoliet	ijzer	kalk	onbehandeld
I.1	240,51	37,56	222,19	284,25	I.1	5,93	6,12	5,71	5,59
I.2	-	119,69	165,41	263,11	I.2	-	5,89	5,37	5,55
I.3	-	-	-	272,01	I.3	-	-	-	5,73
II.1	297,00	60,53	-	181,21	II.1	6,24	6,38	-	6,08
II.2	51,03	28,63	96,99	102,74	II.2	6,27	6,60	6,42	5,93
II.3	-	-	-	89,94	II.3	-	-	-	5,72

- niet geanalyseerd vanwege onvoldoende monstermateriaal