
Cadmium in landbouwgewassen in de Kempen: nog steeds een aandachtspunt?

R.P.J.J. Rietra & P.F.A. M. Römken

Dit onderzoek is uitgevoerd door Alterra Wageningen UR in opdracht van en gefinancierd door Stichting TOG

Alterra Wageningen UR
Wageningen, mei 2016

Bijlage bij briefnummer 16/ALT0762
ISSN 1566-7197

Rietra, R.P.J.J., P.F.A.M. Römken, 2016. *Cadmium in landbouwgewassen in de Kempen: nog steeds een aandachtspunt?*. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra rapport 16/ALT0762. 24 blz.; 5 fig.; 6 tab.; 78 ref.

Trefwoorden: cadmium, lood , zink, kempen, brabant, limburg

© 2016 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E info.alterra@wur.nl, www.wageningenUR.nl/alterra. Alterra is onderdeel van Wageningen UR (University & Research centre).

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra rapport 16/ALT0762 | ISSN 1566-7197

Inhoud

Inhoud	4	
1	Inleiding	5
	1.1 Achtergrond	5
	1.2 Probleemstelling	5
	1.3 Doelstelling	5
2	Onderzochte deelaspecten	6
	2.1 Deelaspecten die in de studie aan de orde komen	6
	2.2 Metalen in (landbouw)bodem in de Kempen	6
	2.3 Beoordeling van gewaskwaliteit: warenwetnorm	7
3	Resultaten	9
	3.1 Overzicht van modellen en data	9
	3.2 Kans data gewassen niet voldoen aan normen	11
	3.3 Invloed van bodembioologische condities en variëteiten	14
	3.4 Effect van nieuwe technologie	15
	3.5 Effect van landbouwkundige maatregelen	16
4	Conclusies	20
Literatuur	21	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Zware metalen (Arseen (As), Cadmium (Cd), Lood (Pb), Koper (Cu), Zink (Zn)) komen regionaal in NL in verhoogde gehalten in de bodem voor (o.a. in Zuid Limburg, Oostelijk Brabant, Zuid-Holland/Utrechts Veenweidegebied, Uiterwaarden van grote rivieren). Vaak is er sprake van historische belasting uit hetzij industrie (Kempen), aanwending van afval en/of slib (Veenweidegebied), of aanvoer van verontreinigd sediment (uiterwaarden). Een van deze regio's betreft de Kempen waar onder meer door uitstoot uit de zinkerts verwerkende industrie regionaal verhoogde gehalten aan Cd, Pb en Zn in de bodem voorkomen. Daar waar het landbouwgrond betreft, betekent dit dat metalen opgenomen kunnen worden voor voedingsgewassen en veevoer.

In veel gevallen is de opname van metalen door gewassen gering, maar vooral bladgroenten (sla, spinazie), stengelgewassen (o.a. prei en schorseneer) zijn van nature in staat metalen als Cd en Zn op te nemen. Daarbij spelen ook bodemcondities een rol, zo zal de opname bij een lage pH ($\text{pH} < 5.5$) hoger zijn dan bij neutrale pH waarden (6 – 7). In sommige gevallen, zoals bijvoorbeeld in de Kempen waar sprake is van relatief arme, zure bodems (zand, pH 5, laag organische stof gehalte), kan daardoor de opname van Cd door de genoemde gewassen zodanig zijn dat het Cd gehalte in het product boven de geldende gewasnorm (Warenwet) uitkomt. Ofschoon dit voor de meeste regio's in NL geen knelpunt is (vanwege de lage Cd gehalten in de bodem en/of hoge bodem pH) vormt de Kempen een uitzondering vanwege de eerder genoemde belasting en bodemtypen.



Figuur 1

Uitzicht vanuit perceel met tarwe op zinkfabriek in Budel-Dorplein (foto: (CBGV, 2012)(foto Alterra)

1.2 Probleemstelling

Op dit moment is het voor de sector nog onvoldoende duidelijk in welke mate de combinatie van diffuus verhoogde Cd gehalten in de bodem en bodemtype (veelal zandgrond) in de Kempen kunnen leiden tot warennorm overschrijding van Cd in gewassen (m.n. bladgroente en schorseneer). Als dit aan de orde is, kan vervolgens de vraag gesteld worden of het optreden van overschrijding van warenwetnormen via bodem- dan wel gewasbeheer te reguleren is.

1.3 Doelstelling

Via een literatuur onderzoek wordt onderzocht of cadmium in de landbouw een beheersbaar probleem is. Vastgesteld wordt of er een probleem is, bij welke gewassen, en of er methoden zijn om het probleem beter te beheersen.

2 Onderzochte deelaspecten

2.1 Deelaspecten die in de studie aan de orde komen

In overleg met de opdrachtgever zijn de volgende 6 deelvragen/aspecten benoemd die aan de hand van beschikbare data en literatuur beantwoord zullen worden::

1. Het maken van een overzicht van modellen en data om de relatie tussen bodem en gewas te beschrijven. We richten ons daarbij specifiek op informatie uit de Kempen of vergelijkbare gebieden, d.w.z. gebieden met Cd, Zn en Pb verontreiniging (o.a. in België en Frankrijk). Daarbij richten we ons op de volgende gewassen: schorseneer, knolselderij, erwten, sperziebonen koolsoorten (vooral rode kool), rode bieten, spinazie, wortelen, waspeen. Risico's voor dierlijke producten vallen buiten het project; deze zijn deels al beschreven in eerder onderzoek (Römkens *et al.*, 2007b).
2. Een inschatting maken van de kans dat gewassen bij de gehalten en bodemeigenschappen die in de Kempen voorkomen niet aan de (gewas)norm voldoen.
3. Op basis van literatuur aangeven of er aanwijzingen zijn dat bodembioologische condities (biomassa, diversiteit etc.) van invloed zijn op de opname van metalen door landbouw/akkerbouwgewassen
4. Aan de hand van kennis van precisiebemesting cq sensortechnologie aangeven in welke mate deze technieken geschikt zijn om de opname van stoffen te sturen
5. Benoemen en analyseren van de geschiktheid van andere methoden (o.a. gewasrotatie, grondbewerking, organische stof management, fytoremediatie etc.) om het gehalte in de bodem te verlagen of de opname uit de bodem te reduceren.

Het rapport gaat niet in op mogelijkheden in de verwerkende industrie om door middel van bewerking de cadmiumgehalten te doen dalen. Het rapport gaat ook niet in op andere contaminanten zoals lood.

2.2 Metalen in (landbouw)bodem in de Kempen

In de (landbouw- en natuur) bodem van de Kempen komen verhoogde gehalten aan As, Cd, Cr, Pb, en Zn voor als gevolg van de historische atmosferisch depositie vanuit metallurgische bedrijven. Grofweg onderscheiden we daarbij 3 verschillende vormen/bronnen van verontreiniging die leiden tot verschillende gehalten in de bodem:

- Daar waar de bron van de verontreiniging vooral via de atmosfeer (depositie) is ontstaan is veelal sprake van lichte tot matige verontreinigingsniveaus zonder dat daarbij de interventiewaarde overschreden wordt. Dit laatste met uitzondering van bodems die dicht (< 1 km) van het fabrieksterrein liggen. In veel gevallen worden in een ruimer gebied wel LAC2006 waarden overschreden wat aangeeft dat er mogelijk een risico voor de gewaskwaliteit bestaat. Dat betreft vooral de LAC2006 waarde van 1 mg Cd kg⁻¹ grond (Römkens *et al.*, 2007a).
- Daarnaast is er lokaal sprake van sterk verhoogde gehalten aan Cd, Zn en Pb in bodems in (sediment) en langs beken zoals de Dommel. Dit is ontstaan als gevolg van sedimentatie van verontreinigd slib in de beekbodem. Bij hoge waterstanden is een deel van dit slib ook over het aangrenzende beekdal verspreid. In deze gebieden worden interventiewaarden, en daarmee ook LAC2006 waarden overschreden. De beekdalen zijn echter grotendeels in gebruik als grasland en worden voor zover bekend niet gebruikt voor de teelt van akkerbouwgewassen. Daarmee vormen deze verhoogde gehalten in deze bodems geen risico voor de kwaliteit van consumptiegewassen

- Tenslotte zijn er verontreinigde assen van de metallurgische fabrieken gebruikt bij de verharding van wegen. Dit heeft onder en naast deze wegen geleid tot sterk verhoogde gehalten aan metalen. Als onderdeel van het programma Benekempen zijn deze sgn 'assenwegen' grotendeels gesaneerd. Daar waar restanten van deze wegen nog voorkomen, vormen ze in directe zin geen bedreiging voor de gewaskwaliteit. Alleen in geval van stofvorming kan het opwaaien van wegstof bijdragen aan verhoogde gehalten aan metalen op de gewassen.

2.3 Beoordeling van gewaskwaliteit: warenwetnorm

Voor de beoordeling van de kwaliteit van voedingsgewassen bestaan er voor de genoemde metalen alleen (warenwet)normen voor cadmium en lood voor humane voeding (EU, 2006). Er zijn geen normen voor As, Cr en Zn in voedsel voor mensen. Normen voor diervoeding zoals ook voor gras, mais etc. vallen buiten het bestek van deze studie.

Tabel 1.

Overzicht van normen voor cadmium in consumptiegewassen

metaal	gewas	Maximumgehalte (mg kg ⁻¹ vers gewicht)
cadmium	Groenten en fruit, met uitzondering van:	0,050
	Wortel- en knolgewassen, met uitzondering van	0,10
	knolselderij, pastinaken, schorseneren en mierikswortel	0,20
	Bladgroenten, verse kruiden, bladkoolachtigen, bleekselderij	0,20
	en een aantal fungi	
	Fungi (paddestoelen)	1,0
	Granen, met uitzondering van tarwe en rijst	0,10
	Tarwe en rijst, tarwezemelen, tarwekiemen, sojabonen	0,20

De zorg over de verhoogde metaalgehalten in de Kempen is ontstaan door ziekten bij paarden (Hoskam *et al.*, 1982) en verhoogde cadmiumgehalten in gewassen (Van Luit & Smilde, 1983). Een vergelijking tussen cadmiumgehalten in gewasproducten in Nederland (Veen *et al.*, 1983) en de Kempen (Van Luit & Smilde, 1983) gaf aan dat de gewasnormen in de Kempen vaak overschreden werden.

In de periode 1978 t/m 1981 zijn monsters van sla (n=76), gerst (41), aardappel (46) en snijmais (61) uit het gebied tussen Neerpelt, Budel, Leende, Valkenswaard, Eersel en Bergeijk geanalyseerd op cadmium. Een deel van de gewasanalyses overschreed de toenmalige richtwaarden¹ bij sla (83%), gerstkorrel (73%), aardappel (0%) en snijmais (28%) (Van Luit & Smilde, 1983; Van Luit, 1984). In het landelijk onderzoek werden ook overschrijdingen bij gerst (64%, deels door locaties met vervuild havenslib), tarwe (18%), haver (29%), wortel (3%), sla (7%) geconstateerd, maar geen overschrijdingen bij tomaat, komkommer, andijvie, kolen, ui, appel, aardappel (Veen *et al.*, 1983). De normoverschrijdingen namen toe in de nabijheid van de metallurgische fabrieken (Van Luit & Smilde, 1983).

In 2005 zijn 68 monsters van verschillende consumptiegewassen (groenten en fruit) uit het gebied dat ingesloten wordt door de grens, de A67 en de Maas geanalyseerd op cadmium en lood (VWA, 2005). Slechts twee monsters hadden een cadmiumgehalte dat boven de norm lag (wortel en knolselderij). In vervolgonderzoeken (Tabel 2) is daarom het te onderzoeken gebied beperkt tot gemeente Cranendonck, Weert, Valkenswaard en Bergeijk. Van bovenstaande onderzoeken zijn gepaarde gegevens beschikbaar (gewas én bijbehorende bodemanalyse).

¹ De toenmalige richtwaarden zijn -behalve voor sla (toen 0,1 nu 0,2) gelijk aan de normen in Tabel 1.

De data uit 2005 uit de Kempen laten zien dat er overschrijdingen van cadmiumnormen voor plantaardige producten optreden bij boerenkool, prei, wortelen, andijvie, sla, en schorseneren. De overschrijdingen zijn gering: de gehalten zijn soms licht verhoogd ten opzichte van de productnorm (RIVM-RIKILT, 2005). De monitoringsgegevens voor heel Nederland laten geen normoverschrijdingen zien. Een vergelijking tussen de gemiddelde gehalten voor een aantal gewassen laat gelijke of verhoogde gehalten zien in de Kempen t.o.v. van de gewasgehalten in de rest van Nederland (Tabel 2).

Specifiek onderzoek naar landbouwgewassen in de gemeente Valkenswaard, Cranendonck, Nederweert, Weert en Bergeijk liet een beperkt aantal overschrijdingen zien bij aardappel (1 op 11), wortel (1:13) en granen (1:29) . Voor de gewassen prei (10:17) en schorseneren (6:11) werd echter een duidelijk groter aantal normoverschrijdingen vastgesteld (Rietra *et al.*, 2004; Rietra *et al.*, 2005; Rietra *et al.*, 2006b; Rietra & Römkens, 2007b).

Tabel 2

Cadmiumgehalten in een aantal consumptiegewassen (mg kg⁻¹ vers gewicht) in de Kempen en Nederland (RIVM-RIKILT, 2005). Data uit de Kempen zijn afkomstig uit Römkens et al. (2005)* (Rietra & Römkens, 2007b)** en die voor Nederland uit monitoringsgegevens (RIVM-RIKILT, 2005).*

Product	Kempen		Nederland	Norm
Aardappel	0,020 (0,002)	≈	0,022 (0,002)	0,1
Andijvie	0,080 (0,010)	↑	0,028 (0,004)	0,2
Sla	0,090 (0,010)	↑	0,033 (0,006)	0,2
Prei	0,050 (0,010)* 0,15 (0,02)**	↑	0,034 (0,004)	0,1
Schorseneren	0,130 (0,070)**	↑↑	0,011	0,1
Wortel	0,060 (0,040)* 0,07 (0,03)**	↑	0,028 (0,004)	0,1
Tomaat	0,010 (0,002)	↑	0,002 (0,001)	0,05

* Tussen haakjes de standaarddeviatie. Alleen data met meer dan 10 monsters in de Kempen.

3 Resultaten

3.1 Overzicht van modellen en data

Data

In het verleden, ruwweg vanaf de jaren 70 tot nu, is onderzoek verricht naar de relatie tussen het gehalte aan Cd in de bodem en dat in het gewas. Daarbij kunnen we ruwweg onderscheid maken tussen:

1. Onderzoek op landelijke schaal (monitoring; (Wiersma *et al.*, 1986), hierbij is vaak geen sprake van specifiek onderzoek naar verontreiniging maar dient het onderzoek om de normale variatie in beeld te brengen van gehalten in bodem en gewas
2. Onderzoek op regionale schaal, vaak naar aanleiding van regionale vormen van bodemverontreiniging. Voorbeelden hiervan zijn onder meer onderzoek in de Kempen (Rietra & Römkens, 2007b), het Veenweidegebied (Rietra & Römkens, 2007a), en onderzoek in uiterwaarden van rivieren als de Rijn, Maas en Geul (van de Ven *et al.*, 1977; Van Driel *et al.*, 1987)
3. Onderzoek op lokale schaal zoals bijvoorbeeld in volkstuincomplexen of individuele tuinen waar sprake is van (vermoede) bodemverontreiniging (van Driel *et al.*, 1975; Römkens *et al.*, 2005; Römkens & Rietra, 2011a; Römkens & Rietra, 2011b)
4. Daarnaast bestaan er verschillende databronnen die gebaseerd zijn op onderzoek in kassen (potproeven) of aangelegde bakken vaak op het terrein van onderzoeksinstituten. Vaak is daarbij bodemmateriaal van al dan niet verdachte locaties in potten of bakken aangebracht waarna de gewassen zijn geteeld (Hemkes & Kemp, 1976; Dijkshoorn *et al.*, 1979; Henkens & de Haan, 1980; Smilde *et al.*, 1982; Smilde).

In Tabel 3 staat een overzicht van de beschikbare data.

In alle gevallen betreft het onderzoeken waarin gegevens van cadmium in de bodem en gewas zijn verzameld. Het gaat daarbij om zogenoemde gepaarde gegevens: het gewasmonster en het bodemmonster is genomen op dezelfde locatie, een pot, een geselecteerd stuk land of een perceel. De bodemanalyses betreffen soms cadmium totaalgehalten met Aqua Regia of zure extracten (0,43 M HNO₃). Vaak zijn ook andere bodemparameters gemeten zoals organische stofgehalte, lutumgehalte en pH. Deze laatste zijn van belang om de relatie tussen bodem en gewas te kwantificeren, want de opname van metalen als Cd is niet alleen afhankelijk van het bodemgehalte, maar ook van de zuurgraad, organische stof en, in mindere mate, kleigehalte.

De bemonstering en bewerking van de gewasmonsters heeft invloed op de geanalyseerde gehalten. Zo zijn de gehalten in de schil van aardappels zijn meestal hoger dan het aardappelvlees (Norton *et al.*, 2015). Het schillen van 1 mm van de aardappel heeft daardoor significante invloed op het meetresultaat. De in de dataset aanwezige gewasmonsters komen uit onderzoeken waarin de monsters meestal behandeld zijn zoals in een normale keuken: aardappels zijn geschild, buitenste bladeren van sla en kool zijn verwijderd, wortels zijn geschraapt etc.

Tabel 3.

Overzicht van databestanden voor cadmium

Dataset			Gewas (aantal mosters)	regio	referentie
Naam	categorie	Type			
Compilatie	1	verzamelddatabase	Aardappel, andijvie, komkommer, prei, sperziebonen, schorseneer, selder, selderij, sla, spinazie, tomaat, kool, wortel, erwt, ui, asperge, mais	NL, Belgie, Kempen	(OVAM, 2007)
IB onderzoek	2	Monitoring landelijke gewaskwaliteit niet verdachte locaties	Aardappel (93), spinazie (80), tarwe (84), wortel (100)	NL	(Wiersma et al., 1986)
Uiterwaard onderzoek	2	Monitoring gewaskwaliteit uiterwaardgronden	Aardappel (10), prei (15), sla (77), wortel (2), mais (39)	Maas, Geul	(Van Driel et al., 1987)
Volkstuinen Kempen	2	Regionaal onderzoek Cd in bodem en gewas in moestuinen Kempen	Aardappel(5), prei(18), sla(24), wortel (22)	Kempen	(Römkens et al., 2005)
Onderzoek landbouwpercelen Kempen	2	Regionaal onderzoek Cd in bodem en gewas in akkerbouwpercelen Kempen	Aardappel (10), mais (23), winterwortel (1), waspeen (13), prei (19), rogge (1), gerst (19), tarwe (10), schorseneer (12), asperge (4), ui (1), suikerbieten (3)		(Rietra et al., 2004; Rietra et al., 2005; Rietra et al., 2006b; Rietra & Römkens, 2007b)
Volkstuin Leiden	3	Onderzoek gewaskwaliteit volkstuincomplex Leiden	16 verschillende gewassen (89)	Leiden	(Römkens & Rietra, 2011a)
Volkstuin Heerenveen	3	Onderzoek gewaskwaliteit volkstuincomplex Heerenveen	18 verschillende gewassen (77)	Heerenveen	(Römkens & Rietra, 2011b)
Tuinen Eijsden	3	Onderzoek moestuinen in Eijsden	Aardappel (15), prei (9), sla (62), tomaat (18), wortel (18)	Eijsden	(GGD, 2008)

De data van meer recente onderzoeken in Leiden, Heerenveen en Eijsden (categorie 3 in bovenstaande tabel) zijn nog niet opgenomen in de compilatie (OVAM, 2007). Resultaten van het landelijke onderzoek en de meeste recente onderzoeken in de Kempen (categorie 2)(Rietra & Römkens, 2007b) zijn wel in de compilatie (categorie 1 in bovenstaande tabel) opgenomen. Nieuw onderzoek is gaande in België (FoodCAD studie, 2016) maar hiervan zijn zover bekend nog geen gegevens bekend.

Modellen

Ofschoon de opname van metalen uit de bodem door gewassen een complex proces is wat voor veel metalen nog niet goed bekend dan wel gekwantificeerd is, blijkt dat de overdracht van Cd van bodem naar gewas redelijk tot goed te beschrijven is met behulp van eenvoudige niet-lineaire regressiemodellen (de Vries *et al.*, 2008). Op basis van zowel veldmetingen als potproeven zijn relaties afgeleid waarbij het gehalte aan Cd in de plant voorspeld wordt met behulp van bodemeigenschappen als pH, organische stof, en textuur (% klei) en het Cd gehalte in de bodem (Römkens *et al.*, 2009). Dit blijkt zowel voor groentegewassen, veevoer (o.a. gras, mais), granen en zelfs gewassen als rijst te resulteren in modellen met een hoge voorspellende waarde. De meest eenvoudige robuuste modellen voor cadmium worden gebruikt in de risicotoolbox (Römkens *et al.*, 2007a; Posthuma *et al.*, 2008). De modellen hebben onderstaande vorm:

$$\log [Cd_{\text{gewas}}] = a + b \log [Cd_{\text{bodem}}] + c [\text{pH}] + d \log [S]$$

waarin Cd_{gewas} het cadmiumgehalte in gewas is, Cd_{bodem} het cadmiumgehalte in de bodem, pH van de bodem, S het bodemorganische stofgehalte, en a t/m d zijn constanten per gewas en bodemtype.

Voordat deze modellen ontwikkeld werden, is in de risico beoordeling vaak gebruik gemaakt van de zogenaamde BioConcentratiefactor (BCF) (McLaughlin *et al.*, 2011). Deze geeft de verhouding aan tussen het gehalten aan Cd in het gewas en die in de bodem:

$$BCF = [Cd_{\text{gewas}}]/[Cd_{\text{bodem}}]$$

Vanwege de relatieve eenvoud van dit model wordt dit onder meer toegepast in de risico beoordeling (CSOIL) in Nederland (Swartjes *et al.*, 2013). Dit model doet echter geen recht aan de invloed die de bodemeigenschappen als pH en organische hebben op de opname. Dit model is dus ook onvoldoende om gehalten aan Cd in gronden met verschillen in bodemtype te voorspellen. Bovendien is gebleken dat zeker bij hoge gehalten aan Cd in de bodem de gehalten in gewassen sterk overschat werden.

In bijlage 1 staan de bodem plant relaties voor verschillende gewassen zoals toegepast bij de afleiding van de LAC waarden voor landbouw (Römken *et al.* 2007a).

3.2 Kans data gewassen niet voldoen aan normen

De kans dat het Cd gehalte in het gewas niet aan de norm voldoet hangt af van het gewas, de bodem pH, en het cadmiumgehalte van de bodem. Op basis van de bodem-gewasdata (OVAM, 2007) zijn eenvoudige niet-lineaire regressiemodellen gemaakt per gewas (zie relaties in vorige paragraaf). Op basis daarvan zijn de zogenaamde kritische cadmiumgehalten in de bodem berekend. Bij dit gehalte is het gemiddelde cadmiumgehalte in gewas gelijk aan de EU norm (EU, 2006). Omdat de pH in veel gevallen een zeer sterke invloed heeft op de opname van Cd door het gewas staan in Tabel 4 de grenswaarden voor het kritische Cd gehalte in de bodem voor een range in pH variërend van 4,5 tot 6,5

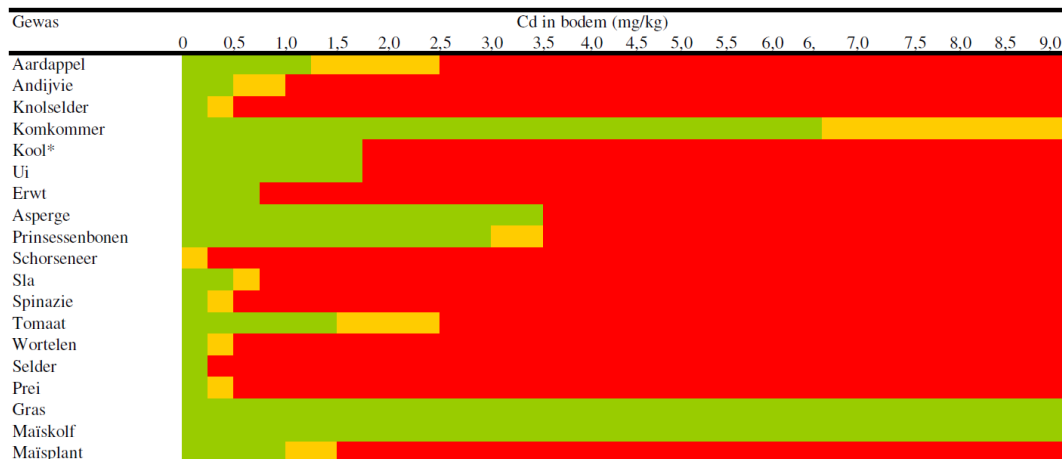
Tabel 4.

Geschatte cadmiumgehalte in bodem waarbij gemiddelde niet de norm overschrijdt bij verschillende bodem pH (OVAM, 2007).

Gewas	n	pH 4,5	pH 5,0	pH 5,5	pH 6,0	pH 6,5
Schorseneer*	52	<0,1	0,1	0,3	1	2,7
Knolselder*	5	0,2	0,3	0,4	0,6	1,1
Selder*	103	0,3	0,4	0,5	0,7	1
Spinazie*	97	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8
Erwt*	4			1,6		
Wortelen*	191	1	1,3	1,7	2,3	3
Prei	139	0,7	1,2	2	3,3	5,6
Sla	170	1,9	2,4	3,1	4	5,1
Andijvie	76	1,0	1,8	3,5	6,6	12,4
Kool*	11			3,9		
Ui	2			4,7		
Asperge	4			5,9		
Maisplant	197	4,9	5,9	7,2	8,7	10,5
sperziebonen*	48	4,4	6,3	9	12,7	18,1
Aardappel	239	6,1		9,5		14,8
Tomaat	57	15,8	19,3	23,5	28,7	34,9
Komkommer	50			27,4		

*gewassen waarvoor informatie is gevraagd

In Figuur 2 zijn de resultaten uit bovenstaande tabel weergegeven in een figuur. Daarbij is het kritische cadmiumgehalte af te leiden bij een gemiddelde bodem pH waarbij de norm in het gewas overschreden wordt. De belangrijkste gevoelige gewassen zijn daarbij prei, schorseneren, selder, sla, spinazie, en wortel). Voor deze gewassen geldt dat normoverschrijdingen voor kunnen komen bij de gehalten die in de Kempen voor komen.

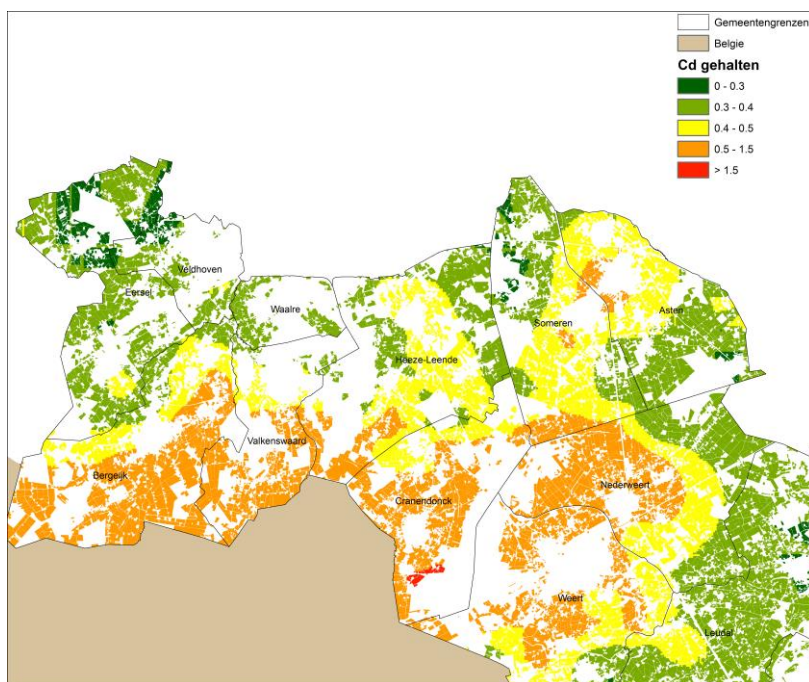


Figuur 2

Advies over cadmiumgehalten in de bodem voor het telen van gewassen bij een gemiddelde bodem pH van 5,5 in de Kempen. Groen, oranje en rood geeft resp. <5%, <10% en >10% van de gewassen boven de norm (OVAM, 2007).

Om te duiden in welk gebied er een kans is op overschrijding van gewasnormen is de kaart (Figuur 3) met cadmiumgehalten in de bodem (ABdK, 2008) gegeven. De schaling van de kaart is aangepast aan de kritische gehalten zoals gegeven in Figuur 2 en die dus gerelateerd zijn aan de kans dat de gewassen gemiddeld de gewasnorm overschrijden bij een gemiddelde pH.

In het lichtgroen gebied (0,3-0,4 mg Cd kg⁻¹ grond) verwachten we overschrijdingen voor schorseneren. In het gele gebied (0,4-0,5 mg Cd kg⁻¹ grond) worden ook overschrijdingen verwacht bij selder, en in het oranje gebied (0,5-1,5 mg Cd kg⁻¹ grond) bij spinazie, prei en wortelen. Bij hogere cadmiumgehalten, die overigens beperkt zijn tot een klein gebied rondom Budel Dorplein, kunnen overschrijdingen van de gewasnorm voor andere gewassen voorkomen.



Figuur 3

Cadmiumgehalten in de landbouwbodems in de Kempen. Kaart op basis van gegevens van ABdK, waarbij legenda is aangepast aan de bodemgehalten in tabel 1 (ABdK, 2008).

Overigens kunnen gewasnormoverschrijdingen ook plaatsvinden bij lagere cadmiumgehalten in de bodem als de pH lagere is dan pH 5,5 (Tabel 1). Bij prei bijvoorbeeld kunnen overschrijdingen plaatsvinden in het oranje gebied als de pH laag is. Daarnaast kunnen lokaal overschrijdingen verwacht worden op locaties waar het cadmiumgehalte in de bodem afwijken van de –gemiddelde–

cadmiumkaart. Lokaal kunnen bijvoorbeeld afwijkend hogere gehalten voorkomen zoals in het dal van de Dommel en langs zinkassenwegen.

Noot:

Bij het afleiden van modellen die de relatie tussen het gehalte in de bodem en die in het gewas beschrijven maken we gebruik van regressie. Deze regressievergelijking wordt vervolgens gebruikt om te schatten welk bodemgehalte overeenkomt met een gewasgehalte dat gelijk is aan de norm. Bij het aldus berekende kritische cadmium gehalte in de bodem betekent dit echter niet dat 100% van alle monsters de norm overschrijdt maar slechts 50%. Dit komt doordat regressiemodellen per definitie zo afgeleid worden dat 50% van de data punten onder de modellijn liggen en 50% erboven. In geval van modellen van hoge kwaliteit ($R^2 > 0.9$) is de afwijking tussen data en voorspelling gering en zullen de gewasgehalten bij cadmiumgehalten hoger dan het kritische gehalte grotendeels rond of boven de gewasnorm uitkomen. Voor modellen van lage kwaliteit is de afwijking van de data tov de modelvoorspelling soms groot en zullen dus zeker niet alle gewasgehalten in bodems die meer dan de kritische hoeveelheid Cd bevatten ook daadwerkelijk boven de norm uitkomen. Andersom redenerend betekent dit echter ook dat overschrijdingen van gewasnormen ook voor kunnen komen bij Cd gehalten in de bodem die onder de kritische waarde liggen. Uiteraard neemt deze kans dat in de Kempen gewasnormen overschreden worden af naarmate het kritische gehalte duidelijk hoger ligt dan de actuele bodemgehalten. Zo is het kritisch Cd gehalte voor komkommer zodanig hoog dat de kans dat een normoverschrijding voorkomt zeer klein of nihil is, ondanks het effect van modelonzekerheid. Voor gewassen waarbij de kritische cadmium gehalten overeenkomen met de actuele bodemgehalten in de Kempen (o.a. andijvie en mais) speelt deze modelonzekerheid echter wel een rol. In eerder uitgevoerd onderzoek in de Kempen (Benekempen project) is niet alleen de gemiddelde kritische bodemnorm voor Cd uitgerekend (zoals hier in figuur 2 is weergegeven) maar is op basis van de modelnauwkeurigheid ook een 5 en 10% norm afgeleid. Dit zijn waarden voor het kritische Cd gehalte in de bodem waarbij de kans dat een gewasnorm overschreden wordt geen 50% bedraagt met slechts 5 of 10%. Uiteraard zijn deze waarden (de 5 en 10% norm voor de bodem) beduidend lager dan de 50% waarde. In Bijlage 2 staat een overzicht van deze 5, 10 en 50% normen.

Overige gewassen

Naast bovengenoemde gewassen is gevraagd of er informatie is over de gewassen rode biet, valerian en Parijse wortel.

Valerian

Uit de wortels van de valerianplant kan het product valerian worden geëxtraheerd. Valerian (*Valeriana officinalis* L.) is niet een gewas dat voorkomt in de studies genoemd in Tabel 2. De norm voor cadmium genoemd in Tabel 1 (EU, 2006) geldt voor verse kruiden. Voor voedingssupplementen geldt 1 mg Cd kg⁻¹ op basis van vers gewicht als norm (EU, 2006). In een studie van valerian in grond zonder en met vervuilde slib (0,4 à 20 mg Cd kg⁻¹) waren de cadmiumgehalten in de valerianwortel (na wassen) verhoogd als gevolg van de verontreinigde bodem (0,11 en 0,64 mg Cd kg⁻¹ d.s. in resp. zonder en met vervuilde slib)(Weightman, 2006). Wanneer we op basis van deze – zeer beperkte- dataset een overdrachtscoëfficiënt voor Cd afleiden dan levert dat een waarde voor valerian op van 0,02. Bij gebrek aan meer gegevens is het niet mogelijk deze overdrachtscoëfficiënt beter te beschrijven o.i.v. bodemparameters zoals pH of organische stof. Als we voor valerianwortel een droge stofgehalte hanteren van 20% dan kan met behulp van de overdrachtscoëfficiënt van 0.02 afgeleid worden dat de gewasnorm bij een gehalte van 250 mg Cd/kg in de bodem overschreden zou kunnen worden. Dit valt zodanig ver buiten de range aan cadmiumgehalten in de bodem van de Kempen (0,1 -2 mg Cd/kg) dat het redelijk is aan te nemen dat de opname van cadmium door valerian niet leidt tot overschrijding van de gewas norm.

Parijse wortel

De wortels die we meest kennen (bospeen, waspeen, winterwortel etc.) behoren tot *Daucus carota* subspecies *sativus*. De Parijse wortel of Parijse markt of ronde peen is een cultivar binnen deze subspecies. In de eerder genoemde dataset (Tabel 1) zijn alle cultivars (winterwortel, zomerwortel etc) samengevoegd. Het is niet duidelijk of daarbij ook Parijse wortel is bemonsterd. Aangezien het advies (OVAM, 2007) is gebaseerd op verschillende soorten, is het aannemelijk dat dit advies ook voor Parijse wortel geldt. Dit wordt verder onderbouwd door een Zweedse studie waar gekeken is naar de

cadmiumopname door verschillende wortelrassen. Daarbij werden geen verschillen aangetoond tussen de verschillende soorten onderzochte wortels (Jansson & Öborn, 2000). Hieruit leiden we af dat de eerder gepresenteerde grenswaarden voor wortel van 0,5 mg kg⁻¹ ook geldig is voor Parijse wortel en er dus in het oranje gebied zoals aangegeven in Figuur 3 kans is op normoverschrijding.

Rode Biet

Buitenlandse onderzoek geeft aan dat cadmiumnormen worden overschreden in wortel, rode biet, andijvie, ui, aardappel bij cadmiumgehalten in bodem van respectievelijk 2,4 3,2 6,3 7,9 en 8,3 mg kg⁻¹ (betreft bodems met neutrale pH) (Bešter *et al.*, 2013). Onderzoek op een verontreinigde locatie laat ook hogere of vergelijkbare cadmiumgehalten zien in wortel dan rode biet (McGrath *et al.*, 2000). Hieruit volgt dat rode biet minder gevoelig is dan wortel, maar gevoeliger is dan andijvie, ui en aardappel. Rode biet hoort dus bij de gevoelige gewassen, maar onduidelijk is of de pH een belangrijke invloed heeft. De grote verschillen tussen de door Bešter *et al.* (2013) gevonden cadmiumgehalten, en OVAM (2007), wijzen er echter op dat de relaties bodemtype-afhankelijk zijn en dat onder meer pH van invloed is op de hoogte van het kritisch cadmium gehalte in de bodem. Indien we aannemen dat de opname van Cd door rode biet hoger is dan die van andijvie kunnen we concluderen dat voor rode biet een gehalte van minder dan 1 mg kg⁻¹ in de bodem als grenswaarde gehanteerd kan worden. Daarmee bestaat er dus kans op normoverschrijding in het oranje gebied zoals gemarkeerd in Figuur 3.

3.3 Invloed van bodembioologische condities en variëteiten

Variëteiten

Verschillen in opname van Cd tussen gewassen zijn groot. Over het algemeen zijn cadmiumgehalten het hoogste in bladgroente als sla en spinazie, en het laagste in vruchten zoals tomaten, courgette, maiskolf, bonen (Alloway, 1990). De EU normen verschillen dan ook per type gewas (Bijlage 1). Daarnaast neemt het cadmiumgehalte in gewassen vaak af wanneer we kijken naar de gehalten in wortel, stengel, blad naar vrucht (McLaughlin *et al.*, 2011).

Naast verschillen tussen gewassen kunnen de verschillen tussen rassen zeer groot zijn. Uit literatuur is bekend dat verschillen in cadmiumopname tussen cultivars kan variëren van onbelangrijk tot een factor 3 à 10 (zie tabel 5). Voor sommige gewassen zoals rijst kunnen de verschillen nog groter zijn (> factor 5 a 10; Römkens *et al.*, 2009). De keuze van een bepaalde cultivar kan dus perspectief bieden om te komen tot lagere cadmiumgehalten in gewasproducten (Grant *et al.*, 2008; McLaughlin *et al.*, 2011). Verschillen tussen species en cultivars in de Kempen zijn niet bekend.

Tabel 5

Overzicht van onderzoeken naar verschillen tussen cadmiumopname door cultivars voor gewassen die relevant zijn in de Kempen (ns: niet-significant verschil)

Gewas	Aantal cultivars	Min-max in mg kg ⁻¹ vers	Cd bodem (mg kg ⁻¹ ds)	referentie
Sla	28	0,4-1,7	1,1	(Zhang <i>et al.</i> , 2013b)
Mais	19	0,9-9,9	0,56	(Florijn & Van Beusichem, 1993)
Mais	50	1-15 (blad) 0,02-0,5 (kolf)	24	(Kurz, 1999)
Spinazie	5	4,2-6,9	4,2	(Alexander <i>et al.</i> , 2006)
Wortel	5	1,2-2,5 *	4,2	
Sperzieboon	5	ns	4,2	
Erwt	5	0,17-0,42	4,2	
Ui	5	ns	4,2	
Sla	5	ns	4,2	
Selderij	27	0,05 -0,22	0,6	(Zhang <i>et al.</i> , 2013a)
Tarwe graan	237	0,018-0,09	0,08-0,12	(Kubo <i>et al.</i> , 2008)

*droge stof

Er is veel onderzoek gedaan naar het verlagen van de cadmiumgehalten in gewassen door enten met mycorrhiza. Het enten kan effectief zijn in een situatie waar voordien geen mycorrhiza's aanwezig waren (Heggo *et al.*, 1990; Janoušková & Pavlíková, 2010). Het is echter maar in beperkte situaties mogelijk om via enten met de aanwezigheid van mycorrhiza's te doen toenemen. Planten die een symbiose aangaan met mycorrhiza's beschikken namelijk meestal al over gemycorrhizeerde wortels. Het enten lukt in situaties waarbij mycorrhiza's na hygienisatie van grond zijn verdwenen, zoals bij jonge bomen en planten in schone potten, en aanplant in braakliggende gronden zoals in mijnen (Marschner, 2012). In het algemeen kan daarom gesteld worden dat bodemleven (vooral mycorrhiza's) een belangrijke rol speelt bij de opname van zware metalen maar de rol is niet vaak via management aan te passen.

3.4 Effect van nieuwe technologie

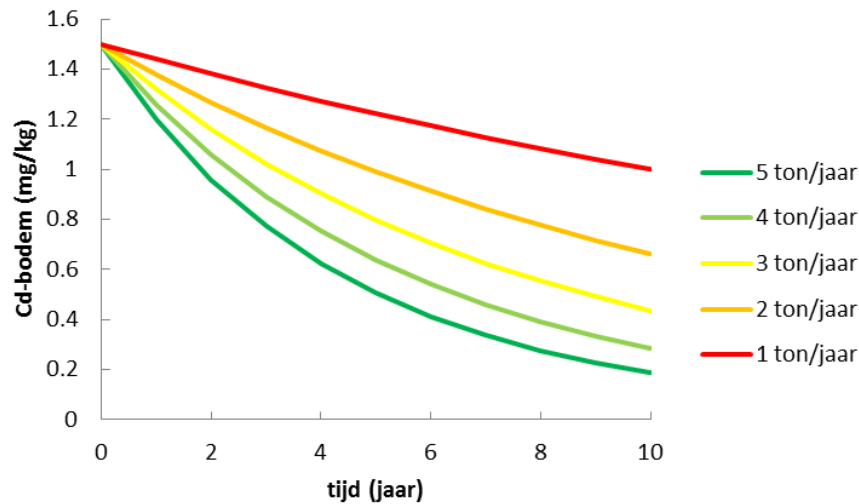
Eerder in deze rapportage is besproken dat de opname van cadmium door gewassen afhankelijk is van de gehalten aan cadmium in de bodem maar ook bodemeigenschappen als pH en organische stof. Dat betekent dat ruimtelijke variatie in deze eigenschappen ook van invloed is op de gehalten binnen een perceel of regio. Deze variatie kan ofwel op basis van detailkaarten dan wel on-line metingen vastgesteld worden. Op basis van dergelijke detailkaarten van cadmiumgehalten en pH op perceelsniveau zou via precisiebemesting de bekalking geoptimaliseerd kunnen worden. Op dit moment zijn dergelijk gedetailleerde kaarten echter niet voorhanden.

Voor het gebruik van sensoren geldt ook dat in Nederland tot nu toe geen mobiele pH metingen mogelijk waren om een perceel in kaart te brengen dan wel de bemesting er op aan te passen. Een recente ontwikkeling is het gebruik van een trekker met daarop een NIR scanner (near-infrared spectroscopy) die het organische stofgehalte van een perceel in kaart brengt, en met elektroden de pH en geleidbaarheid (bedrijf Agrometius). Wetenschappelijke rapportages hierover zijn nog niet voorhanden. In de Kempen zijn wel handheld XRF's (X-ray fluorescence) gebruikt om zinkassenwegen op te sporen en om de sanering zo precies mogelijk te doen verlopen. De XRF is niet erg gevoelig voor cadmium maar wel voor andere stoffen in zinkassen.

Het nut of de effectiviteit van dergelijke precieze bemesting dan wel bekalking hangt ook af van de mate waarin de gehalten aan Cd en of bodemeigenschappen variëren op perceelsniveau. Voor de Kempen geldt dat de verspreiding van cadmium grotendeels via de lucht is gegaan wat betekent dat de binnen percelen de variatie gering is. Onderzoeken naar de variatie in een perceel bevestigen dat (Boekhold & Van Der Zee, 1994). Het gemiddelde cadmiumgehalte van een hoog belast perceel was 4 mg/kg met een standaarddeviatie van 0,83 mg/kg (166 monsters). Het gemiddelde cadmiumgehalte in gerstkorrels op dit perceel was 0,33 mg/kg met een standaarddeviatie van 0,07 mg/kg (80 monsters). Het gemiddelde cadmiumgehalte in een CaCl₂ extract was 0,38 mg/kg met een standaarddeviatie van 0,12 mg/kg (166 monsters). Deze data suggereren dat de samenstelling van de bodem en daarop geteeld gewassen homogeen is. Dat betekent dat het inzetten van technologie om binnen percelen nog verschillen in bodemmanagement aan te brengen relatief veel kosten met zich mee kan brengen terwijl het rendement waarschijnlijk gering is.

Fytoremediatie is vaak voorgesteld om een deel van de cadmiumvoorraad uit de bodem te verwijderen. Hierbij worden specifiek planten geplant en geoogst die sterk cadmium opnemen zoals wilg of tabak. De geoogste gewassen worden afgevoerd en bijvoorbeeld verbrand (energy cropping). Zo laten potproeven zien dat met behulp van *Thlaspi caerulescens* in een potproef met grond uit de Belgische Kempen bijna 50% van de totale beschikbare Cd voorraad uit de bodem onttrokken kon worden in één oogst (Koopmans *et al.*, 2008). Zelfs wanneer de effectiviteit van *Thlaspi* onder veldomstandigheden lager is dan in geval van de potproef lijkt het erop dat indien een voldoende oogst (biomassa) gerealiseerd kan worden (> 2 – 3 ton/ha) het telen van dergelijke specifiek Cd accumulerende gewassen in bestaande rotaties tot een substantiële verlaging kan leiden van de voorraad in de bodem. Dit komt vooral door de zeer hoge opname van Cd door *Thlaspi*: bij een

bodemgehalte van $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ en een pH van 5,5 bedraagt het Cd gehalte in *Thlaspi* ongeveer 120 mg kg^{-1} . Ter illustratie staan in Figuur 4 de berekende afname van het Cd gehalte in de bodem wanneer *Thlaspi* geteeld wordt (continu). Daarbij is het effect van de biomassa (oogst in ton/jaar) weergegeven. Deze varieert van 1 ton biomassa voor de rode lijn tot 5 ton biomassa voor de groene lijn.



Figuur 4

Afname van het Cadmium gehalte in de bodem door het telen van Thlaspi Caerulescens in afhankelijkheid van de gerealiseerde oogst (biomassa) in ton per jaar.

De mate van succes van fytoremediatie hangt sterk af van de uitgangssituatie. Zo lijkt fytoremediatie potentieel toepasbaar om cadmiumgehalten in licht verontreinigde bodems (indicatie: Cd-bodem $0,5 - 1,5 \text{ mg kg}^{-1}$) terug te brengen naar waarden waarbij risico's op normoverschrijding lager zijn. Uiteraard betekent dit dat de percelen enige jaren (3-10) niet gebruikt kunnen worden voor productiegewassen. Voor sterker verontreinigde bodems lijkt het er op dat fytoremediatie onvoldoende effectief is om binnen een acceptabele termijn (stel 10 jaar) de Cd gehalten in de bodem zodanig te reduceren dat akkerbouw gewassen veilig geteeld kunnen worden (Koopmans *et al.*, 2008).

3.5 Effect van landbouwkundige maatregelen

Kalk

Het effect van bekalken op de cadmiumgehalten in gewassen is in de Kempen geverifieerd (van Luit, 1986a; Rietra *et al.*, 2006a). Het toevoegen van kalk leidde bij een aantal gewassen tot lagere cadmiumgehalten in de plant, met name bij prei. Het effect van bekalking verschilde echter per gewas. Zo bleek het effect bij gras zeer gering of afwezig. De toevoeging van kalk had ook geen invloed op de loodgehalten in gewassen.

Op basis hiervan, en op basis van bodem-gewas modellen (zie paragraaf 3.1.2) zijn adviezen opgesteld voor gewassen in de Kempen (zie figuur 5). Daarin wordt aangegeven in welke mate bekalking effectief is om een gewas aan de gewasnorm te laten voldoen (groene velden) bij een combinatie van het Cd gehalte in de bodem (verticaal) en de pH (horizontaal)

Waspeen					Schorseneren						
		pH:	pH:	pH:	pH:			pH:	pH:	pH:	pH:
bodemgehalten		4,5	5	5,5	6	bodemgehalten		4,5	5	5,5	6
[Cd]	0,4 mg/kg grond	0,09	0,07	0,05	0,04	[Cd]	0,4 mg/kg grond	0,19	0,14	0,10	0,07
[Cd]	0,8 mg/kg	0,13	0,10	0,08	0,06	[Cd]	0,8 mg/kg	0,27	0,19	0,13	0,09
[Cd]	1,2 mg/kg	0,16	0,12	0,09	0,07	[Cd]	1,2 mg/kg	0,32	0,23	0,16	0,11
[Cd]	1,6 mg/kg	0,19	0,15	0,11	0,08	[Cd]	1,6 mg/kg	0,37	0,26	0,18	0,13
[Cd]	2 mg/kg	0,22	0,17	0,13	0,10	[Cd]	2 mg/kg	0,41	0,29	0,20	0,14
[Cd]	2,4 mg/kg	0,24	0,18	0,14	0,11	[Cd]	2,4 mg/kg	0,45	0,31	0,22	0,15
[Cd]	2,8 mg/kg	0,26	0,20	0,15	0,11	[Cd]	2,8 mg/kg	0,48	0,34	0,24	0,17
[Cd]	3,2 mg/kg	0,28	0,21	0,16	0,12	[Cd]	3,2 mg/kg	0,51	0,36	0,25	0,18
[Cd]	3,6 mg/kg	0,30	0,23	0,17	0,13	[Cd]	3,6 mg/kg	0,54	0,38	0,27	0,19
[Cd]	4 mg/kg	0,32	0,24	0,18	0,14	[Cd]	4 mg/kg	0,57	0,40	0,28	0,20
[Cd]	4,4 mg/kg	0,33	0,25	0,19	0,15	[Cd]	4,4 mg/kg	0,59	0,42	0,29	0,20
[Cd]	4,8 mg/kg	0,35	0,27	0,20	0,15	[Cd]	4,8 mg/kg	0,62	0,43	0,30	0,21

a

b

Figuur 5

Advies over cadmiumgehalten in (a) waspeen en (b) schorseneren als functie van de bodem pH en het cadmiumgehalte van de bodem. De kans op normoverschrijding van het cadmium in het gewas is groot bij rood, onzeker bij oranje, en klein bij groen (ABdK, 2008).

Uit de figuur 5a is af te lezen dat waspeen aan de cadmiumnorm voldoet op percelen waar het cadmiumgehalte in de bodem lager is dan 0,8 mg kg⁻¹ en de pH voldoende hoog is (pH ≥ 5,5). Het telen van schorseneren voor de versmarkt is alleen mogelijk bij een laag cadmiumgehalte in de bodem en een pH ≥ 5,5 (figuur 5b).

Door uitspoeling van bicarbonaat uit de bouwvoor na bekalking daalt de pH van de bodem jaarlijks nadat deze aanvankelijk is gestegen. Daarbij geldt dat hoe hoger de pH van een bodem is hoe sterker de daling. Bij zandgronden met een pH van 5,0, 5,5 en 6,0 is de pH daling in 4 jaar respectievelijk 0,25, 0,35 en 0,27 pH-eenheid (CBGV, 2012). Bij gebruik van verzurende meststoffen (bijvoorbeeld ammoniumsulfaat) is de daling van de pH nog groter. Om de bodem pH op peil te houden dient daarom bekalkt te worden, en rekening gehouden te worden met eventuele verzurende meststoffen. Voor vrijwel alle gewassen zijn daarom advies pH's afgeleid waarbij de opbrengst of kwaliteit het beste is bij normale organische stofgehalten in de Kempen (≈ 5%); deze variëren ruwweg van pH 5,5 tot pH 5,9 (van Dijk & van Geel, 2012).

Het effect van bekalking op de opname van Cd berust vooral op het beter vastleggen van Cd aan de vaste delen van de bodem (organische stof, kleidelen) bij een hogere pH. Naast bekalking is er ook veel onderzoek gedaan naar de effecten van diverse andere bodemverbeteraars zoals zeoliet, biochar, houtassen, mijnresten etc. De effecten daarvan op de opname van Cd door gewassen lijken echter grotendeels ook terug te voeren op het effect op de pH zoals bij kalk (Oste *et al.*, 2002). Het gebruik van dergelijke andere materialen dan kalk om de opname van Cd te verlagen te verhogen is dus zeker effectief maar deze alternatieve materialen zijn vaak duurder dan kalk. Daarnaast bevatten sommige bodemverbeteraars zelf ook weer zware metalen waardoor het gebruik in de landbouw gelimiteerd is (bijvoorbeeld: houtassen en biochar).

Organische stof

Het toevoegen van organische stof kan de beschikbaarheid van cadmium verlagen wat kan leiden tot een verlaging van de opname in gewassen. Omdat de meeste bodems echter van nature, of door gebruik van compost en andere bodemverbeteraars al organische stof bevatten, is naar verwachting alleen een relevant effect te bereiken als de bodem bij aanvang zeer arm is aan organische stof (< 1 %). Zo kon met compost het bodemleven en plantengroei hersteld worden bij een onbegroeide zandgrond in Lommel (Bouwman & Vangronsveld, 2004). Het verhogen van de organische stofgehalten is mogelijk met compost. In een lange termijn experiment (14 jaar) nam het percentage koolstof in de bouwvoor van een akker bij compostgiften van 15 en 45 ton/ha toe van 1% C naar resp. 1,2 en 1,8 %C (Elsen, 2010). Dergelijk zeer hoge giften zijn echter niet gangbaar in de landbouw maar laten wel zien dat het mogelijk om het organische stofgehalte te verhogen.

Naar de korte en lange termijn invloed van compost op Cd beschikbaarheid en opname is veel onderzoek gedaan. Veelal daalt de opname van Cd bij gebruik van compost. Ook in lange termijn proeven (Wang *et al.*, 2014) blijkt dat langdurig gebruik van compost leidt tot significant lagere

gehalten aan Cd in tarwekorrels vergeleken met kunstmest behandelde velden. Dit effect was niet gerelateerd aan pH want die was in alle gevallen hetzelfde.

In enkele lange termijn experimenten is het effect onderzocht van langdurig bemesten met dierlijke mest versus kunstmest. Hierdoor zijn verschillen in bodemorganische stofgehalten ontstaan van 2,1% in bij continue kunstmest en 3,5% bij continue dierlijke mest (Broadbalk, Engeland). De cadmiumgehalten in gewassen in velden met die langdurig met dierlijke mest zijn bemest zijn grofweg een factor 2 lager dan die bemest met kunstmest, ondanks de soms licht hogere cadmiumgehalten in de bodem die bemest is met dierlijke mest. Het effect wordt toegeschreven aan de verhoogde bodemorganische stofgehalten (Mench, 1998). Hieruit volgt wel dat het in stand houden van de bodemorganische stof essentieel is om de de cadmiumgehalten in gewassen niet te laten stijgen.

Zout

In Australië zijn de chloride concentraties de belangrijkste factor die de cadmiumgehalten in aardappelen bepalen (McLaughlin *et al.*, 1994). Bij hogere zoutgehalten, en met name het chloride daarin, wordt de mobiliteit van Cd in de bodem verhoogd, en daardoor ook de opname van cadmium door gewassen. Variatie in zoutgehalten is in de Kempen niet relevant, maar meststoffen met chloride i.p.v. andere anionen geven hogere cadmiumgehalten in gewassen. Zo waren de cadmiumgehalten in tarwe 1,5 keer hoger na stikstofbemesting met NH_4Cl dan na bemesting met $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ of ureum (Ishikawa *et al.*, 2015). De meest gebruikte chloride-houdende meststof in Nederland is KCl. In plaats van KCl zou gebruik gemaakt kunnen worden van het duurdere KNO_3 .

Stikstof en andere meststoffen

Bij bemesting van aardappelen in grond leidde het gebruik van ammoniummeststoffen tot een hoger cadmiumgehalte bij aardappel dan in geval van nitraatmeststoffen (Larsson Jönsson & Asp, 2013). De cadmiumgehalten in aardappelen daalden als functie de stikstofgift (60, 169 en 240 kg N ha⁻¹). Het gebruik van $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, een verzurende stikstofmeststof, leidde tot verhoogde cadmiumgehalten in aardappel t.o.v. kalkammonsalpeter (NH_4NO_3 met kalk). Ook het gebruik van $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ leidde tot verhoogde cadmiumgehalten in aardappel ten opzichte van kalkammonsalpeter (NH_4NO_3 met kalk). Beide effecten zijn toe te schrijven aan de verhoogde cadmiumbeschikbaarheid: o.i.v. calcium en door de verzuring (Larsson Jönsson & Asp, 2011).

Er treden echter meer effecten op die minder goed begrepen worden. In proeven met voedingsoplossingen waarin de pH constant gehouden wordt gaf bemesting met ammoniumstikstof een hoger cadmiumgehalte in sla dan voeding met stikstof in de vorm van nitraat (Florijn *et al.*, 1992). Een toename van de nitraatopname gaf ook bij diverse koolsoorten een verminderde cadmiumopname (Mao *et al.*, 2014; Guan *et al.*, 2015). In proeven met aardappel leidde stikstofbemesting met nitraat echter tot hoger cadmiumgehalten (factor 2) dan ammonium (Larsson Jönsson & Asp, 2013). Ook bij rijst leidt een verhoogde nitraatconcentratie tot hogere cadmiumopname (Yang *et al.*, 2016). Omdat de proeven werden uitgevoerd met planten die groeien in een voedingsoplossing met constante pH zijn de verschillen niet veroorzaakt door bodemverzuring o.i.v. ammoniummeststof. De oorzaak van tegenstrijdige effecten van nitraat en ammonium, en de verschillen tussen van sla, kool, rijst en aardappel, zijn niet bekend.

Naast stikstofmeststoffen kunnen ook andere meststoffen effect hebben op de cadmium gehalten in gewassen. Bemesting met silica lijkt in een aantal gevallen (bij rijst) te leiden tot lagere cadmiumgehalten in gewassen (Sarwar *et al.*, 2010). Bemesting met silica is in Nederland ongebruikelijk. In omliggende landen worden calciumsilicaten, reststoffen uit hoogovens, soms gebruikt als kalkmeststof.

De toevoeging van fosfaat aan bodem leidt in een aantal gevallen tot lagere cadmiumgehalten in gewassen (Bolan *et al.*, 2003). Dit effect kan verklaard worden doordat de binding van cadmium aan de bodemdeeltjes toeneemt. In de Kempen zijn de fosfaatgehalten in de bodem echter al dusdanig hoog dat een dergelijke maatregel waarschijnlijk weinig effect zal hebben.

Diepploegen

In de Kempen bevat de ondergrond (25-50 cm -mv) vaak minder cadmium dan de bovengrond (0-25 cm -mv) (Van Luit & Smilde, 1983; Rietra et al., 2004). Het mengen van de cadmiumrijke bovengrond met grond die minder cadmium bevat leidt tot een bovengrond met minder cadmium. Afhankelijk van de bewortelingsdiepte van gewassen kan dat leiden tot een lager cadmiumgehalte in gewassen (Van Lune & Zwart, 1997). Een dergelijk vorm van verdunnen is echter niet toegestaan als dat leidt tot meer verspreiding van cadmium via uitspoeling naar het grondwater. Bovendien kan het mengen van de ondergrond met de bovengrond ook leiden tot een verschraling van de bouwvoor omdat de ondergrond vaak minder organische stof bevat. In een experiment in de Kempen is bovengrond (1,54 mg Cd kg⁻¹) gemengd met ondergrond (0,50 mg Cd kg⁻¹) tot een diepte van 50 cm om de cadmiumgehalte in de bouwvoor te doen dalen tot 1,0 mg Cd kg⁻¹ voor de daarop groeiende gewassen. Hierbij trad geen verandering op van organische stof in de bouwvoor. Het effect van de grondbewerking tot 50 cm, t.o.v. grondbewerking tot 25 cm (en bekalking tot pH 5,5), was bij andijvie, prei en sla gering, maar bij spinazie halveerden de cadmiumgehalten, mogelijk vanwege de verbeterde opbrengst (van Luit, 1986b). Niet duidelijk is waarom de verlaagde cadmiumgehalten niet leidden tot lage cadmiumgehalten in andijvie, prei en sla.

Het bedekken van vervuilde grond met schonere grond is getest bij grond uit de uiterwaarden (van Driel *et al.*, 1995; van Noordwijk *et al.*, 1995). De cadmiumopname is grofweg proportioneel aan de hoeveelheid wortels in de vervuilde laag. Vanwege het diep wortelen van veel gewassen, leidden dunne lagen met schone grond (10 a 20 cm) nauwelijks tot effecten bij granen, maar wel bij ondiep wortelende gewassen zoals spinazie en sla.

Gewasrotatie

Het gebruik van gewassen die leiden tot een afvoer van cadmium kan op lange termijn de gebruiksmogelijkheden van de grond voor andere -gevoeligere- gewassen vergroten. De totale afvoer van cadmium in een jaar hangt af van de cadmiumgehalten in de gewassen en de opbrengst van het product. Voor reguliere akkerbouwgewassen zijn dergelijke berekeningen zijn niet gemaakt in de literatuur. Daarom wordt hier een eenvoudige berekening gedaan; bij een cadmiumgehalte in de bodem van 1,2 mg kg⁻¹ en een pH 5,5 is voor verschillende gewassen het cadmiumgehalte in het product opgezocht. Dat is een situatie die zich kan voordoen nabij de zinkfabriek in Budel-Schoot. De bouwvoor van 10 cm diep bevat dan ongeveer 1,8 kg Cd per ha. In tabel 6 is te zien dat van de reguliere teelten in de Kempen de teelt van suikerbiet leidt tot de hoogste afvoer van cadmium. De verlaging van de hoeveelheid Cd in de bodem in geval van suikerbiet is echter nog steeds zodanig beperkt dat op basis van reguliere gewassen en rotaties de verbetering van de bodemkwaliteit zeer lang zal duren.

Tabel 6

Gemiddelde afvoer van Cd bij een bodem met 1,2 mg Cd /kg en een ph van 5,5, en 1,8 kg Cd per ha in bouwvoor.

Gewas	Opbrengst*** (ton per ha)	Cd gehalte (mg Cd kg ⁻¹ vers)	Cd afvoer (gram)	Afvoer uit bouwvoor (% per jaar)
Aardappel	47	0,20	9	0,5%
Suikerbiet**	79,9	0,8	15	0,8%
Gerst (excl stro)*	6,7	0,07	0,5	0,03%
Graan stro****	3,2	0,96	3	0,1%
Snijmais	16,2	0,29	5	0,3%

*(16% vocht) **(Rietra et al., 2004), ds 24% *** Land en tuinbouwcijfers (CBS, 2012)****gemiddelde Cd gehalte in stro(Rietra et al., 2005).

Effecten van rotaties op cadmiumgehalten in gewassen zijn niet vaak onderzocht. Een review (Mench, 1998) geeft aan dat gehalten in granen hoger zijn na lupines, mogelijk vanwege het verzurende effect van deze lupines.

4 Conclusies

Er zijn in de jaren 2004 tot en met 2006 veel gecombineerde bodem en gewasmetingen in de Nederlandse Kempen gedaan aan landbouwgewassen. Dat werk, in combinatie met andere bodem en gewasanalyses in Nederland en België, heeft geleid tot eenvoudige niet-lineaire regressiemodellen die de overdracht van Cd van bodem naar gewas redelijk tot goed te beschrijven op basis van bodemanalyses van cadmium, organische stof en pH. Op basis van de modellen is voorspeld bij welke bodemomstandigheden de norm voor cadmium in landbouwgewassen overschreden worden.

Op basis van deze resultaten zijn 'risicogebieden' weergegeven die aangeven waarbinnen de gehalten aan Cd in bepaalde gewassen waarschijnlijk niet aan de norm voldoen. Risicogewassen die daarbij in de Kempen voor een deel niet aan de norm kunnen voldoen zijn schorseneer, selder, spinazie, prei en wortelen. Voor andere gewassen geldt dat de kans dat de gehalten niet aan de norm voldoen klein zijn. Wel blijkt uit een analyse van de betrouwbaarheid van de modellen dat deze voor sommige gewassen (o.a. sla) bodemgehalten lager moeten zijn om meer zeker te zijn van geen normoverschrijdingen in gewassen.

Bekalking en pH verhoging van tot 5,5 à 6, geeft bij een aantal gevoelige gewassen lagere cadmiumgehalten in de producten. Gevoelige gewassen, gewassen die de norm kunnen overschrijden, zijn bijvoorbeeld: schorseneer, prei en wortel. Bodemverbetering door aanvoer van organische stof, bijvoorbeeld door compost of organische stofrijke meststoffen, kan bij bodems met hele lage organische stofgehalten ook leiden tot lagere cadmiumgehalten. Beide adviezen passen bij een normale landbouwpraktijk op zandgrond waarbij een organisch stofgehalte wordt nagestreefd 1,2-1,9% C (LNE, 2014) (komt overeen met 2,0-3,2% organische stof) en een pH van 5,5 à 5,9 bij de meeste landbouwgewassen (van Dijk & van Geel, 2012). Voor een groot deel van de bodems in de Kempen geldt echter dat het organische stof gehalte al zodanig is dat verhoging ervan niet alleen zeer hoge giften vereist maar ook dat de effectiviteit ervan klein is.

De pH verhoging conform landbouwkundige adviezen leidt bij de relatief lage cadmiumgehalten in de bodem in Kempen (<2 mg Cd/kg ds) tot cadmiumgehalten die gemiddeld voldoen aan de normen. Er zijn aanwijzingen dat de pH van landbouwbodems vaak laag is ten opzichte van de adviezen². De normoverschrijdingen die soms optreden worden door VWA als niet ernstig gezien voor de volksgezondheid omdat de overschrijding weinig voorkomen en bovendien gering qua hoogte van de overschrijding zijn.

Ook wanneer de gemiddelde bodem pH en het organische stofgehalte op peil zijn, kan er sterke variatie zijn binnen een perceel. Sensortechnologie voor het in kaart brengen van de bodem pH en organische stof kan gebruikt worden voor precisiebekalking en het beter op peil houden van bodemorganische stof.

Alhoewel er aanwijzingen zijn dat bodembiologische condities (biodiversiteit) belangrijk zijn bij de opname van cadmium door gewassen zijn er voor zover bekend geen mogelijkheden om de condities dusdanig te managen dat de opname door gewassen vermindert.

Fytoremediatie is vaak voorgesteld om een deel van de cadmiumvoorraad uit de bodem te verwijderen. De afvoer van cadmium via de huidige landbouwgewassen is echter zodanig gering dat dit weinig perspectief biedt. Aanplant van speciale gewassen al dan niet in combinatie met energieteelt kan binnen 5 à 10 jaar wel leiden tot sterk verlaagde cadmiumgehalten in de bodem. In die periode kunnen echter geen productiegewassen geteeld worden.

² <http://www.bekalkenloont.nl/>

Literatuur

- ABdK 2008. *Cadmium op landbouwpercelen in de Kempen. Teeltadviezen voor landbouwgewassen.*, Informatie Projectbureau Actief Bodembeheer de Kempen (ABdK).
- Alexander, P. D., Alloway, B. J. & Dourado, A. M. 2006. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables. *Environmental Pollution*, **144**, 736-745.
- Bešter, P. K., Lobnik, F., Eržen, I., Kastelec, D. & Zupan, M. 2013. Prediction of cadmium concentration in selected home-produced vegetables. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **96**, 182-190.
- Boekhold, A. E. & Van Der Zee, S. E. A. T. M. 1994. Field scale variability of cadmium and zinc in soil and barley. *Environmental Monitoring and Assessment*, **29**, 1-15.
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., Duraisamy, P., Mani, A. & Arulmozhiselvan, K. 2003. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition. *Plant and Soil*, **250**, 83-94.
- Bouwman, L. A. & Vangronsveld, J. 2004. Rehabilitation of the nematode fauna in a phytostabilized, heavily zinc-contaminated, sandy soil. *Journal of Soils and Sediments*, **4**, 17-23.
- CBGV 2012. *Commissie Bemesting Grasland en voedergewassen. Bemestingsadvies grasland en voedergewassen.*
- CBS 2012. *Land- en tuinbouwcijfers... / Landbouw-Economisch Instituut ; Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), LEI-DLO [etc.], 's-Gravenhage [etc.]*.
- de Vries, W., Römkens, P. F. A. M., Bonten, L. T. C., Rietra, R. P. J. J., Ma, W. C. & Faber, J. H. 2008. *De invloed van bodemeigenschappen op kritische gehalten voor zware metalen en organische microverontreinigingen in de bodem*, Alterra, Wageningen.
- Dijkshoorn, W., Broekhoven, W. v. & Lampe, J. E. M. 1979. Phytotoxicity of zinc, nickel, cadmium, lead, copper and chromium in three pasture plant species supplied with graduated amounts from the soil. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **27**, 241-253.
- Elsen, A. 2010. *Effect van 14 jaar compostgebruik op de (fysische/biologische) bodemkwaliteit in de akkerbouw. Bodemkundige Dienst van België, Heverlee.*
- EU 2006. *Verordening (EG) Nr. 1881/2006 van de Commissie van 19 december 2006 tot vaststelling van de maximumgehalten aan bepaalde verontreinigingen in levensmiddelen.*
- Florijn, P. J., Nelemans, J. A. & van Beusichem, M. L. 1992. The influence of the form of nitrogen nutrition on uptake and distribution of cadmium in lettuce varieties. *Journal of Plant Nutrition*, **15**, 2405-2416.
- Florijn, P. J. & Van Beusichem, M. L. 1993. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. *Plant and Soil*, **150**, 25-32.
- FoodCAD, 2016. Modelling van de opname van Cadmium in blad- en wortelgewassen. Website. http://www.coda-cerva.be/index.php?option=com_content&view=article&id=559&lang=en. Laatst bekeken op: 24 mei 2016.
- GGD 2008. *Blootstelling aan cadmium en andere zware metalen in de gemeente Eijsden. Rapport 8156.*
- Grant, C. A., Clarke, J. M., Duguid, S. & Chaney, R. L. 2008. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of the Total Environment*, **390**, 301-310.
- Guan, M. Y., Fan, S. K., Fang, X. Z. & Jin, C. W. 2015. Modification of nitrate uptake pathway in plants affects the cadmium uptake by roots. *Plant Signaling and Behavior*, **10**.
- Heggo, A., Angle, J. S. & Chaney, R. L. 1990. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal uptake by soybeans. *Soil Biology and Biochemistry*, **22**, 865-869.
- Hemkes, O. J. & Kemp, A. 1976. *Invloed van rioolzuiveringsslib op de gehalten aan Cd, Pb, Zn en Cu in grond en gewas*, CABO, Wageningen.
- Henkens, P. L. C. M. & de Haan, S. 1980. *Onderzoek naar de gebruiksmogelijkheden van zuiveringsslib van Almelo en Assen als meststof, grondverbeteringsmiddel of stortmateriaal*, Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren.
- Hoskam, E. G., Graaf, G. J. d., Noorman, N. & Over, H. J. 1982. Zinc poisoning in foals. *Tijdschrift voor Diergeneeskunde*, **107**, 672-680.
- Ishikawa, N., Ishioka, G., Yanaka, M., Takata, K. & Murakami, M. 2015. Effects of ammonium chloride fertilizer and its application stage on cadmium concentrations in wheat (*Triticum aestivum* L.) grain. *Plant Production Science*, **18**, 137-145.
- Janoušková, M. & Pavlíková, D. 2010. Cadmium immobilization in the rhizosphere of arbuscular mycorrhizal plants by the fungal extraradical mycelium. *Plant and Soil*, **332**, 511-520.
- Jansson, G. & Öborn, I. 2000. Cadmium content of swedish carrots and the influence of soil factors. *Acta Agriculturae Scandinavica - Section B Soil and Plant Science*, **50**, 49-56.
- Koopmans, G. F., Römkens, P. F. A. M., Fokkema, M. J., Song, J., Luo, Y. M., Japenga, J. & Zhao, F. J. 2008. Feasibility of phytoextraction to remediate cadmium and zinc contaminated soils. *Environmental Pollution*, **156**, 905-914.

- Kubo, K., Watanabe, Y., Oyanagi, A., Kaneko, S., Chono, M., Matsunaka, H., Seki, M. & Fujita, M. 2008. Cadmium concentration in grains of Japanese wheat cultivars: Genotypic difference and relationship with agronomic characteristics. *Plant Production Science*, **11**, 243-249.
- Kurz, H. 1999. Selection of cultivars to reduce the concentration of cadmium and thallium in food and fodder plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **162**, 323-328.
- Larsson Jönsson, E. H. & Asp, H. 2011. Influence of nitrogen supply on cadmium accumulation in potato tubers. *Journal of Plant Nutrition*, **34**, 345-360.
- Larsson Jönsson, E. H. & Asp, H. 2013. Effects of pH and nitrogen on cadmium uptake in potato. *Biologia Plantarum*, **57**, 788-792.
- LNE 2014. *Department Leefmilieu Natuur & Energie (LNE). Organische stof in de bodem. Sleutel tot bodemvruchtbaarheid.*
- Mao, Q. Q., Guan, M. Y., Lu, K. X., Du, S. T., Fan, S. K., Ye, Y. Q., Lin, X. Y. & Jin, C. W. 2014. Inhibition of nitrate transporter 1.1-controlled nitrate uptake reduces cadmium uptake in arabidopsis. *Plant Physiology*, **166**, 934-944.
- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.*
- McGrath, S. P., Zhao, F. J., Dunham, S. J., Crosland, A. R. & Coleman, K. 2000. Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application. *Journal of Environmental Quality*, **29**, 875-883.
- McLaughlin, M. J., Palmer, L. T., Tiller, K. G., Beech, T. A. & Smart, M. K. 1994. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers. *Journal of Environmental Quality*, **23**, 1013-1018.
- McLaughlin, M. J., Smolders, E., Degryse, F. & Rietra, R. 2011. Uptake of metals from soil into vegetables. In: *Dealing with contaminated sites*. Springer, pp. 325-367.
- Mench, M. J. 1998. Cadmium availability to plants in relation to major long-term changes in agronomy systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **67**, 175-187.
- Norton, G. J., Deacon, C. M., Mestrot, A., Feldmann, J., Jenkins, P., Baskaran, C. & Meharg, A. A. 2015. Cadmium and lead in vegetable and fruit produce selected from specific regional areas of the UK. *Science of the Total Environment*, **533**, 520-527.
- Oste, L. A., Lexmond, T. M. & Van Riemsdijk, W. H. 2002. Metal immobilization in soils using synthetic zeolites. *Journal of Environmental Quality*, **31**, 813-821.
- OVAM 2007. *Teeltadvies voor de landbouw in kader van het Interreg project Benekempen.*
- Posthuma, L., Westerhof, R., Wintersen, A., Otte, P. & Lukacs, S. 2008. Kijk op de Risicotoolbox Bodem: Beoordelen van de actuele bodemkwaliteit en kiezen van Lokale Maximale Waarden. *RIVM rapport 711701082.*
- Rietra, R. P. J. J., Japenga, J., Bouwman, L. & Römkens, P. F. A. M. 2006a. *Effect van bekalken op cadmiumopname door gewassen : resultaten van de veldproeven in het eerste jaar en tweede jaar*, Alterra, Wageningen.
- Rietra, R. P. J. J. & Römkens, P. F. A. M. 2007a. *Actief bodembeheer toemaakdekken : risico's van bodemverontreinigingen voor de kwaliteit van veevoer en gehalten aan lood en cadmium in orgaanvlees in het Veenweidegebied*, Alterra, Wageningen.
- Rietra, R. P. J. J. & Römkens, P. F. A. M. 2007b. *Cadmium en zink in de bodem en landbouwgewassen in de Kempen 2006 : vervolgonderzoek voor de gewassen schorseneer, waspeen en prei*, Alterra, Wageningen.
- Rietra, R. P. J. J., Römkens, P. F. A. M. & Japenga, J. 2004. *Cadmium en zink in de bodem en landbouwgewassen in de Kempen : onderzoek naar de relatie tussen cadmium en zinkgehalte in de bodem en in het gewas in de gemeente Cranendonck*, Alterra, Wageningen.
- Rietra, R. P. J. J., Römkens, P. F. A. M. & Japenga, J. 2005. *Cadmium en zink in de bodem en landbouwgewassen in de Kempen 2004 : vervolgonderzoek naar relatie tussen cadmium en zinkgehalte in de bodem en in het gewas in de gemeente Cranendonck*, Alterra, Wageningen.
- Rietra, R. P. J. J., Römkens, P. F. A. M. & Japenga, J. 2006b. *Cadmium en zink in de bodem en landbouwgewassen in de Kempen 2005 : vervolgonderzoek naar relatie tussen cadmium en zinkgehalte in de bodem en in schorseneer, wortels en granen*, Alterra, Wageningen.
- RIVM-RIKILT 2005. *Front office voedselveiligheid. Aangevuld advies inzake cadmium en zink in dierlijke en plantaardige producten afkomstig uit de Brabantse Kempen.*
- Römkens, P. & Rietra, R. 2011a. *Lood in bodem en gewas in volkstuincomplexen in Leiden : locatie-specifiek onderzoek naar risico's van bodemverontreiniging*, Alterra, Wageningen.
- Römkens, P. F. A. M., Groenenberg, J. E., Rietra, R. P. J. J. & de Vries, W. 2007a. *Onderbouwing LAC-2006 waarden en overzicht van bodem-plant relaties ten behoeve van de Risicotoolbox : een overzicht van gebruikte data en toegepaste methoden*, Alterra, Wageningen.
- Römkens, P. F. A. M., Guo, H. Y., Chu, C. L., Liu, T. S., Chiang, C. F. & Koopmans, G. F. 2009. Prediction of Cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines. *Environmental Pollution*, **157**, 2435-2444.

- Römken, P. F. A. M. & Rietra, R. P. J. J. 2011b. *Locatiespecifiek onderzoek naar de risico's van lood in moestuinen : gehalten aan lood in de bodem en moestuingewassen in het volkstuintcomplex 'Aan het Meer' te Heerenveen*, Alterra, Wageningen.
- Römken, P. F. A. M., Schuur, G. W., Lijzen, J. P. A., Rietra, R. P. J. J. & Dirven- van Breemen, E. M. 2005. *Risico's van cadmium en lood in moestuinen in de Kempen*, Alterra, Wageningen.
- Römken, P. F. A. M., Zeilmaker, M. J., Rietra, R. P. J. J., Kan, C. A., van Eijkeren, J. C. H., van Raamsdonk, L. W. D. & Lijzen, J. P. A. 2007b. *Blootstelling en opname van cadmium door runderen in de Kempen: een modelstudie*, Alterra, Wageningen.
- Sarwar, N., Saifullah, Malhi, S. S., Zia, M. H., Naeem, A., Bibia, S. & Farida, G. 2010. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **90**, 925-937.
- Smilde, K. W. ongepubliceerd. vakkenproef 6306.
- Smilde, K. W., Van Driel, W. & Van Luit, B. 1982. Constraints in cropping heavy-metal contaminated fluvial sediments. *Science of the Total Environment*, **25**, 225-244.
- Swartjes, F. A., Versluijs, K. W. & Otte, P. F. 2013. A tiered approach for the human health risk assessment for consumption of vegetables from with cadmium-contaminated land in urban areas. *Environmental Research*, **126**, 223-231.
- van de Ven, W. S. M., Gerbens, J. & van Driel, W. 1977. *Spoorelementgehalten in koeien uit gebieden langs Rijn en IJssel*, I.R.I., Delft.
- van Dijk, W. & van Geel, W. 2012. *Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen*, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Lelystad.
- Van Driel, W., Stuurmans, W., Dekkers, J. M. J., de Vries, W. V., G. . & Stienen, M. J. J. 1987. *Projectgroep Zware Metalen in Oevergronden van Maas en, Zijrivieren. Zware metalen in oevergronden en daarop verbouwde gewassen in het stroomgebied van Maas, Geul en Roer in de provincie Limburg*, Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren.
- van Driel, W., van Goor, B. J. & Smilde, K. W. 1975. *Zware metalen in havenslib en enkele daarop verbouwde gewassen : interimrapport*, IB, Haren (Gr.).
- van Driel, W., van Luit, B., Smilde, K. W. & Schuurmans, W. 1995. Heavy-metal uptake by crops from polluted river sediments covered by non-polluted topsoil - I. Effects of topsoil depth on metal contents. *Plant and Soil*, **175**, 93-104.
- Van Luit, B. 1984. Cadmiumopname door gewassen. *Landbouwkundig Tijdschrift*, **96**, 19-20.
- van Luit, B. 1986a. *Tussentijdse balans bekalkingsonderzoek Brabantse Kempen*, Nota 151, IB, Haren.
- van Luit, B. 1986b. *Tussentijdse balans bekalkingsonderzoek Brabantse Kempen*, I.B., Haren (Gr.).
- Van Luit, B. & Smilde, K. W. 1983. Onderzoek naar verontreiniging met cadmium en zink van grond en gewas in de omgeving van zinkfabrieken. *Bedrijfsontwikkeling*, 489-493.
- Van Lune, P. & Zwart, K. B. 1997. Cadmium uptake by crops from the subsoil. *Plant and Soil*, **189**, 231-237.
- van Noordwijk, M., van Driel, W., Brouwer, G. & Schuurmans, W. 1995. Heavy-metal uptake by crops from polluted river sediments covered by non-polluted topsoil - II. Cd-uptake by maize in relation to root development. *Plant and Soil*, **175**, 105-113.
- Veen, N. G. v. d., Henkens, C. H., Hidding, A. P., Bommelijs, S., Roorda, J. P. N. L. v., Wiersma, D., van Lune, P. & Van Goor, B. J. 1983. Gehalten aan cadmium in Nederlandse land- en tuinbouwgewassen *Bedrijfsontwikkeling*.
- VWA 2005. *Voedsel en Waren Autoriteit. Cadmium en lood in landbouwgewassen, najaar 2005*.
- Wang, Q., Zhang, J., Zhao, B., Xin, X., Zhang, C. & Zhang, H. 2014. The influence of long-term fertilization on cadmium (Cd) accumulation in soil and its uptake by crops. *Environmental Science and Pollution Research*, **21**, 10377-10385.
- Weightman, R. M. 2006. Heavy metal and microbial contamination of Valerian (*Valeriana officinalis* L.) roots grown in soil treated with sewage sludge. *Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants*, **12**, 77-88.
- Wiersma, D., Van Goor, B. J. & Van Der Veen, N. G. 1986. Cadmium, lead, mercury, and arsenic concentrations in crops and corresponding soils in The Netherlands. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **34**, 1067-1074.
- Yang, Y., Xiong, J., Chen, R., Fu, G., Chen, T. & Tao, L. 2016. Excessive nitrate enhances cadmium (Cd) uptake by up-regulating the expression of OsIRT1 in rice (*Oryza sativa*). *Environmental and Experimental Botany*, **122**, 141-149.
- Zhang, K., Wang, J., Yang, Z., Xin, G., Yuan, J., Xin, J. & Huang, C. 2013a. Genotype variations in accumulation of cadmium and lead in celery (*Apium graveolens* L.) and screening for low Cd and Pb accumulative cultivars. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*, **7**, 85-96.
- Zhang, K., Yuan, J., Kong, W. & Yang, Z. 2013b. Genotype variations in cadmium and lead accumulations of leafy lettuce (*Lactuca sativa* L.) and screening for pollution-safe cultivars for food safety. *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, **15**, 1245-1255.

Bijlage 1 Bodem Plant relaties voor Cd

In tabel B1 is een overzicht gegeven van bodem plant relaties zoals gebruikt voor de afleiding van de huidige LAC waarden voor landbouw (Römkens et al., 2007a)

Tabel B1. Bodem – plant relaties voor Cadmium

Land gebruik	Gewas	a	n (Cd _b)	b (pH)	c (klei)	d (OS)	R ²	se(Y)	N	Q _{max} ¹	bron
Beweid grasland	Gras-zand (Kempen)	1.45	1.22	-0.38	-	-	0.63	0.23	115	0.93 ²	Römkens
	Gras-klei/veen (Landelijk/Maas)										
Veevoer	Mais	0.90	1.08	-0.21	-0.32	-	0.62	26	39	6.1	Römkens
	Suikerbiet	1.33	0.62	-0.22	-0.13	-	0.83	0.15	112	3.2	Römkens
Akkerbouw	Tarwe	0.22	0.62	-0.12	-0.04	-0.33	0.64	0.2	75	0.58	Römkens
	Aardappel	0.97	0.81	-0.21	-0.2	-0.41	0.78	0.26	118	0.42	Römkens
	Aardappel	-0.86	0.36	0.06	-0.27	-0.13	0.35	-	103	3.8	Versluijs
Groenteteelt	Sla	2.55	0.85	-0.33	-0.19	-0.39	0.71	0.16	152	8.9	Römkens
	Sla	1.00	0.28	-0.18	0.16	-0.19	0.30	-	125	2.5	Versluijs
	Andijvie	2.35	0.58	-0.2829	-0.18	-0.44	0.66	0.24	52	8.8	Römkens
	Andijvie	0	0.42	-0.10	0.30	0.10	0.28	-	93	3.9	Versluijs
	Spinazie ¹	2.19	0.77	-0.29	-	-0.4	0.49	0.2	82	2.3	Römkens
	Spinazie	1.3	0.28	-0.22	0.37	-0.64	0.34	-	-	3.2	Versluijs
Fruit	Appel	-	-	-	-	-	-	-	99	0.044	Römkens
Sierteelt	Bomen/bollen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹ maximale gemeten *plant* gehalte dat in de databases aangetroffen is

² maximale plantgehalte < norm in landelijk bestand

Bijlage 2 5, 10 en 50% normen voor Cd

In tabel B2 staat een overzicht van de 5 en 10% normen voor Cd zoals afgeleid in het Benekempen project (OVAM, 2007). De waarden in de kolom 'gemiddelde aan de gewasnorm' zijn de 50% normen zoals gehanteerd in deze notitie. De 5 en 10% normen geven de gehalten in de bodem weer waar beneden de kans dat er gewasnormen overschreden worden minder dan 10 of 5% is.

Tabel B2. Overzicht van gemiddelde (50%), 10 en 5% bodemnormen voor Cadmium voor de Kempen

Gewas	Gemiddelde aan de gewasnorm			<10% gewassen boven de norm			<5% gewassen boven de norm		
	pH _{KCl} 4,5	pH _{KCl} 5,5	pH _{KCl} 6,5	pH _{KCl} 4,5	pH _{KCl} 5,5	pH _{KCl} 6,5	pH _{KCl} 4,5	pH _{KCl} 5,5	pH _{KCl} 6,5
Aardappel	6,1	9,5	14,8	2,4	3,8	5,7	1,3	2,0	3,0
Andijvie	0,9	3,3	11,4	0,3	0,9	3,3	0,2	0,7	2,3
Knolselder	0,2	0,4	0,9	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3
Komkommer		19,1			16,4			14,6	
Prinsessenbonen	2,9	4,0	7,6	1,7	3,2	6,0	1,4	2,6	4,9
Schorseneer	0,2	0,9	4,7	<0,1	0,2	0,8	<0,1	0,1	0,6
Sla	1,9	3,33	5,6	0,4	0,7	1,3	0,3	0,5	0,8
Spinazie	1,2	1,4	1,9	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
Tomaat	17,8	26,9	40,7	1,6	2,6	4,0	0,9	1,5	2,2
Witte kool	1,9	3,0	6,7	1,8	2,8	5,8	1,8	2,7	5,5
Wortelen	1,4	2,4	4,1	0,3	0,5	0,8	0,2	0,3	0,6