

Literatuuronderzoek methoden loodsanering bodem Zaanstad

Gemma Spaak
Stefan Jansen

Titel

Literatuuronderzoek methoden loodsanering bodem Zaanstad

Opdrachtgever

Antea Nederland B.V.
Postbus 24
8440 AA Heerenveen

Pagina's

1

Samenvatting

De gemeente Zaanstad heeft door middel van een marktconsultatie partijen uitgenodigd om oplossingen aan te dragen voor de problematiek van met lood verontreinigde tuinen. Antea heeft een plan aangeboden dat bestaat uit verwijdering van grond waar mogelijk, en waar dat niet mogelijk is immobilisatie van het lood. Voor de laatste stap biedt Deltares een literatuurstudie aan voor methodes om lood te immobiliseren.

Immobilisatie door toediening van fosfaat is het meest toegepast en kan 40-99% van het lood immobiliseren. Goed oplosbare fosfaathoudende stoffen zoals fosforzuur zijn effectiever (70-99% immobilisatie) dan fosfaat in vaste vorm zoals gemalen vissenvotten (40-50%). Oplosbare fosfaathoudende stoffen binden het lood sneller, maar spoelen ook sneller uit dan fosfaat in vaste vorm. De effectiviteit van fosfaat-toediening sterk afhankelijk van de bodemcondities (loodconcentraties, pH, organisch gehalte, bodemvochtigheid), en de hoeveelheid van het toegediende fosfaat. Onderzoek heeft aangetoond dat door fosfaat-toediening (i) de biologische beschikbaarheid van lood afneemt (van 14-63% naar 10-30%) en (ii) loodconcentraties in het bloed van varkens tot 40% kan afnemen.

In de gemeente Zaanstad kan immobilisatie kansrijk zijn mits er rekening gehouden wordt met de volgende aspecten:

- Deze methode zal de totale loodgehalten niet beïnvloeden;
- De bescherming door immobiliserende stoffen hangt vooral af van de mate waarin de biologische beschikbaarheid verlaagd wordt.

We bevelen aan om de volgende stappen uit te voeren:

1. Bepalen van de uitgangssituatie: in welke vorm komt lood voor in de bodem, en in welke mate is het biologisch beschikbaar).
2. Toets de effectiviteit immobilisatie voor specifieke Zaanse omstandigheden (zowel lab als kleine veld pilots):

- Fosforzuur
- Gemalen vissengraten

Onderzoek daarbij de stabiliteit van de gevormde stoffen (pyromorfiet), ook bij lage pH (~1). Dit geeft aan of de gevormde complexen biologisch beschikbaar zijn.

Uiteindelijk moet een afweging gemaakt worden tussen de effectiviteit aan de ene kant en de praktische toepasbaarheid en het draagvlak bij de bewoners.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	sep. 2018	Gemma Spaak		Bas van der Grift		Hilde Passier	
		Stefan Jansen		Jan Gerritse			

Status

concept

Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Verontreinigingssituatie Zaanstad	2
3 Blootstelling, biologische beschikbaarheid en gezondheidsrisico's van lood	3
4 Saneringsmethoden	4
4.1 Verwijdering (ontgraving) en/of afdekking	4
4.2 <i>In situ</i> immobilisatie	4
4.2.1 Fosfaat	5
4.2.2 Cement, kalk en vliegas	8
4.2.3 Biochar	8
4.3 Fytoremediatie	12
4.4 Elektrokinetische remediatie	13
5 Toepasbaarheid van <i>in situ</i> immobilisatie voor de gemeente Zaanstad	14
6 Conclusies en aanbevelingen	14
6.1 Conclusies	14
6.2 Aanbevelingen	15
7 Referenties	17

1 Inleiding

De bovenlaag van de bodem is in de oudere stedelijke gebieden van Zaanstad als gevolg van langdurig menselijk handelen verontreinigd met lood. De loodgehalten in deze gebieden zijn vaak hoger dan de landelijk vastgestelde normen (Nota bodembeheer Zaanstad 2013-2017). Lood kan al bij lage concentraties schade aan de hersenfunctie veroorzaken; met name bij jonge kinderen kan blootstelling aan lood (de ontwikkeling van de hersenen negatief beïnvloeden en) het IQ verlagen (Otte et al. 2015). Hierdoor wordt de loodproblematiek urgenter en is de gemeente verplicht haar inwoners te beschermen tegen bodemverontreinigingen in de leefomgeving. De gemeente Zaanstad heeft diverse maatregelen getroffen voor de loodproblematiek, waaronder een 'let op lood' campagne om de risico's onder de aandacht te brengen. Het doel van deze campagne is om vooral inwoners met jonge kinderen gebruikadviezen te geven voor het omgaan met lood in de grond en het drinkwater¹. Daarnaast worden er bodemonderzoeken uitgevoerd en is er een subsidieregeling voor huiseigenaren met een tuin die een bodemonderzoek willen laten uitvoeren².

De gemeente Zaanstad heeft door middel van een marktconsultatie partijen uitgenodigd om oplossingen aan te dragen voor de problematiek van met lood verontreinigde tuinen. Antea heeft een plan aangeboden. Dit plan bestaat uit twee delen:

- 1 Waar mogelijk wordt de grond verwijderd d.m.v. afgraving;
- 2 Indien afgraving niet mogelijk is, bijvoorbeeld onder of tussen kwetsbare planten en vlakbij huizen, zijn andere saneringsmethoden wenselijk.

Voor het tweede onderdeel heeft Deltares een plan gemaakt. Op basis van deze marktconsultatie heeft de gemeente Zaanstad Antea gevraagd om de methode te beproeven in een aantal tuinen als pilotlocatie. Ter onderbouwing daarvan biedt Deltares een literatuurstudie aan voor methodes om lood te saneren.

Dit rapport betreft de literatuurstudie voor loodsanering, waarbij voornamelijk wordt ingegaan op de toepasbaarheid en effectiviteit van *in situ* immobilisatie als een geschikte methode voor de gemeente Zaanstad.

De uitkomsten van dit onderzoek geven aan welke methoden kansrijk geacht worden voor toepassing in lood verontreinigde bodems zoals in de tuintjes van Zaanstad. Voor verdere uitspraken over toepasbaarheid en effecten in de praktijk zal vervolgens nader laboratorium en veldonderzoek nodig zijn.

¹ <https://www.zaanstad.nl/mozard/!suite86.scherm0325?mPag=536&mLok=1&mVrg=1118&mNch=1568160>

² http://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/xhtmloutput/Historie/Zaanstad/450735/450735_1.html
<https://www.zaanstad.nl/mozard/!suite86.scherm0325?mPag=366&mVrg=9251>

2 Verontreinigingssituatie Zaanstad

De bodemverontreiniging met lood in de Zaanstreek is ontstaan door een diffuse belasting van de bodem afkomstig van diverse bronnen en oorzaken, waaronder ophoogmaterialen en de voormalige loodwitindustrie (Gemeente Zaanstad “let op lood!” campagne en bijbehorende Q&A³).

In de nota bodembeheer Zaanstad (2013-2017) worden loodgehaltes gerapporteerd voor de bovengrond (0-0,5 m-mv) en de ondergrond (0,5-2 m-mv). Alleen de bovengrond moet voldoen aan de bodemfunctieklaas van de ruimtelijke eenheid in het Besluit bodemkwaliteit en de Regeling bodemkwaliteit. De landelijke interventiewaarde voor lood bedraagt 530 mg/kg, en de landelijke achtergrondwaarde is 50 mg/kg (RIVM).

De loodgehaltes in de bovengrond fluctueren per zone (Figuur 1). Per zone variëren de gemiddelde lood gehalten tussen 50 en 400 mg/kg. De maximale lood gehalten in elke zone liggen tussen de 150 en 10000 mg/kg. In de ondergrond zijn hogere lood gehalten aangetroffen, met enkele uitschieters tot 14000 mg/kg (Nota bodembeheer Zaanstad 2013-2017).

Hoge gehalten van zink (tot 6400 mg/kg) en koper (tot 40000 mg/kg) zijn ook aangetroffen in de bovengrond en de ondergrond (Nota bodembeheer Zaanstad 2013-2017).

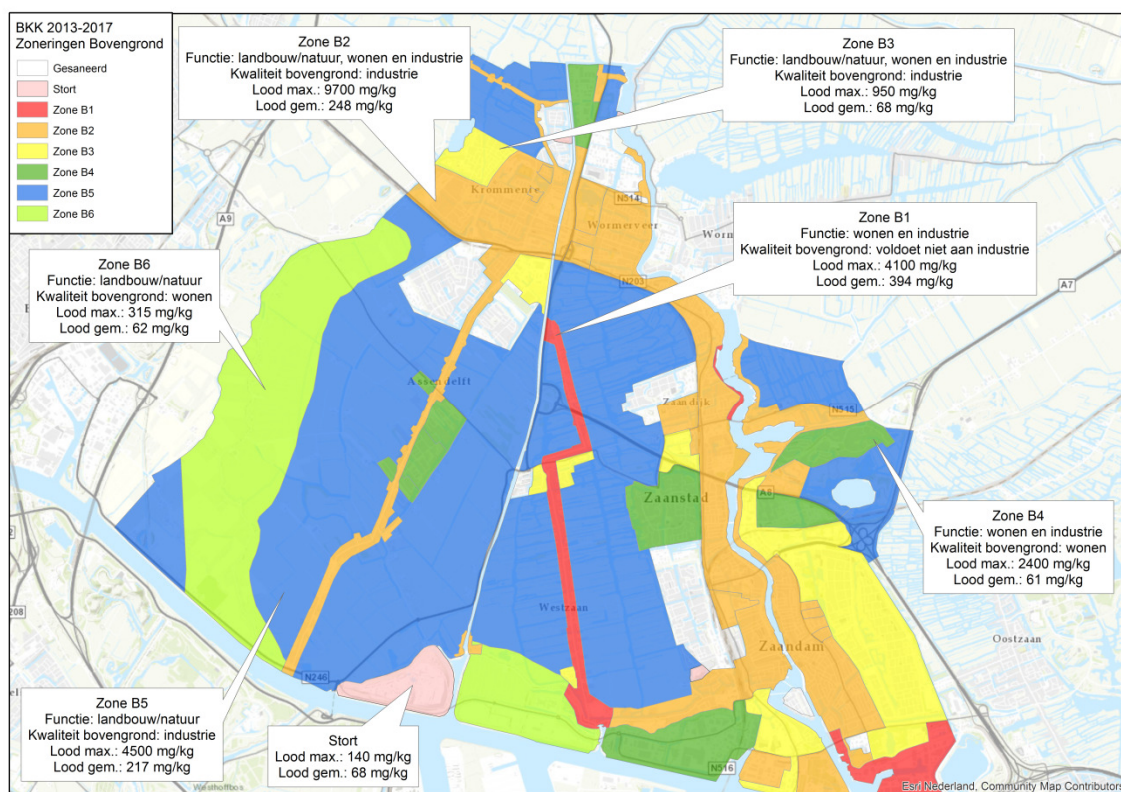
Naast de informatie in de nota bodembeheer zijn er oriënterende bodemonderzoeken uitgevoerd in verschillende tuinen in de gemeente Zaanstad⁴. Een aantal van deze bodemonderzoeken is bekeken (Loodclusters L002 (Antea), L006 (Tauf), L038 (Tauf), L047 (Antea), L012 (Grondslag); L056 (Grondslag); L010 (Grondslag)). In de rapportages worden o.a. boorprofielen, organische stof gehalte (%), lutum gehalte (%), lood concentraties en de concentraties van enkele andere zware metalen vermeld. Fysisch chemische parameters zoals pH (en EC, elektrische geleidbaarheid) zijn niet gerapporteerd, terwijl deze parameters belangrijk zijn om de beschikbaarheid en mobiliteit van bodemlood te bepalen. In bijna elk bodemonderzoek zijn er meerdere locaties waar het Zaans saneringscriterium voor lood (800 mg/kg) wordt overschreden. De gemiddelde gehalten voor deze locaties liggen tussen 1300 en 1771 mg/kg. Bij ongeveer 60% van de locaties is lood aangetroffen beneden de ondergrens voor gebruiksadviezen (<370 mg/kg). Het grondtype kan sterk verschillen en saneringsadviezen zijn aangetroffen voor zowel veengronden als zandgronden.

De loodmetingen zijn uitgevoerd volgens verschillende NEN-normen;

- De bekeken bodemonderzoeken van Tauf hebben loodgehalten bepaald volgens pb 3010-5 en NEN-EN-ISO 17294-2, de NEN norm voor ICP-MS meting van elementen
- De bekeken bodemonderzoeken van Grondslag hebben loodgehalten bepaald met XRF metingen (geen NEN norm benoemd)
- In L002 zijn loodgehalten bepaald met XRF metingen
- In L047 zijn loodgehalten bepaald conform NEN 6966 (ICP-AES) en destructie conform NEN 6961 (ontsluiting met salpeterzuur en zoutzuur (koningswater) voor de bepaling van geselecteerde elementen)

³ <https://www.zaanstad.nl/mozard/document/docnr/4624267/bijlage%20-%20Let%20op%20lood>

⁴ <https://www.zaanstad.nl/mozard/!suite86.scherm0325?mVrq=9791&mNch=hjpd464d98>



Figuur 1: Maximale en gemiddelde loodgehaltes (mg/kg) in de verschillende zones van de gemeente Zaanstad (data afkomstig van nota bodembeheer Zaanstad 2013-2017).

3 Blootstelling, biologische beschikbaarheid en gezondheidsrisico's van lood

De mens kan worden blootgesteld aan lood vanuit voeding, drinkwater, emissies naar lucht, huisstof en door het gebruik van de bodem (Otte et al. 2015). Blootstelling aan bodemlood gebeurt hoofdzakelijk via ingestie van bodemdeeltjes en door de consumptie van, op verontreinigde bodem, geteelde groenten en fruit (Otte et al. 2015).

Lood heeft effecten op de ontwikkeling van de hersenen, en vooral bij jonge kinderen zijn verhoogde loodgehaltes in het bloed gerelateerd aan verlaagd IQ, leerstoornissen en gedragsproblemen (Nevin, 2000, 2009; Otte et al. 2015). Uit voedingsstudies blijkt dat bij een tekort aan calcium of ijzer de loodopname in de bloedsomloop kan toenemen (Ryan et al. 2004).

Volgens de Wet bodembescherming bedraagt de landelijke interventiewaarde voor lood 530 mg/kg. Het Zaans saneringscriterium hanteert een hogere interventiewaarde van 800 mg/kg, gebaseerd op het landelijk gehanteerde computermodel Sanscrit waarbij de modelparameters (gewasconsumptie, biobeschikbaarheidsfactor en innamefactor) zijn aangepast⁵.

⁵ Zaans saneringscriterium is opgenomen als bijlage in diverse loodstudies, waaronder: <https://www.zaanstad.nl/mozard/document/docnr/3477291/bijlage%20->

Het Zaans saneringscriterium gaat ervan uit dat gebruiksadviezen worden opgevolgd, en dat er geen inname is van gewassen (groenten, fruit, kruiden) gekweekt op vervuilde grond in eigen tuin. De gemeten gehalten aan lood worden (zonder correctie voor lutum/organisch stof) als volgt getoetst:

> 800 mg/kg	saneren
> 370 en <800 mg/kg	gebruiksadviezen
< 370 mg/kg	geen gebruiksadviezen

Voor moestuinen worden gebruiksadviezen aanbevolen bij loodgehalten >210 mg/kg.

4 Saneringsmethoden

4.1 Verwijdering (ontgraving) en/of afdekking

Verwijdering van de loodvervuilde bovengrond door middel van ontgraving is een van de meest toegepaste saneringsmethoden (bijv. Cunningham en Berti, 2000). Verschillende varianten zijn mogelijk, zoals volledige verwijdering of bijvoorbeeld verwijdering van de bovenste laag waarna de grond wordt aangevuld met een leeflaag van verse aarde.

In Nederland zijn er bij voormalige schietbanen dergelijke loodsanering strategieën toegepast (<https://www.rijksvastgoedbedrijf.nl/actueel/nieuws/2018/01/15/start-bodemsanering-langenboomse-bossen>). Ook zijn er maatschappelijke kosten-baten analyses beschikbaar voor de sanering van schietbanen in Nederland (Wetterauw en Beerens, 2016).

De effectiviteit van verwijdering en/of afdekking als saneringsmethode is getoetst aan de gezondheidsrisico's. Laidlaw et al. (2017) beschrijft 12 loodsanering case studies die een verlaging van loodconcentraties in het bloed van kinderen hebben geconstateerd, en geeft aan dat deze studies effectief waren op verschillende schalen, zowel voor huizen, wijken, dorpen en steden.

4.2 *In situ* immobilisatie

Bij *in situ* immobilisatie wordt een lood-bindende stof aan de bodem toegevoegd. Het risico van het lood wordt verminderd door vermindering van de mobiliteit (en indirect de biologische beschikbaarheid) door chemische vastlegging in de grond.

Het is belangrijk om te benadrukken dat *in situ* immobilisatie de totale loodgehalten in de bodem niet zal verlagen. Toediening van een immobilisator zal het lood enkel chemisch vastleggen. Daardoor zal de biologische beschikbaarheid afnemen. Om deze afname te bepalen dient de extraheerbare loodfractie vergeleken te worden.

Voor de *in situ* immobilisatie van lood zijn verschillende stoffen mogelijk, waaronder fosfaat, kalk, vliegias en biochar. Deze stoffen worden hieronder verder toegelicht. Om de effectiviteit van de verschillende stoffen te beoordelen worden de extraheerbare loodgehalten voorafgaand aan de toediening vergeleken met de extraheerbare loodgehalten na toediening.

[%20Bodemonderzoek%20Loodlocatie%20L002:%20Domineestuin%20en%20omgeving%20Zaandijk](#) (zie bijlage 8). De officiële documentatie kon niet geraadpleegd worden

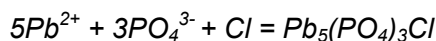
De afname in extraheerbaar lood (in percentages) wordt gezien als de effectiviteit van de toediening.

Lood kan op verschillende manieren geëxtraheerd worden, en elke studie gebruikt weer net een andere methode. Daardoor zijn de studies niet 1:1 vergelijkbaar.

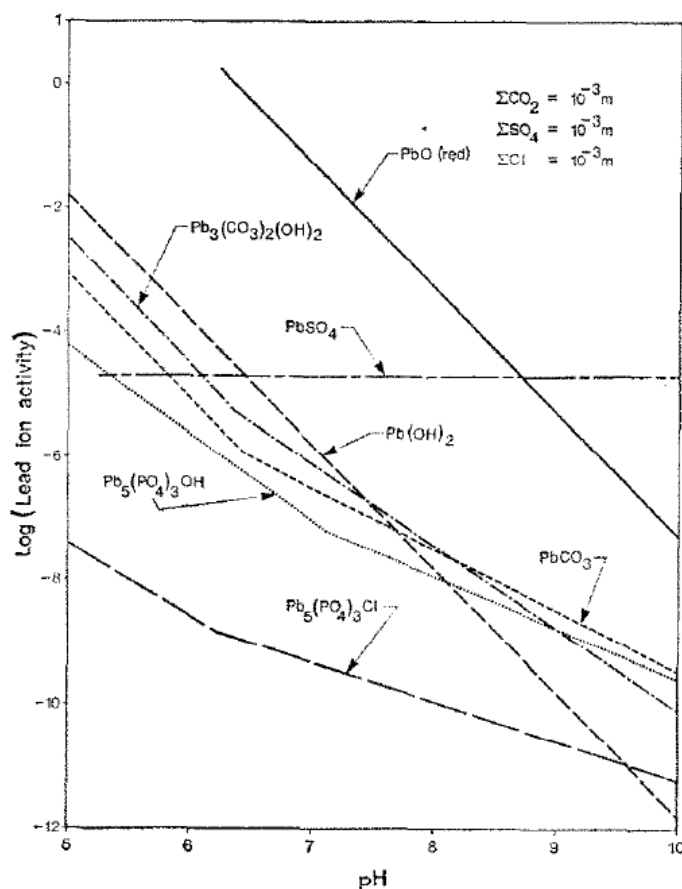
4.2.1 Fosfaat

Verschillende typen fosfaatbronnen zijn mogelijk. De meest gebruikte stoffen voor lood immobilisatie zijn hydroxyapatiet, fosfaatgesteente, biologisch apatiet en oplosbare fosfaathoudende meststoffen (bijvoorbeeld tripelsuperfosfaat) (Osborne et al. 2015).

De primaire immobilisatiestap bij toediening van fosfaat is de vorming van pyromorfiet; een mineraal dat bestaat uit lood, fosfaat en een additioneel monovalent ion ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$, waarbij $\text{X} = \text{Cl}^-, \text{OH}^-, \text{Br}^-, \text{F}^-$) (Nriagu et al. 1974) (zie reactievergelijking hieronder). Chloropyromorfiet ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) is het meest stabiel bij een pH van 3-11 (Figuur 2) en heeft een oplosbaarheidsproduct (K_{sp}) van 10^{-84} tot 10^{-79} , afhankelijk van de bron (Nriagu et al. 1974; Flis et al. 2011). Het is microscopisch aangetoond dat pyromorfiet daadwerkelijk gevormd kan worden bij veldexperimenten (Melamed et al. 2003).



(Nriagu, 1974)



Figuur 2: Oplosbaarheidsdiagram van pyromorfiet (overgenomen van Nriagu, 1974).

In verschillende case studies waar fosfaat is toegediend (Tabel 1) blijkt dat bij totale loodgehaltes hoger dan 200 mg/kg, 40 tot 99% van het lood geïmmobiliseerd kan worden. De effectiviteit van de immobilisatie is afhankelijk van (i) de oplosbaarheid van fosfaat (zodat het direct kan reageren met het lood), (ii) de pH van de bodem, (iii) het organisch stofgehalte in de bodem, en (iv) de bodemmineralogie (Osborne et al. 2015).

Uit onderzoek is gebleken dat pyromorfiet sneller wordt gevormd in een zuur milieu; als de bodem zelf een lage pH waarde heeft of als bijvoorbeeld fosforzuur (H_3PO_4) wordt toegediend in plaats van calciumfosfaat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) (Laidlaw et al. 2017 en referenties daarin). Chrysochoou et al. (2007) benadrukt dat een overschot van oplosbare en 'zure' fosfaatbronnen (zoals fosforzuur) nodig is voor een succesvolle immobilisatie, en hierbij wordt maximaal 45% omgezet naar pyromorfiet. Daarnaast moet het gebruik van fosforzuur worden beperkt om potentiële verlaging van pH en eutrofiering te minimaliseren (o.a. Cao et al. 2003). Andere vormen van fosfaat, zoals fosfaatgesteente, vissengraten of beendermeel zijn mogelijk betere (kost-efficiënte en duurzamere) alternatieven (Chrysochoou et al. 2007).

Visgraten of vissenbotten vormen een biologische vorm van apatiet. Laboratoriumtesten hebben aangetoond dat >99% van het extraheerbare lood in bodems geïmmobiliseerd kan worden met vissengraten (Freeman, 2012). In tegenstelling tot fosforzuur hebben visgraten geen effect op pH en zal het fosfaat niet snel uitlogen, in tegenstelling tot de oplosbare vorm van fosfaat (fosforzuur of TSP). De U.S. Environmental Protection Agency (EPA) heeft een handleiding uitgebracht voor het gebruik van visgraten voor de sanering van bodemlood (<http://ucanr.edu/sites/UrbanAg/files/263152.pdf>). Visgraten worden ook grootschalig toegepast in bodems van West Oakland, maar de resultaten zijn (nog) niet openbaar (<https://www.epa.gov/newsreleases/us-epa-kicks-cleanup-west-oakland-superfund-site>).



Fishbones

De hoge percentages voor de immobilisatie van lood (zie Tabel 1) zijn voornamelijk gebaseerd op maximale dosering van fosfaat in combinatie met hoge loodgehaltes. Cao et al. (2008) rapporteert tot 99% immobilisatie waarbij 100 mg stof/kg bodem is gemengd met een loodvervuilde bodem met extraheerbare loodgehaltes tussen 330 en 9300 mg/kg. Hierbij werd gedestilleerd water toegevoegd (40 wt. %).

Osborne et al. (2015) hebben experimenten uitgevoerd om een balans te vinden tussen minimale fosfaat toediening en maximale immobilisatie. KH_2PO_4 was gebruikt om het lood te immobiliseren en gedestilleerd water was toegevoegd. De resultaten zijn gerapporteerd als mg/L P.

Voor de bestudeerde bodems (mijnbouw verontreinigd) was 66-74% de maximaal haalbare efficiëntie, en de grootste afname in extraheerbaar lood vond plaats bij een P toediening van ca. 70 mg/L. Met behulp van adsorptie isothermen zijn formules opgesteld die de percentages loodverwijdering uitrekenen op basis van de hoeveelheid toegediend fosfaat. Echter, deze berekeningen zijn gebaseerd op experimenten waarbij bodems gemengd worden met water om een suspensie te vormen die continu geschud wordt (Tabel 1). Hierdoor neemt het contact tussen lood en fosfaat sterk toe waardoor de efficiëntie onder praktijkomstandigheden mogelijk overschat wordt. Daarnaast zijn de berekeningen sterk afhankelijk van het bodemtype, en extrapolatie naar andere bodems is niet mogelijk volgens Osborne et al. (2015).

Er is een groot aantal onderzoeken gepubliceerd over de toediening van fosfaat als saneringsoptie voor lood vervuilde bodems. Hierbij gaat het voornamelijk om bodems vervuild door mijnbouw en schietbanen (bijv. Melamed et al. 2003; Munksgaard et al. 2012; Bosso et al. 2008; Cao et al. 2008, Mignardi et al. 2012) en dit soort bodems hebben andere chemische eigenschappen dan (moes)tuinen. Vooral het organisch stof gehalte en het P gehalte (door toediening van nutriënten) zullen sterk verschillen, wat de effectiviteit van loodverwijdering kan beïnvloeden. Daarnaast spelen de oplosbaarheid van de fosfaatvorm, sulfide/sulfaat concentratie en korrelgrootte ook een rol in de effectiviteit van loodverwijdering.

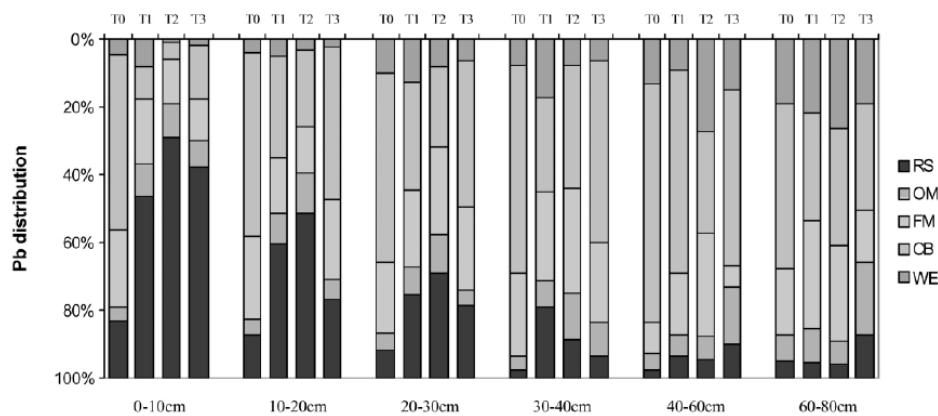
Park et al. (2011) hebben een tweejarige incubatie uitgevoerd van loodvervuilde bodem met fosfaat (als gesteente en oplosbare fosfaat-houdende stoffen). Deze studie toonde aan dat de immobilisatie ook op lange termijn effectief is.

Het fosfaat kan op verschillende manieren worden toegediend. Bij de enkele veldproeven die in de literatuur te vinden zijn, is bijvoorbeeld besproeiing van de bodem (Melamed et al. 2003) of het mengen van fosfaat en bodem door te harken (Huang et al. 2018) toegepast. Uit de gerapporteerde efficiëntie blijkt harken een betere methode te zijn, maar de proeven hebben ook andere verschillen zoals incubatietijd, pH en immobilisator-type (niet alleen fosfaat maar mix van verschillende stoffen), wat het verschil in efficiëntie kan verklaren.

De gepubliceerde onderzoeken tonen aan dat fosfaattoediening effectief kan zijn (40-99%; zie Tabel 1), maar de resultaten blijken erg variabel en het is moeilijk om de efficiëntie van verwijdering in verschillende onderzoeken direct te vergelijken.

Daarnaast zijn de onderzoeken voornamelijk uitgevoerd onder gecontroleerde omstandigheden: bodemonsters worden bijvoorbeeld in een laboratorium gemengd met fosfaat (zie bijv. Chrysochoou et al. 2007). Door de sterk variërende omstandigheden wordt aanbevolen om voorafgaand aan de fosfaattoediening altijd eerst kleinschalige (laboratorium) testen uit te voeren met lokale bodemonsters (bijv. Melamed et al. 2003).

Uit het veldonderzoek van Melamed et al. (2003) blijkt ook dat de verschillende vormen van lood (b.v. oplosbaar, gehecht aan ijzer of mangaanoxides, gehecht aan organisch materiaal) aanwezig in de bodem complex kan zijn (Figuur 3).



Figuur 3: Lood fractionatie in de bodemprofielen (0-80cm) van een veldstudie 220 dagen na fosfaattoediening, met T0=controle, T1=fosforzuur, T2=fosforzuur+apatiet, T3=fosforzuur+fosfaatgesteente. WE = water oplosbaar en uitwisselbaar, CB = carbonaat, FM = ijzer mangaan oxides, OM = organisch materiaal, RS = overig.

Om de biologische beschikbaarheid van loodfosfaat te onderzoeken hebben Li et al. (2012) muizen blootgesteld aan met fosfaat behandelde bodems die vervuild waren met lood. Een afname in de biologische beschikbaarheid was aangetoond van 14.2-62.5% naar 10.1-29.8%. Ryan et al (2004) heeft een afname van lood in het bloed van varkens heeft aangetoond na fosfaatbehandeling (afname van ca. 30-40%).

4.2.2 Cement, kalk en vliegias

Cement, kalk en/of vliegias immobiliseren het lood door adsorptie of precipitatie als loodhydroxide bij hoge pH. Ook bij cement en kalk zijn hoge lood immobilisatie percentages gerapporteerd (> 95%, zie Tabel 1), maar dit geldt voor bodems met hoge loodconcentraties tot 36 g/kg (Cao et al. 2008). In dit geval zal bij 95% verwijdering de resterende hoeveelheid (1793 mg/kg) nog steeds het Zaans saneringscriterium van 800 mg/kg overschrijden. Fysische immobilisatie is mogelijk maar toediening van cement of kalk blijkt niet altijd effectief, afhankelijk van het bodemtype (Cao et al. 2008).

De toediening van vliegias in combinatie met kaolinet blijkt effectief voor de sanering van bodems vervuild met nikkel en zink (Tomasevic et al. 2013), maar er zijn geen studies gevonden die vliegias gebruiken voor de immobilisatie van lood.

4.2.3 Biochar

Biochar is een houtskoolachtige stof die de bodemvruchtbaarheid kan bevorderen. Ahmad et al. (2012) en Yang et al. (2016) hebben aangetoond dat toediening van biochar lood kan immobiliseren (tot 30%, zie Tabel 1), waarschijnlijk doordat het lood zich aan de biochar hecht.

Biochar blijkt ook effectief als hulpmiddel bij fosfaattoediening, om het contactoppervlak tussen fosfaat en lood te vergroten in de bodem (Yang et al. 2016).

13 augustus 2018, concept

Tabel 1: Gegevens immobilisatie van lood door verschillende lood-bindende stoffen.

Stof	Totaal Lood-concentratie (mg/kg)	Extraheerbaar lood (mg/kg)	Concentratie toegediende stof ¹	Incubatie-tijd	Bodem pH (voor)	Bodem pH (na)	Org. gehalte (%)	Immobilisatie extraheerbaar lood (%) ²	Commentaar	Referentie
Fosfaatgesteente	350	30	200	14 dagen	5.88			40%		Park et al. (2011)
Tricalcium fosfaat	350	30	200	14 dagen	5.88			80%		Park et al. (2011)
KH ₂ PO ₄	350	30	200	14 dagen	5.88			80%		Park et al. (2011)
Hydroxyapatiet (HAP)	350	30	200	14 dagen	5.88			50%		Park et al. (2011)
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·H ₂ O	2500-36000	330-9300	25, 50, 75, 100	28 dagen	7.4 -8.5			>90%	Afhankelijk van dosering	Cao et al. (2008)
Cement	2500-36000	330-9300	25, 50, 75, 100	28 dagen	7.4 -8.5			>90%	Afhankelijk van dosering	Cao et al. (2008)
Kalk (CaO)	2500-36000	330-9300	25, 50, 75, 100	28 dagen	7.4 -8.5			>90%	Afhankelijk van dosering	Cao et al. (2008)
Mix van H ₃ PO ₄ en Ca(H ₂ PO ₄) ₂	5000-30000	50-200	4 mol P per mol Pb	220 dagen	6.95	5-6.5	3.91%	Tot 60%	Veld experiment, mix efficiënter dan enkel H ₃ PO ₄	Melamed et al. (2003); Cao et al. (2003)
Nano-HAP (nHAP)	210	-	80	28 dagen				80%		Yang et al. (2016)
Biochar "supported" nano-HAP	210	-	8% (w/w); 40 mg/kg biochar, 40 mg/kg nHAP	28 dagen				75%		Yang et al. (2016)
Biochar	210	-	100	28 dagen				30%		Yang et al. (2016)
Tripelsuperfosfaat, fosfaatgesteente, fosforzuur, compost	270-7100		10-32	30-60 dagen	6.9-7.2		4.6-5.6%	Tot 70%	Veld experiment, pH = 1.5-2.5	Ryan et al. (2004)

¹mg/kg bodem, tenzij anders vermeld²Immobilisatie is niet direct vergelijkbaar tussen de studies door de verschillende extractie methoden, en moet worden gezien als indicatieve waarde

Tabel 1: Gegevens immobilisatie van lood door verschillende lood-bindende stoffen (vervolg).

Stof	Totaal Lood-concentratie (mg/kg)	Extraheerbaar lood (mg/kg)	Concentratie toegediende stof ¹	Incubatie-tijd	Bodem pH (voor)	Bodem pH (na)	Org. gehalte (%)	Immobilisatie extraheerbaar lood (%) ²	Commentaar	Referentie
KH ₂ PO ₄	6144	207	0.098-198 mg/L P	24 uur	4.8		1.84	66%	Suspensie, geschud voor 24 uur	Osborne et al. (2015)
KH ₂ PO ₄	755	10	0.098-198 mg/L P	24 uur	4.6		6.17	74%	Suspensie, geschud voor 24 uur	Osborne et al. (2015)
HAP en natuurlijk fosfaatgesteente	1-356	-	200	20 min	5.66-6.15			95%-99% afname in lood oplosbaarheid	Suspensie, geroerd tijdens de incubatie	Mignardi et al. (2012)
Mosselschelpen (poeder)	11100	970	50	7 dagen	7.24	7.5-8	19.73 g/kg	90%		Ahmad et al. (2012)
Beendermeel van koeien	11100	970	50	7 dagen	7.24	7.5-8	19.73 g/kg	85%		Ahmad et al. (2012)
Biochar	11100	970	50	7 dagen	7.24	7.5-8	19.73 g/kg	76%		Ahmad et al. (2012)
Polonite® + PO ₄	10000 mg/L	-	4 g Polonite®	48 uur					Suspensie, Pb(NO ₃) ₂ gekocht van Fisher Scientific	Butkus et al. (2015)

¹mg/kg bodem, tenzij anders vermeld

²Immobilisatie is niet direct vergelijkbaar tussen de studies door de verschillende extractie methoden, en moet worden gezien als indicatieve waarde

⁶ Reactief filter gemaakt van natuurlijk calcium silicaat (<http://www.ecofiltration.se/wp/wp-content/uploads/2016/09/product-sheet-Polonite-v2-eng.pdf>)

13 augustus 2018, concept

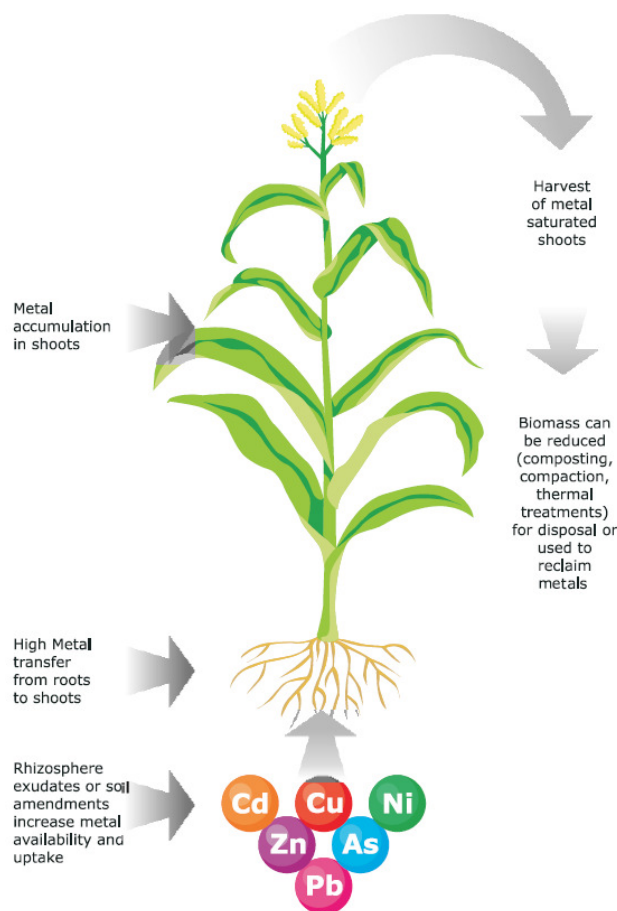
Tabel 1: Gegevens immobilisatie van lood door verschillende lood-bindende stoffen (vervolg).

Stof	Totaal Lood-concentratie (mg/kg)	Extraheerbaar lood (mg/kg)	Concentratie toegediende stof ¹	Incubatie-tijd	Bodem pH (voor)	Bodem pH (na)	Org. gehalte (%)	Immobilisatie extraheerbaar lood (%) ²	Commentaar	Referentie
Mix van zeoliet, kalksteen en wisselend (i) fosfaatgesteente, (ii) CaMgPO ₄ , (iii) champignonsresten en (iv) varkensmest	-	ca. 60	ca. 0,8 kg/m ² kalksteen, 0,4 kg/m ² zeoliet, 0,6 kg/m ² fosfaat, 0,8 kg/m ² mest	8-10 maanden	3,4-3,8	5,3-6,7	24-28%	99%	Veld experiment	Huang et al. (2018)

¹mg/kg bodem, tenzij anders vermeld²Immobilisatie is niet direct vergelijkbaar tussen de studies door de verschillende extractie methoden, en moet worden gezien als indicatieve waarde

4.3 Fytoremediatie

Fytoremediatie is een duurzame oplossing ('nature-based solution') waarbij verontreinigingen (met name metalen) worden verwijderd uit de bodem door opname in planten. Er wordt onderscheid gemaakt tussen fytoextractie en fytostabilisatie. Fytoextractie omvat het gebruik van planten om verontreinigingen via de wortels te absorberen en vervolgens te transporteren naar en concentreren in bovengrondse biomassa (Figuur 4). De planten worden vervolgens geoogst en verwijderd.



Figuur 4: Schematische weergave van fytoextractie (overgenomen van Nascimento en Xing, 2006).

Er is veelvuldig onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van fytoextractie als duurzame en kostenefficiënte oplossing voor loodvervuiling (bijv. Blaylock et al. 2000; Arshad et al. 2008; Brunet et al. 2008; Attinti et al. 2017; Laidlaw et al. 2017 en referenties daarin). De techniek is veelbelovend maar kan nog niet grootschalig worden toegepast, met name door de grote tijdsduur (bijv. Arshad et al. 2008).

Veldexperimenten met verschillende planten en een lood verontreinigde bodem (1830 mg/kg lood, 5% OM en pH = 8) tonen aan dat planten meer dan 1000 mg/kg lood kunnen opnemen gedurende een periode van 2 jaar, maar totale sanering wordt geschat op minimaal 151 jaar voor 1 hectare grond (Arshad et al. 2008). Door toevoeging van een zuur (hier ethylenediamine succinezuur) kan de opname door planten met 50-200% worden verhoogd (Attinti et al. 2017).

De effectiviteit van fytoextractie als saneringsmethode is afhankelijk van de volgende aspecten:

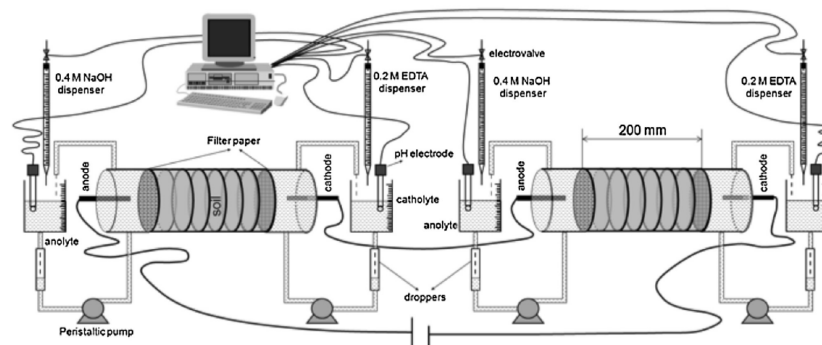
- De biologische beschikbaarheid van lood (de loodfractie beschikbaar voor opname via de wortels is lager dan het totale loodgehalte);
- Efficiëntie van planten om lood te transporteren naar bovengrondse biomassa (dit proces kan door verschillende fysische en chemische processen beïnvloed worden);
- Snelle groei van de planten, zodat voldoende lood verwijderd wordt in een relatief kort tijdsbestek.

Uit onderzoek blijkt dat fytoextractie voornamelijk gelimiteerd wordt door de biologische beschikbaarheid van het lood (Blauwstein, 2017; Laidlaw et al. 2017). Door de aanwezigheid van organisch materiaal en nutriënten (fosfaat) kan het lood gebonden zijn aan ijzeroxides of kleideeltjes, en mits er voldoende fosfaat aanwezig is, zal Pb neerslaan als pyromorfiet. De biologische beschikbaarheid van lood kan verhoogd worden door toevoeging van een zuur (zie bijv. Attinti et al., 2017).

Fytostabilisatie is daarentegen een kansrijkere methode waarbij planten gebruikt om de verontreiniging te stabiliseren d.m.v. toediening van een substraat (e.g. fosfaat) en deze planten transporteren en concentreren het lood niet. Planten zorgen bovendien voor fysische stabilisatie van de bodem daardoor en minder kans op erosie.

4.4 Elektrokinetische remediatie

Bij elektrokinetische remediatie worden met behulp van elektrische mobilisatie en adsorptie zware metalen verwijderd uit de bodem. Door middel van elektrodes wordt een elektrische stroom toegepast waarbij de kationen in oplossing naar de kathode migreren en de anionen naar de anode (Acar en Alsgawabkeh, 1993; Liu et al. 2018). Deze techniek werkt voor bodems met lage doorlatendheid (ca. 10^{-11} m/s) en kan toegepast worden op verzadigde en onverzadigde bodems, maar is nog volop in ontwikkeling (Villen-Guzman et al. 2015; Liu et al. 2018). Experimenten hebben aangetoond dat elektrokinetische remediatie van lood enkel werkt bij lage pH (pH < 4.5) (Virkutyte et al. 2002; Skibsted et al. 2018), en zelfs bij lage pH kunnen loodverwijderingspercentages kleiner zijn dan 10% (Skibsted et al. 2018). Echter indien EDTA wordt toegevoegd kan het rendement oplopen naar bijna 100% loodverwijdering (Villen-Guzman et al. 2015), maar deze resultaten zijn niet getest in het veld. Daarnaast is de experimentele uitrusting complex (Figuur 5).



Figuur 5: Schematische weergave van een elektrokinetische remediatie (overgenomen van Villen-Guzman et al. 2015)

5 Toepasbaarheid van *in situ* immobilisatie voor de gemeente Zaanstad

Uit Tabel 1 blijkt dat fosfaat het meest effectief is als immobilisator.

Indien fosforzuur wordt toegepast zal de pH verlaagd worden, en dit kan mogelijk effecten hebben op de mobiliteit van andere metalen (zoals koper en zink) die in verhoogde concentraties aanwezig zijn in de bovengrond (nota Bodembeheer Zaanstad 2013-2017). Om de pH te reguleren zou een mengsel van fosfaat-houdende stoffen samen met kalk of cement kunnen worden gebruikt. Dit is al toegepast in een veldexperiment (Huang et al. 2018) maar in dit geval was de bodem pH al vrij laag (3.3-3.8).

Het is ook mogelijk om fosfaat toediening te combineren met het aanbrengen van lood-tolerante planten (fytostabilisatie). Dit zal de bodem stabiliseren, de kans op erosie verlagen en mogelijk ook de ingestie van bodemdeeltjes verminderen (fysische barrière door o.a. wortels, kinderen kunnen moeilijker in contact komen met de vervuilde grond).

Voor een gedetailleerd advies met betrekking tot de hoeveelheden en mengsels van immobiliserende stoffen zijn meer bodemgegevens nodig, zoals pH, organisch stof gehalte en bodemvochtigheid.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Lood kan op verschillende manieren gesaneerd worden. Verwijdering is de meest geschikte saneringsmethode indien het wenselijk is om de totale loodgehalten te verlagen. *In situ* immobilisatie is een alternatieve saneringsmethode waarbij de biologische beschikbaarheid van het lood wordt verlaagd door chemische vastlegging in de grond.

Toediening van fosfaat is het meest toegepast en kan 40-99% van het lood immobiliseren. Goed oplosbare fosfaathoudende stoffen zoals fosforzuur zijn effectiever (70-99% immobilisatie) dan fosfaat in vaste vorm zoals gemalen vissenbotten, fosfaatgesteente of hydroxyapatiet (HAP) (40-50%). Oplosbare fosfaathoudende stoffen binden het lood sneller, maar spoelen ook sneller uit dan fosfaat in vaste vorm. Daarnaast is de effectiviteit van fosfaat-toediening sterk afhankelijk van de bodemcondities (loodconcentraties, pH, organisch gehalte, bodemvochtigheid), en de hoeveelheid van het toegediende fosfaat. Onderzoek heeft aangetoond dat door fosfaat-toediening (i) de biologische beschikbaarheid van lood afneemt (van 14-63% naar 10-30%) en (ii) loodconcentraties in het bloed van varkens tot 40% kan afnemen.

Kalk en cement zijn enkel effectief aangetoond bij hoge loodconcentraties (effectiviteit >95%, loodconcentraties 2520-35868 mg/kg). De effectiviteit van biochar is lager (tot 30%).

Alternatieve saneringsmethoden, waaronder fyto-remediatie en elektrokinetische remediatie, zijn nog volop in ontwikkeling. Uit experimenteel onderzoek blijkt dat planten veel lood

kunnen opnemen (meer dan 1000 mg/kg plant), maar de geschatte saneringsduur bedraagt meer dan 100 jaar.

Tabel 2: Voor- en nadelen van methoden voor loodverwijdering

	Voordelen	Nadelen
Verwijdering en afdekking	Effectief vooral tegen lood inname door hand-mondgedrag bij kinderen Onderhoud is nodig maar minder regulier dan bij andere methoden	Volgende generaties kunnen niet op de hoogte zijn van de loodverontreiniging, goede communicatie nodig
Fosfaattoediening	Hoogste efficiëntie in vergelijking met andere <i>in situ</i> immobilisatie methoden Duurzame fosfaatbronnen zijn mogelijk (b.v. vissengraten of beendermeel) Toediening van fosfaat kan andere aanwezige metalen (Cu, Zn) ook binden, maar dit zou eerst gevalideerd moeten worden d.m.v. laboratoriumtesten	Eutrofiering Onduidelijk wat de minimale hoeveelheid fosfaat toediening is Efficiëntie hoog in zuur milieu, mogelijk verhoogd risico op mobilisatie van andere aanwezige metalen (Cu, Zn). Daarentegen is het ook mogelijk dat Cu en Zn neerslaan met het fosfaat (zie voordeel) Visbotten kunnen onaangenaam ruikend zijn
Kalk/cement/biochar	Verhoging van pH	Lagere efficiëntie in vergelijking met fosfaat Onduidelijk of immobilisatie bij lage pH (in de maag) nog in stand blijft
Fytoextractie	Duurzaam	Gelimiteerd door de lage biologische beschikbaarheid van lood
Elektrokinetische remediatie		Zuur milieu nodig Grote variaties in effectiviteit Complexe (veld) opstelling, duur

6.2 Aanbevelingen

Onderzoek toont aan dat *in situ* immobilisatie door toediening van fosfaat een toepasbare methode is voor loodsanering. In de gemeente Zaanstad kan deze methode kansrijk zijn mits er rekening gehouden wordt met de volgende aspecten:

- Deze methode zal de totale loodgehalten niet beïnvloeden;
- De bescherming door immobiliserende stoffen hangt vooral af van de mate waarin de biologische beschikbaarheid verlaagd wordt.

De efficiëntie van de immobilisering is sterk afhankelijk van lokale condities, en zou eerst onderzocht moeten worden onder gecontroleerde omstandigheden met Zaanse bodemonsters.

We bevelen aan om de volgende stappen uit te voeren:

1. Bepalen van de uitgangssituatie: in welke vorm komt lood voor in de bodem, en in welke mate is het biologisch beschikbaar).

2. Toets de effectiviteit immobilisatie voor specifieke Zaanse omstandigheden (zowel lab als kleine veld pilots):

- Fosforzuur
- Gemalen vissengraten

Onderzoek daarbij de stabiliteit van de gevormde stoffen (pyromorfiet), ook bij lage pH (~1). Dit geeft aan of de gevormde complexen biologisch beschikbaar zijn.

Uiteindelijk moet een afweging gemaakt worden tussen de effectiviteit aan de ene kant en de praktische toepasbaarheid en het draagvlak bij de bewoners.

7 Referenties

Acar Y.B. en Alsgawabkeh A.N., 1996. Electrokinetic Remediation. I: Pilot-Scale Tests with Lead-Spiked Kaolinite. *Journal of Geotechnical Engineering* 122, 173-185.

Ahmad, M., Soo Lee, S., Yang, J.E., Ro, H.M., Han Lee, Y., Sik Ok, Y., 2012. Effects of soil dilution and amendments (mussel shell, cow bone, and biochar) on Pb availability and phytotoxicity in military shooting range soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 79, 225–231.

Arshad, M., Silvestre, J., Pinelli, E., Kallerhoff, J., Kaemmerer, M., Tarigo, A., Shahid, M., Guisresse, M., Pradere, P., Dumat, C., 2008. A field study of lead phytoextraction by various scented *Pelargonium* cultivars. *Chemosphere* 71, 2187–2192.

Attinti, R., Barrett, K.R., Datta, R., Sarkar, D., 2017. Ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) enhances phytoextraction of lead by vetiver grass from contaminated residential soils in a panel study in the field. *Environmental Pollution* 225, 524–533.

Blaylock, M.J., 2000. Field demonstrations of phytoremediation of lead contaminated soils. In: Terry, N., Banuelos, G.S. (Eds.), *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*: CRC Press, United States of America.

Blaustein, R., 2017. Phytoremediation of Lead: What Works, What Doesn't. *Bioscience* 67, doi:10.1093/biosci/bix089.

Bosso, S. T., Enzweiler, J., & Angelica, R. S. (2008). Lead bioaccessibility in soil and mine wastes after immobilization with phosphate. *Water, Air, and Soil Pollution*, 195, 257–273.

Brunet, J., Repellin, A., Varrault, G., Terryn, N., Zuily-Fodil, Y., 2008. Lead accumulation in the roots of grass pea (*Lathyrus sativus* L.): a novel plant for phytoremediation systems? *Comptes Rendus - Biologies* 331, 859–864.

Butkus, M.A., Riegner, D.E., Olind, J., 2016. Immobilization of lead by phosphate amended Polonite. *Chemosphere* 151, 310–317.

Cao, X., Dermatas, D., Xu, X., Shen, G., 2008. Immobilization of lead in shooting range soils by means of cement, quicklime, and phosphate amendments. *Environmental Science and Pollution Research* 15, 120–127.

Chrysochoou, M., Dermatas, D., Grubb, D.G., 2007. Phosphate application to firing range soils for Pb immobilization: The unclear role of phosphate. *Journal of Hazardous Materials* 144, 1–14.

Cunningham, S.D., en Berti, W., 2000. Phytoextraction and Phytostabilization: Technical, Economic, and Regulatory Considerations of the Soil-Lead Issue.

Flis, J., Manecki, M., Bajda, T., 2011. Solubility of pyromorphite $Pb_5(PO_4)_3Cl$ –mimetite $Pb_5(AsO_4)_3Cl$ solid solution series. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 1858–1868.

Huang, L. min, Yu, G. wei, Zou, F. zhen, Long, X. xian, Wu, Q. tang, 2018. Shift of soil bacterial community and decrease of metals bioavailability after immobilization of a multi-metal contaminated acidic soil by inorganic-organic mixed amendments: A field study. *Applied Soil Ecology* 130, 104–119.

Laidlaw, M.A.S., Filippelli, G.M., Brown, S., Paz-Ferreiro, J., Reichman, S.M., Netherway, P., Truskewycz, A., Ball, A.S., Mielke, H.W., 2017. Case studies and evidence-based approaches to addressing urban soil lead contamination. *Applied Geochemistry* 83, 14–30.

Liu, L., Li, W., Song, W., Guo, M., 2018. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment* 633, 206–219.

Melamed, R., Cao, X., Chen, M., Ma, L.Q., 2003. Field assessment of lead immobilization in a contaminated soil after phosphate application. *Science of the Total Environment* 305, 117–127.

Mignardi, S., Corami, A., Ferrini, V., 2012. Evaluation of the effectiveness of phosphate treatment for the remediation of mine waste soils contaminated with Cd, Cu, Pb, and Zn. *Chemosphere* 86, 354–360.

Munksgaard, N.C., Lottermoser, B.G., Blake, K., 2012. Prolonged testing of metal mobility in mining-impacted soils amended with phosphate fertilisers. *Water, Air, and Soil Pollution* 223, 2237–2255.

Nevin, R., 2000. How lead exposure relates to temporal changes in IQ, violent crime, and unwed pregnancy. *Environmental Research* 83, 1–22.

Nevin, R., 2009. Trends in preschool lead exposure, mental retardation, and scholastic achievement: Association or causation? *Environmental Research* 109, 301–310.

Nriagu, J.O., 1974. Lead orthophosphates-IV Formation and stability in the environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38, 887–898.

Osborne, L.R., Baker, L.L., Strawn, D.G., 2015. Lead Immobilization and Phosphorus Availability in Phosphate-Amended, Mine-Contaminated Soils. *Journal of Environment Quality* 44, 183.

Otte, P.F., Bakker, M.I., Lijzen, J.P.A., Versluijs, C.W., Zeilmaker, M.J., 2015. Diffuse loodverontreiniging in de bodem; advies voor een gemeenschappelijk beleidskader. RIVM Rapport 2015-0204

Park, J.H., Bolan, N.S., Chung, J.W., Naidu, R., Megharaj, M., 2011. Environmental monitoring of the role of phosphate compounds in enhancing immobilization and reducing bioavailability of lead in contaminated soils. *Journal of Environmental Monitoring* 13, 2234–2242.

Ryan, J.A., Scheckel, K.G., Berti, W.R., Chaney, R.L., Hallfrisch, J., Doolan, M., Maddaloni, M., 2004. Reducing children's risk from lead in soil. *Environmental Science and Technology*.
Skibsted, G., Ottosen, L.M., Elektorowicz, M., Jensen, P.E., 2018. Effect of long-term electrodialytic soil remediation on Pb removal and soil weathering. *Journal of Hazardous Materials* 358, 459–466.

Tomasevic, D.D., Dalmacija, M.B., Prica, M. D, Dalmacija, B.D., Kerkez, D.V., Bečelić-Tomin, M.R., Roncevic, S.D., 2013. Use of fly ash for remediation of metals polluted sediment - Green remediation. Chemosphere 92, 1490-1497. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.063

Villen-Guzman, M., Garcia-Rubio, A., Paz-Garcia, J.M., Rodriguez-Maroto, J.M., Garcia-Herruzo, F., Vereda-Alonso, C., Gomez-Lahoz, C., 2015. The use of ethylenediaminetetraacetic acid as enhancing agent for the remediation of a lead polluted soil. Electrochimica Acta 181, 82–89.

Virkutyte, J., Sillanpää, M., Latostenmaa, P., 2002. Electrokinetic soil remediation – critical review. Science of the Total Environment 289, 97-121.

Yang, Z., Fang, Z., Tsang, P.E., Fang, J., Zhao, D., 2016. In situ remediation and phytotoxicity assessment of lead-contaminated soil by biochar-supported nHAP. Journal of Environmental Management 182, 247–251.

Zia, M.H., Codling, E.E., Scheckel, K.G., Chaney, R.L., 2011. In vitro and in vivo approaches for the measurement of oral bioavailability of lead (Pb) in contaminated soils: A review. Environmental Pollution 159, 2320-2327.