GeoConnect
Meester Dekkerstraat 4
1901 PV Castricum
M 5.1, 2, e

info@geoconnect.nl
www.geoconnect.nl

De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in diffuus verontreinigde bodems binnen de provincie Utrecht

GC 01-2024

Datum	September 2024
Auteur(s)	5.1, 2, e
Rapportnummer	GC 20230927
Oplage	1
Aantal pagina's	34
Aantal bijlagen	5
Opdrachtgever	Provincie Utrecht

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie of welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van GeoConnect.

Indien dit rapport in opdracht wordt uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden van GeoConnect, dan wel de betreffende overeenkomst gesloten tussen de partijen.
Het ter inzage geven van het GeoConnect-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2024 GeoConnect

Samenvatting

De bodem in de provincie Utrecht is plaatselijk diffuus verontreinigd met lood. Deze verontreiniging is veelal gerelateerd aan het voorkomen van toemaakdekken en stedelijke ophooglagen.

De hoge loodgehalten in toemaakdekken en stedelijke ophooglagen vormen een humaan toxicologisch risico. Lood heeft bij jonge kinderen (0 – 6 jaar) een nadelig effect op de ontwikkeling van de hersenen, hetgeen kan leiden tot een lager IQ. Dit wordt ook wel IQ puntenverlies genoemd. Door hun hand-mond-gedrag kunnen jonge kinderen (tot 6 jaar) eerder worden blootgesteld aan bodems die verontreinigd zijn met lood. De risico's voor jonge kinderen zijn maatgevend voor het beleid en de te nemen maatregelen.

De gezondheidsrisico's van lood hangen, onder andere, af van de biobeschikbaarheid na orale inname (hand-mond gedrag). Niet al het lood dat het menselijk lichaam binnenkomt wordt opgenomen. Alleen lood dat in de bloedbaan terechtkomt, heeft een mogelijk effect op de gezondheid. Met de loodmodule van Sanscrit kunnen de humaan toxicologische risico's van lood worden bepaald. In de loodmodule wordt een landelijke defaultwaarde gehanteerd voor de relatieve orale biobeschikbaarheid (rel F) van 74% (P80).

Het is ook toegestaan om in de loodmodule van Sanscrit te rekenen met een locatie specifieke rel F, mits goed onderbouwd. Op basis van locatie specifieke rel F waardes kunnen de lood specifieke risico's (van de desbetreffende locaties) beter worden ingeschat, en kan de ernst ervan beter worden beoordeeld.

In onderhavig onderzoek is de locatie-specifieke orale biobeschikbaarheid van lood, in bodemmonsters van toemaakdekken en stedelijke ophooglagen binnen de provincie Utrecht, bepaald met behulp van het RIVM IVD model.

De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood (Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$) in bodems binnen de provincie Utrecht, afkomstig van stedelijke ophooglagen en toemaakdek, varieert van 1 tot 78% (n=30). De P50 en P80 waardes zijn respectievelijk 43 en 58%. Binnen de provincie Utrecht kan voor stedelijke ophooglagen en toemaakdekken een default rel F waarde van 58% (P80) worden gehanteerd.

Voor stedelijke ophooglagen en toemaakdekken in De Ronde Venen (n=11) en Wijk bij Duurstede (n=10) kunnen gebiedsspecifieke rel F waardes worden gehanteerd. Voor De Ronde Venen is de rel F waarde 40% (P80). Als onderscheid wordt gemaakt in OS gehaltes <20% en >20%, dan zijn de rel F waardes voor De Ronde Venen respectievelijk 40% (P80) en 36% (P80). Voor Wijk bij Duurstede is de rel F waarde 52% (P80).

Het is ook mogelijk om voor iedere afzonderlijke onderzoekslocatie – per particuliere tuin, moestuin, kinderspeelplaats, etc. – de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in de bodem te bepalen middels het RIVM IVD model.

Uit het onderzoek blijkt dat de rel F waardes voor bodems in de provincie Utrecht afhankelijk lijken te zijn van het OS gehalte, het $CaCO_3$ gehalte en de pH-$CaCl_2$. Hoe hoger de OS gehaltes en pH-$CaCl_2$ hoe lager de rel F waardes. Het $CaCO_3$ gehalte, daarentegen is positief gecorreleerd met rel F. Rel F kan redelijk goed worden voorspeld op basis van het OS gehalte, het $CaCO_3$ gehalte en pH-$CaCl_2$ (R^2=0,97). Dit is vooralsnog gebaseerd op een beperkte dataset, die niet is gevalideerd met onafhankelijke monsters.

De bepaling van de rel F met behulp van het RIVM IVD model is een relatief kostbaar. Uit voorgaand onderzoek van het RIVM is gebleken dat een HNO_3 leach mogelijk een goed(koper) alternatief is voor het bepalen van rel F. Dit is in onderhavig onderzoek nader onderzocht. Uit het onderzoek blijkt dat de resultaten van de HNO_3 leach voor een aantal monsters niet overeenkomen met de meetresultaten van het RIVM IVD model. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het heterogene karakter (veel puindeeltjes) van deze monsters. Op basis van de waargenomen verschillen tussen de meetresultaten van het RIVM IVD model en de HNO_3 leach wordt geconcludeerd dat de HNO_3 leach geen geschikte alternatieve methode is voor het bepalen van de orale biobeschikbaarheid van lood in bodems, uitgaande van de gehanteerde onderzoeksmethode.

Inhoudsopgave

1	**Inleiding**	**5**
1.1	Kader	5
1.2	Doelstelling	6
2	**Onderzoeksopzet**	**7**
2.1	Monsterlocaties	7
2.2	Monstername	7
2.3	Monstervoorbehandeling en analyses	8
2.4	Statistische analyses	11
3	**Resultaten en discussie**	**12**
3.1	Loodgehaltes en karakteristieken van de bodemmonsters	12
3.2	De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood (Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$)	14
3.3	HNO_3 extractie als een indicator voor het loodgehalte in het chyme (RIVM IVD model)	16
3.4	Correlaties tussen bodemkarakteristieken en de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood (Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$)	17
3.5	De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in bodems van stedelijke ophooglagen en toemaakdekken binnen de provincie Utrecht	20
4	**Conclusies en aanbevelingen**	**23**
4.1	Conclusies	23
4.2	Aanbevelingen	24
5	**Referenties**	25
Bijlage A	Veldwerkfoto´s	26
Bijlage B	Boorstaten	29
Bijlage C	Handheld XRF analyseresultaten	32
Bijlage D	SGS analyseresultaten aangevuld met enkele BGS analyseresultaten	33
Bijlage E	Resultaten van het RIVM IVD model uitgevoerd door BGS	34

1 Inleiding

1.1 Kader

De bodem in de provincie Utrecht is plaatselijk diffuus verontreinigd met lood. Deze verontreiniging is veelal gerelateerd aan het voorkomen van toemaakdekken en stedelijke ophooglagen.

Toemaakdekken zijn ontstaan tussen de 15e en de 19e eeuw gedurende de winning van veen. Het veen werd door turfschippers getransporteerd naar de steden om daar als brandstof gebruikt te worden. Als retourvracht brachten ze stadsafval, stalmest, zand en bagger mee terug. Dit materiaal werd gebruikt om de veengaten te dichten, het land te bemesten en de draagkracht van de veengronden te verbeteren. Dit wordt toemaakdek genoemd. Toemaakdekken variëren gemiddeld in dikte van 15 tot 50 cm en komen voor in grote delen van de provincies Utrecht, Noord-Holland en Zuid-Holland 5.1, 2, e en Poorte, 1999). Het met toemaak bedekte oppervlak bedraagt ca. 6.000 ha. Toemaakdekken komen voor in gebieden met uiteenlopende functies, zoals woongebieden, agrarische gebieden en natuurgebieden. Kenmerkend voor het toemaakdek is de aanwezigheid van artefacten, waaronder (geglazuurde) potscherven, pijpenkopjes, steenkoolassen en verfresten. Deze materialen waren al aanwezig in het aangevoerde stadsvuil. Door deze artefacten bevatten de toemaakdekken relatief hoge loodgehalten (oplopend tot ~ 1500 mg/kg:5.1, 2, e 2007, 2014).

Behalve toemaakdekken komen binnen de provincie Utrecht ook stedelijke ophooglagen voor. Dit zijn door de mens aangebrachte lagen grond om bebouwing en bewoning mogelijk te maken (Bodemrichtlijn, 2020). Deze lagen kunnen, net als toemaakdekken, loodhoudende artefacten bevatten. Deze artefacten konden al aanwezig zijn bij het opbrengen van de lagen of zijn er naderhand in terecht gekomen door slijtage en/of renovatie van bebouwing met loodhoudende bouwmaterialen en/of ‘stort’ van loodhoudende producten (o.a., geglazuurde potscherven, resten van loodslabben, verfresten en steenkoolassen). Stedelijke ophooglagen komen alleen voor bij bebouwing. De hoogste loodgehalten in stedelijke ophooglagen zijn gemeten in dorpen en steden met een lange bewoningsgeschiedenis (oplopend tot ~5000 mg/kg:5.1, 2, e 2014).

De hoge loodgehalten vormen een humaan toxicologisch risico. Lood heeft bij jonge kinderen (0 – 6 jaar) een nadelig effect op de ontwikkeling van de hersenen, hetgeen kan leiden tot een lager IQ. Dit wordt ook wel IQ puntenverlies genoemd. Door hun hand-mond-gedrag kunnen jonge kinderen (tot 6 jaar) eerder worden blootgesteld aan bodems die diffuus verontreinigd zijn met lood. De risico's voor jonge kinderen zijn maatgevend voor het beleid en de te nemen maatregelen.

De gezondheidsrisico’s van lood hangen, onder andere, af van de biobeschikbaarheid na orale inname (hand-mond gedrag). Niet al het lood dat het menselijk lichaam binnenkomt wordt opgenomen. Alleen lood dat in de bloedbaan terechtkomt, heeft een mogelijk effect op de gezondheid. Met de loodmodule van Sanscrit kunnen de humaan toxicologische risico’s van lood (op basis van relatieve orale biobeschikbaarheid) worden bepaald. In de loodmodule wordt een defaultwaarde gehanteerd voor de relatieve orale biobeschikbaarheid (rel F) van 74% (P80, gecorrigeerd voor Average Physiological State (APS)). Dit is een ‘landelijke waarde’ die is gebaseerd op de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in met lood

verontreinigde bodems met organisch stofgehalten (OS) < 20 % (RIVM dataset t/m 2008). De defaultwaarde voor bodems met organisch stofgehalten > 20 % (P80, gecorrigeerd voor Average Physiological State (APS)) is 36% (RIVM dataset t/m 2008). Het is echter ook toegestaan om in de loodmodule van Sanscrit te rekenen met een locatie specifieke rel F, mits goed onderbouwd. Op basis van locatie specifieke rel F waardes kunnen de risico's (van de desbetreffende locaties) beter worden ingeschat, en kan de ernst ervan beter worden beoordeeld.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om van een aantal bodemmonsters (n=20), afkomstig van enkele representatieve (opgehoogde) gebieden uit de provincie Utrecht, de orale biobeschikbaarheid van lood te bepalen op basis van het IVD model van het RIVM. Hierbij wordt uitgegaan van het onderzoeksprotocol: Bepalen van de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in de provincie Utrecht 5.1, 2, e 2022). Dit onderzoeksprotocol is gebaseerd op de RIVM Richtlijn: bepalen van de orale biobeschikbaarheid van lood in de bodem 5.1, 2, e *et al*., 2007). De gemaakte keuzes en afwijkingen t.o.v. de RIVM richtlijn 5.1, 2, e *et al*., 2007) zijn beschreven in het onderzoeksprotocol 5.1, 2, e 2022).

Dit onderzoek richt zich op toemaakdekken en stedelijke ophooglagen binnen de provincie Utrecht. Loodverontreinigingen van andere origine en nieuwe verontreinigingen met lood in de bodem vallen buiten de scope van dit onderzoek.

De resultaten van dit onderzoek zullen worden gebruikt voor een betere prioritering van maatregelen en te nemen beheersmaatregelen om de gezondheidsrisico's, voor met name jonge kinderen, te verkleinen.

2 Onderzoeksopzet

2.1 Monsterlocaties

Met behulp van het Bodem Informatiesysteem (BIS) van Provincie Utrecht zijn meer dan 20 locaties geselecteerd met verhoogde loodgehalten - op basis van historische meetgegevens - geografisch verspreid binnen de provincie. De focus lag op makkelijk bereikbare, openbaar toegankelijke locaties.

Er is gezocht naar locaties met loodgehaltes > GGD risicowaarden voor lood (behorende bij 3 IQ-puntenverlies), zijnde 260 mg/kg voor grote moestuinen (> circa 200 m^2), 370 mg/kg voor wonen met tuin (incl. kleine moestuin) en 390 mg/kg voor plaatsen waar kinderen spelen.

Om inzicht te krijgen in de variatie in de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in bodems binnen de provincie Utrecht, zijn monsterlocaties geselecteerd met verschillende bodems (zand, klei en veen), met verschillende functies (openbaar groen, particuliere tuinen en kinderspeelplaatsen) en met verschillende organisch stofgehalten.

In tabel 1 zijn de monsterlocaties, het bodemgebruik en de verwachte lithologie weergegeven.

Tabel 1. Geselecteerde monsterlocaties, verwachte lithologie, verwachte antropogene loodbron en bodemgebruik.

Monsterlocatie	**Aantal monsters**	**Verwachte lithologie**	**Verwachte antro-pogene loodbron**	**Bodemgebruik**
Amersfoort	4	Zand	Stedelijke Ophooglaag	Openbaar groen (2), particuliere tuin (2)
Westbroek	1	Zand		Particuliere tuin (1)
Langbroek	1	Zand		Openbaar groen (1)
Zeist	3	Zand		Openbaar groen (3)
De Bilt	1	Zand		Kinderspeelplaats (1)
Wijk bij Duurstede	5	Klei	Middeleeuwse ophooglaag	Openbaar groen (4), particuliere tuin (1)
De Ronde Venen	5	Veen	Toemaakdek	Particuliere tuinen (5)

2.2 Monstername

De monstername is uitgevoerd conform het onderzoeksprotocol 5.1, 2, e 2022) waarbij wordt opgemerkt dat in plaats van 2 maal 50 grepen per onderzoekslocatie, 2 maal ≥ 10 grepen per onderzoekslocatie zijn genomen. Op verschillende onderzoekslocaties is gekozen voor een kleiner aantal grepen, omdat een groter aantal grepen resulteerde in te lage loodgehalten voor het beoogde onderzoek (zie §2.1). Op iedere onderzoekslocatie is met een handheld XRF het loodgehalte van de genomen monsters vastgesteld (zie §2.2 On-site handheld XRF analyses).

Aantal monsters per onderzoekslocatie
Per monsterlocatie zijn twee monsters genomen van circa 9 kg per monster. Er is één bodemmonster per onderzoekslocatie in behandeling genomen voor het vaststellen van de orale biobeschikbaarheid van lood. Het andere monster is in opslag genomen. Een uitzondering is locatie AMS-03, waarvan beide bodemmonsters in behandeling zijn genomen. Als uit de interpretatie van de analyseresultaten blijkt dat er nog onduidelijkheden / onzekerheden zijn, kan achteraf nog worden besloten om (een deel van) de locatie duplo's ook nog te laten analyseren.

Monsterdiepte
De voorgeschreven monsterdiepte voor onderzoek naar lood in kinderspeelplaatsen en (moes)tuinen is 0 – 30 cm-mv voor moestuinen en 0 – 20 cm-mv voor overige tuinen en kinderspeelplaatsen (conform SIKB handreiking 8102). In het onderhavige onderzoek zijn geen moestuinen bemonsterd. De standaard monsterdiepte is derhalve 0 – 20 cm-mv.

Op de locaties waar het niet mogelijk bleek om (voldoende) monstermateriaal te nemen met een loodgehalte > GGD risicowaarden (behorende bij 3 IQ-puntenverlies), zijn bodemmonsters genomen op grotere diepte-intervallen als de loodgehaltes op deze diepte-intervallen wel > GGD risicowaarden (behorende bij 3 IQ-puntenverlies) waren.

On-site handheld XRF analyses
In het veld zijn de loodgehaltes van de bodemmonsters gemeten met een handheld XRF (conform SIKB handreiking 8103). In plaats van de door SIKB voorgeschreven handheld XRF duplo analyses, zijn de loodgehaltes per bodemmonster tenminste 10 keer bepaald met de handheld XRF (inclusief vochtcorrectie). Dit om de monsterheterogeniteit vast te kunnen stellen (gemiddelde en relatieve standaard deviatie).

De handheld XRF metingen zijn uitgevoerd met een Niton XL3t GOLLD+ waarbij is gemeten in de Soil Mode met een meettijd van 20 seconden voor filter Main. De detectiegrens, juistheid en herhaalbaarheidsstandaarddeviatie van de gehanteerde handheld XRF meetmethode is respectievelijk ≤ 8 mg/kg, 4,0% en 5,6% (bepaald conform SIKB handreiking 8103.

2.3 Monstervoorbehandeling en analyses

Monstervoorbehandeling en analyses (DS, OS, lutum, $CaCO_3$ en lood) door geaccrediteerd laboratorium
De monsters zijn voorbehandeld door een geaccrediteerd laboratorium (SGS). De monsters zijn gedroogd bij 75 °C. De kleiige monsters, waarin na drogen kleibonken zijn ontstaan, zijn grof gebroken tot deeltjes < 4 mm. De gedroogde (en eventueel gebroken) monsters zijn tweemaal door een splitverdeler in tweeën verdeeld. Dit resulteerde in 4 sub-monsters met een massa van circa 2 kg per sub-monster. Van elk monster is 1 sub-monster verder in behandeling genomen. Het sub-monster is gezeefd over 2 mm. Vervolgens is het gezeefde sub-monster met een rotatieverdeler verdeeld in 8 delen van ieder circa 0,25 kg.

De voorbehandelde monsters zijn geanalyseerd door een geaccrediteerd laboratorium (SGS). Van elk voorbehandelde deelmonster is het organisch stofgehalte (OS), het kleigehalte (lutum), het kalkgehalte ($CaCO_3$) en het loodgehalte (Pb: zogenaamd totaal op basis van koningswaterextractie) bepaald. De bodemkarakteristieken (OS, lutum, $CaCO_3$ en pH-$CaCl_2$)

zijn geanalyseerd om een mogelijk waargenomen variatie in de gemeten relatieve orale biobeschikbaarheid van lood nader te kunnen onderzoeken.

Bepaling van de orale biobeschikbaarheid: RIVM IVD model
British Geological Survey (BGS) heeft de door SGS voorbehandelde monsters geanalyseerd op pH-$CaCl_2$, het totale loodgehalte (na HF ontsluiting) en de orale biobeschikbaarheid van lood. BGS heeft de orale biobeschikbaarheid van lood bepaald conform de RIVM richtlijn: bepalen van de orale biobeschikbaarheid van lood in de bodem 5.1, 2, e et al., 2007). Het gaat dan om de bepaling volgens het **Soil *in vitro* digestion model under fasted conditions** (zie Appendix D in 5.1, 2, e *et al*. (2007)).

Volgens de RIVM richtlijn kan worden gekozen voor een inweeg van 0,06 of 0,6 gram. Er is gekozen voor een inweeg van 0,6 gram, omdat:

1) Van de meerderheid van de monsters op basis waarvan in het verleden de default rel F waarden zijn bepaald ook 0,6 gram is ingewogen (RIVM dataset t/m 2008) en
2) De bodemmonsters heterogeen verontreinigd zijn met lood, hetgeen leidt tot problemen als slechts 0,06 gram wordt ingewogen (slechte reproduceerbaarheid met een inweeg van 0,06 gram).

Conform de RIVM richtlijn 5.1, 2, e *et al*., 2007) is de orale biobeschikbaarheid van lood in elk bodemmonster in duplo geanalyseerd. De reden hiervoor is dat de resultaten van de IVD analyse sterk afhankelijk zijn van de heterogeniteit van het te onderzoeken bodemmonster.

Conform de RIVM richtlijn 5.1, 2, e et al., 2007) is een massabalans opgesteld volgens de volgende formule:

Totaal lood bodem = (totaal lood chyme) + (totaal lood pellet)

Het totaalgehalte lood in de ingewogen bodem (uitgangsmateriaal) dient idealiter gelijk te zijn (met een onzekerheidsmarge) aan het totaalgehalte lood in de pellet en chyme samen. In onderhavig onderzoek is aangehouden dat de recovery's – verhouding tussen gemeten hoeveelheid lood in de bodem en de gemeten hoeveelheid lood in pellet + chyme – bij voorkeur tussen de 75% en 125% dienen te liggen. De recovery's zijn berekend volgens formule 1:

$$Pb_{recovery} = (Pb_{chyme} + Pb_{pellet}) / Pb_{t\text{-}SGS} \times 100 \qquad \text{Formule 1}$$

$Pb_{recovery}$	= de berekende recovery van Pb (in %)
Pb_{chyme}	= door BGS gemeten Pb gehalte in het chyme conform het RIVM IVD model (in mg/kg)
Pb_{pellet}	= door BGS gemeten Pb gehalte in de pellet conform het RIVM IVD model (in mg/kg)
$Pb_{t\text{-}SGS}$	= het totale loodgehalte gemeten door SGS conform NEN-EN-ISO 17294-2 met ontsluiting conform NEN 6961(in mg/kg)

Berekening van de (relatieve) orale biobeschikbaarheid van lood
De orale biobeschikbaarheid van lood in de bodem is berekend volgens formule 2:

$$F_{B\text{-}Pb} = (Pb_{chyme}/Pb_{t\text{-}SGS}) \times 100 \qquad \text{Formule 2}$$

Waarbij,
$F_{B\text{-}Pb}$ = de berekende orale biobeschikbaarheid van Pb in de bodem (in %)
Pb_{chyme} = door BGS gemeten Pb gehalte in het chyme conform het RIVM IVD model (in mg/kg)
$Pb_{t\text{-}SGS}$ = het totale loodgehalte in de bodem gemeten door SGS conform NEN-EN-ISO 17294-2 met ontsluiting conform NEN 6961(in mg/kg)

De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood is bepaald volgens formule 3:

$$\text{Rel } F_{B\text{-}Pb} = F_{bodem} / F_{MTR} = (F_{A\text{-}Pb,\ bodem} \times F_{B\text{-}Pb,\ bodem} \times F_{H\text{-}Pb,\ bodem}) / F_{MTR} \qquad \text{Formule 3}$$

Waarbij,
Rel $F_{B\text{-}Pb}$ = de berekende relatieve orale biobeschikbaarheid van Pb
F_{bodem} = biobeschikbaarheid van lood in de bodem
F_{MTR} = biobeschikbaarheid van lood vastgesteld in de MTR studies (maximaal toegestaan risico) – op basis van dieetstudies
$F_{A\text{-}Pb,\ bodem}$ = biobeschikbare loodfractie in de bodem die de poortader en lymfen passeert
$F_{B\text{-}Pb,\ bodem}$ = biobeschikbare loodfractie in de bodem
$F_{H\text{-}Pb,\ bodem}$ = biobeschikbare loodfractie in de bodem die, na het passeren van de poortader en lymfen, de lever passeert zonder te worden gemetaboliseerd.

Volgens een studie van 5.1, 2, e *et al*. (2006) is F_{MTR} voor lood 0,4 en $F_{A\text{-}Pb,\ bodem}$ voor de gemiddelde fysiologische staat (tussen gevoed en opgevoed) is 0,8. Omdat lood niet wordt gemetaboliseerd in de lever, is $F_{H\text{-}Pb,\ bodem}$ gelijk aan 1.

Door deze waarden in te vullen in formule 3, wordt formule 4 verkregen:

$$\text{Rel } F_{B\text{-}Pb} = (F_{B\text{-}Pb} \times 0{,}8) / 0{,}4 = F_{B\text{-}Pb} \times 2 \qquad \text{Formule 4}$$

Formule 3 en 4 gelden voor ongevoede condities. Omdat de landelijke rel F is gebaseerd op de gemiddelde fysiologische status, dient hiervoor nog te worden gecorrigeerd volgens formule 5:

$$\text{Rel } F_{B\text{-}Pb\text{-}APS} = \text{Rel } F_{B\text{-}Pb} \times CF_{APS} \qquad \text{Formule 5}$$

Waarbij,
Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ = de berekende relatieve orale biobeschikbaarheid van Pb op basis van gemiddelde fysiologische condities
Rel $F_{B\text{-}Pb}$ = de berekende relatieve orale biobeschikbaarheid van Pb
CF_{APS} = de correctiefactor voor gemiddelde fysiologische condities

Volgens een studie van 5.1, 2, e *et al*. (2008) is CF_{APS} gelijk aan 0,854. Door deze waarde in te vullen in formule 4 en 5, wordt formule 6 verkregen:

$$\text{Rel } F_{B\text{-}Pb\text{-}APS} = F_{B\text{-}Pb} \times 2 \times 0{,}854 \qquad \text{Formule 6}$$

Standaard referentiemonster bepaling orale biobeschikbaarheid conform RIVM IVD model
Twee referentiemonsters zijn meegenomen in het biobeschikbaarheidsonderzoek. Dit zijn

NIST 2710a (Montana soil) en BGS 102. Deze referentiemonsters zijn nu voor het eerst geanalyseerd met het RIVM IVD model[1]. Rel $F_{B\text{-}Pb}$ van NIST 2710a en BGS 102 is respectievelijk 13,8% ± 5,4% en 1,1% ± 0,4% (gemiddelde ± 1×standaard deviatie). De gemiddelde recovery van NIST 2710a (Montana soil) en BGS 102 was respectievelijk 92,7% en 108,3%.

Bepaling van de orale biobeschikbaarheid: alternatieve methode (HNO_3 leach)
In de periode 2012 – 2014 hebben 5.1, 2, e *et al*. (2014) verschillende *in-vitro* digestiemodellen gevalideerd op basis van *in-vivo* meetresultaten. Deze studie is ook wel bekend onder de naam 'Biggenstudie'. In de 'Biggenstudie' is ook een *in-vitro* sneltest onderzocht (0,43 M HNO_3 leach). De resultaten van deze sneltest kwamen goed overeen met de *in-vivo* meetresultaten. Hierbij wordt opgemerkt dat de validaties slechts zijn gebaseerd op zes bodemmonsters. In het onderhavige onderzoek zijn de bodemmonsters ook geanalyseerd met de *in-vitro* sneltest (HNO_3 leach conform NEN-ISO 17586). De HNO_3 leach zoals beschreven in 5.1, 2, e *et al.* (2014) is uitgevoerd door een geaccrediteerd laboratorium (SGS).

Opmerking
Monster ZST 03-A (uit Zeist) bleek asbest te bevatten. Dit monster is niet verder geanalyseerd en is in onderhavig onderzoek buiten beschouwing gelaten.

2.4 Statistische analyses

Een multiple lineaire regressie analyse (LMRA) is uitgevoerd om te bepalen of de relatieve biobeschikbaarheid van lood afhankelijk is van één of meerdere bodemparameters. Het multiple lineaire regressie model ziet er als volgt uit (naar 5.1, 2, e *et al.*, 2014):

$$\text{Rel } F_{B\text{-}Pb\text{-}APS} = a\times CaCO_3 + b\times pH\text{-}CaCl_2 + c\times \log(OS) + d\times \log(Pb_{t\text{-}SGS}) + \varepsilon \qquad \text{Formule 7}$$

Waardes <detectiegrens zijn vervangen door ¾×detectiegrens (volgens 5.1, 2, e *et al.*, 1993).

De Shapiro Wilk W test is uitgevoerd om te bepalen of de data een normale of lognormale verdeeld was. De organische stof- en de loodgehaltes bleken lognormaal verdeeld te zijn. Deze data zijn loggetransformeerd.

Er is aangenomen dat ε (residu) een normale verdeling heeft. De multiple lineaire regressie analyse is uitgevoerd met het softwarepakket Statistica, met behulp van de voorwaartse stapsgewijze functie, die bepaalt welke variabelen gerelateerd zijn aan de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood.

[1] De resultaten van deze referentiemonsters kunnen in vervolgonderzoeken gebruikt worden voor de kwaliteitscontrole.

3 Resultaten en discussie

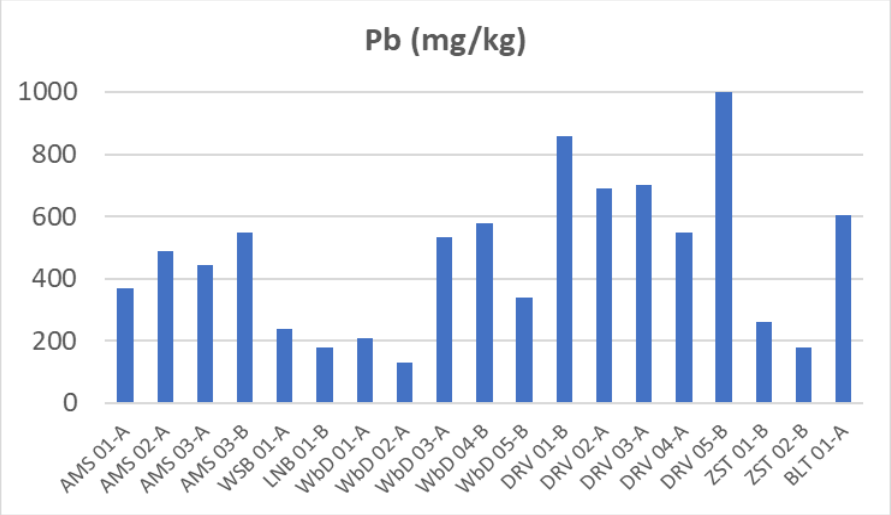
De veldwerkfoto´s en de boorstaten zijn respectievelijk weergegeven in Bijlage A en B. De resultaten van de handheld XRF analyses van de door SGS voorbehandelde monsters (gedroogd en gezeefd over 2 mm) zijn weergegeven in Bijlage C. In Bijlage D zijn alle analyseresultaten van de twee laboratoria (SGS en BGS) weergegeven. Het gaat om de gehaltes van lood (Pb), organisch stof (OS), lutum, calciumcarbonaat ($CaCO_3$) en de zuurgraad (pH-$CaCl_2$). Tevens zijn in Bijlage D het gemiddelde loodgehalte in het chyme en de gemiddelde relatieve orale biobeschikbaarheid van lood per monster weergegeven. In Bijlage E zijn de loodgehaltes in het chyme, de pellets, de berekende recovery's en de berekende relatieve orale biobeschikbaarheid van lood van de duplo bepalingen weergegeven.

3.1 Loodgehaltes en karakteristieken van de bodemmonsters

De loodgehaltes zijn zowel bepaald door SGS (conform NEN-EN-ISO 17294-2 met ontsluiting conform NEN 6961), met een handheld XRF door GeoConnect (conform SIKB handreiking 8103) en door BGS (ICP analyse na HF ontsluiting). Uit een lineaire regressie analyse op basis van de log-getransformeerde loodgehaltes blijkt dat de loodgehaltes, bepaald met de drie verschillende methodes, niet significant van elkaar verschillen (95% betrouwbaarheidsinterval). De lineaire vergelijkingen zijn als volgt:

$\log Pb_{SGS} = 1{,}01 \times \log Pb_{HXRF} - 0{,}04$ (R^2=0,95)
$\log Pb_{SGS} = 0{,}97 \times \log Pb_{BGS} + 0{,}05$ (R^2=0,88)

De door SGS gehanteerde methode (koningswaterontsluiting gevolgd door een ICP analyse) is de gecertificeerde methode in Nederland voor het bepalen van loodgehaltes in de bodem ten behoeve van milieuonderzoek. Derhalve zijn deze loodgehaltes gebruikt voor de bepaling van de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood. In figuur 1 zijn de loodgehaltes per monster, zoals bepaald door SGS, weergegeven.



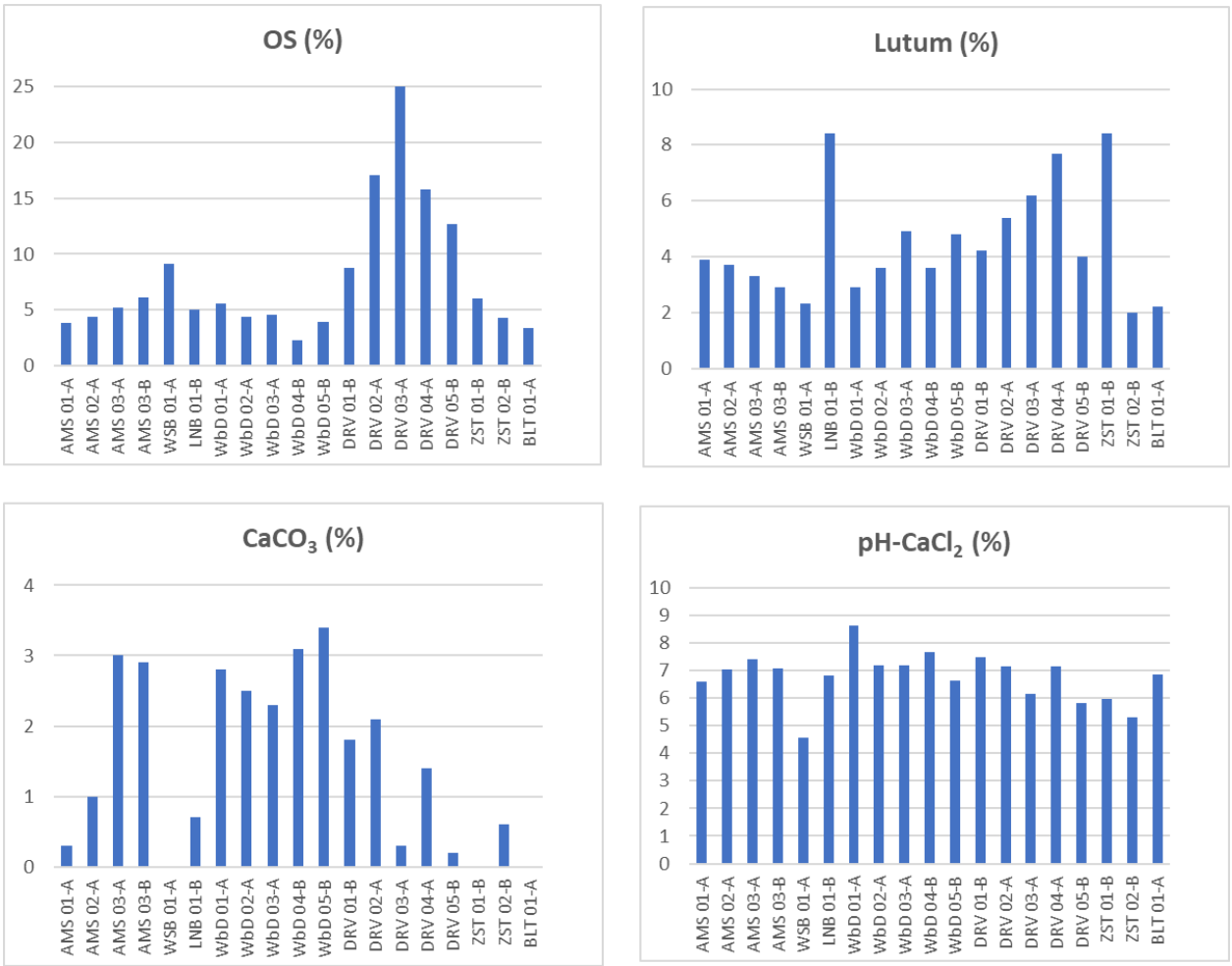
Figuur 1. Loodgehaltes (SGS data) in de bodemmonsters uit de provincie Utrecht. AMS=Amersfoort, WSB=Westbroek, LNB=Langbroek, WbD=Wijk bij Duurstede, DRV=De Ronde Venen, ZST=Zeist, BLT=De Bilt

In figuur 1 is te zien dat de loodgehaltes variëren tussen 130 en 1000 mg/kg. Op een aantal monsternamelocaties was het loodgehalte lager dan de GGD risicowaarden behorende bij 3 IQ-puntenverlies, zijnde 260 mg/kg voor grote moestuinen (> circa 200 m^2), 370 mg/kg voor wonen met tuin (incl. kleine moestuin) en 390 mg/kg voor plaatsen waar kinderen spelen.

Het bleek niet makkelijk te zijn om binnen de provincie Utrecht met lood verontreinigde bodems te vinden ten gevolgde van de aanwezigheid van stedelijke ophooglagen. Op diverse geselecteerde locaties bleek veel te zijn gegraven (o.a., voor het aanleggen van leidingen en kabels). Sommige locaties bleken ook al te zijn gesaneerd.

Van het merendeel van de bemonsterde locaties was het loodgehalte < 100 mg/kg (on-site bepaald met een handheld XRF). In onderhavig onderzoek zijn 20 locaties met de hoogste loodgehaltes geselecteerd.

In figuur 2 zijn de bodemkarakteristieken (OS, lutum, $CaCO_3$ en pH-$CaCl_2$) per monster weergegeven.



Figuur 2. Bodemkarakteristieken (OS, lutum, $CaCO_3$ en pH-$CaCl_2$) van de bodemmonsters uit de provincie Utrecht. AMS=Amersfoort, WSB=Westbroek, LNB=Langbroek, WbD=Wijk bij Duurstede, DRV=De Ronde Venen, ZST=Zeist, BLT=De Bilt

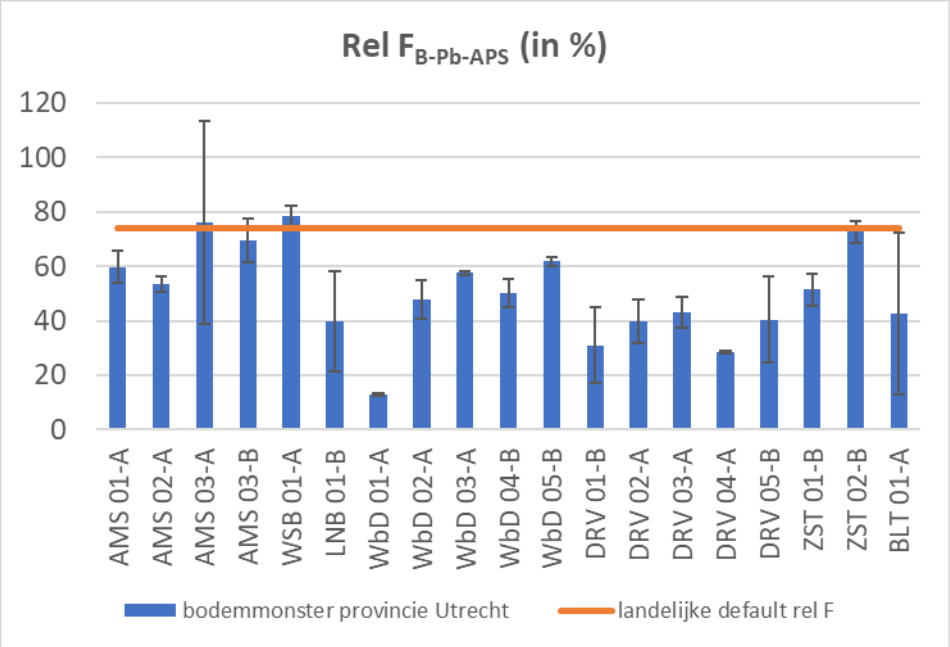
De OS gehaltes variëren tussen 2,3 en 25,0%. De hoogste OS gehaltes zijn gemeten in de bodemmonsters van De Ronde Venen, variërend van 8,8 tot 25,0% met een gemiddelde van 16,0%. De bodemmonsters van De Ronde Venen bevatten veen(resten). De OS gehaltes in de overige monsters variëren van 2,3 tot 9,1% met een gemiddelde van 4,9%.

De lutumgehaltes variëren van 2,0 tot 8,4% met een gemiddelde van 4,4%. Alle monsters zijn zandig. Geen enkel monster is een kleimonster. Het was de verwachting dat de bodemmonsters van Wijk bij Duurstede hoofdzakelijk uit klei zouden bestaan (zie tabel 1). Dat blijk niet het geval te zijn.

De $CaCO_3$ gehaltes variëren tussen <0,2 en 3,4% met een gemiddelde van 1,5%. De pH-$CaCl_2$ waardes variëren tussen 4,55 en 8,62 met een gemiddelde van 6,77. De meeste bodemmonsters zijn niet kalk gebufferd.

3.2 De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood (Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$)

In figuur 3 is de relatieve orale biobeschikbaarheid (in %) per monster weergeven.



Figuur 3. Relatieve orale biobeschikbaarheid van lood (IVD model) in de bodemmonsters van stedelijke ophooglagen en toemaakdekken binnen de provincie Utrecht. De foutbalken geven de absolute verschillen tussen de duplobepalingen per bodemmonster weer. AMS=Amersfoort, WSB=Westbroek, LNB=Langbroek, WbD=Wijk bij Duurstede, DRV=De Ronde Venen, ZST=Zeist, BLT=De Bilt

In figuur 3 is te zien dat de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in bodemmonsters uit de provincie Utrecht, afkomstig van stedelijke ophooglagen of toemaakdekken, varieert tussen 13 en 78%. De landelijke default rel F (P80) is vastgesteld op 74%. De orale biobeschikbaarheid in 17 van de 19 onderzochte bodemmonsters uit de provincie Utrecht is < 74%.

De spreiding in de duplobepalingen is relatief hoog (foutbalken in figuur 3) en varieert van 2 tot 98% (Bijlage C: 1×RSTD). Dit wordt veroorzaakt door de grote hoeveelheid grove (loodhoudende) puindeeltjes in een aantal monsters.

De recovery dient bij voorkeur tussen 75 en 125% te liggen. Dit is het geval voor de standaard referentiemonsters (NIST 2710a en BGS 102) die zijn meegenomen in onderhavig onderzoek (zie §2.3), maar niet voor alle bodemmonsters uit de provincie Utrecht. In Bijlage E is te zien dat de gemiddelde recovery per bodemmonster varieert tussen 46 en 212% met een gemiddelde van 86% voor alle bodemmonsters. Volgens BGS worden de lage recovery's (< 75%) veroorzaakt door de grote hoeveelheid grove puindeeltjes in de monsters. Omdat het technisch gezien niet mogelijk was om de pellets te malen en homogeniseren, door de geringe massa van de pellets, was de ontsluiting van de pellets niet altijd volledig. Dit heeft met name geresulteerd in een onvolledige ontsluiting van de bodemmonsters met veel puindeeltjes. Voor toekomstig onderzoek is het beter om de pellets niet nat-chemisch te analyseren (chemische ontsluiting gevolgd door ICP analyse), maar met een handheld XRF.

In tabel 2 zijn de statistieken (aantal, minimum, maximum, gemiddelde, mediaan (P50) en P80) van de relatieve orale biobeschikbaarheden weergegeven voor alle bodemmonsters en voor de bodemmonsters met een recovery tussen 75% en 125%. Zowel de monsters met een gemiddelde recovery (van de duplo bepalingen), als de monsters waarvan één van de twee bepalingen (simplo) aan de recovery voorwaarde voldeed, zijn meegenomen.

Tabel 2. Statistieken (aantal, minimum, maximum, gemiddelde, mediaan (P50) en P80) van de relatieve orale biobeschikbaarheid van Pb in bodemmonsters van stedelijke ophooglagen en toemaakdekken binnen de provincie Utrecht.

Statistiek	**Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ (%)**	
	Alle bodemmonsters	**Bodemmonsters met recovery tussen 75 en 125%**
Aantal (n)	19	14
Minimum	13	13
Maximum	78	78
Gemiddelde	50	54
Mediaan (P50)	50	54
80-percentiel (P80)	65	66

In Tabel 2 is te zien dat Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$, op basis van alle onderzochte bodemmonsters, varieert tussen 13 en 78% met een gemiddelde en mediaan van 50%. De P80 waarde is 65%. De Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$, op basis van de bodemmonsters met een recovery tussen 75 en 125%, varieert tussen 13 en 78% met een gemiddelde en mediaan van 54% (tabel 2). De P80 waarde is 66%. De verschillen in relatieve orale biobeschikbaarheid, tussen alle bodemmonsters en de bodemmonsters met een recovery tussen 75 en 125%, zijn gering (tabel 2).

Op basis van:

1) de geringe verschillen tussen de statistieken waarbij alle monsters zijn meegenomen en alleen de monsters met recovery's tussen 75 en 125% en
2) de sterke aanwijzing dat de lage recovery's zijn veroorzaakt door de slechte oplosbaarheid van de pellet, door de aanwezigheid van een grote hoeveelheid grove puindeeltjes,

is besloten om in onderhavig onderzoek alle bodemmonsters mee te nemen in de nadere analyse en discussie.

De waargenomen spreiding in de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood van 13 tot 78% in onderhavig onderzoek, komt goed overeen met de spreiding van 1 tot 75% zoals gerapporteerd in het onderzoek van 5.1, 2, e (2014), met uitzondering van de loodbronnen loden kogels (schietterreinen) en loodhoudende accu´s (accu herstellocaties). 5.1, 2, e *et al.* (2008) en 5.1, 2, e (2014) hebben ook bodemmonsters uit De Ronde Venen onderzocht. De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in De Ronde Venen (n=14) varieerde van 16 tot 37%. In onderhavig onderzoek varieerden de waarden in De Ronde Venen (n=5) van 29 tot 43%. Hierbij wordt opgemerkt dat het organisch stofgehalte, in de door 5.1, 2, e *et al.* (2008) en 5.1, 2, e (2014) onderzochte bodemmonsters uit De Ronde Venen, hoger was dan in onderhavig onderzoek: 20,3 – 39,5% met een gemiddelde van 32,6% versus 8,8 - 25,0% met een gemiddelde van 15,9%. Volgens 5.1, 2, e *et al.* (2006) hebben bodemmonsters met een organisch stofgehalte > 20% gemiddeld gezien een lagere biobeschikbaarheid dan bodemmonsters met een organisch stofgehalte < 20%. Dit verklaart mogelijk de iets hogere relatieve orale biobeschikbaarheid in de bodemmonsters uit De Ronde Venen in onderhavig onderzoek (in vergelijking met de bodemmonsters uit De Ronde Venen in 5.1, 2, e *et al.* (2008) en 5.1, 2, e (2014)). Desalniettemin komen de waardes voor De Ronde Venen in beide onderzoeken sterk met elkaar overeen.

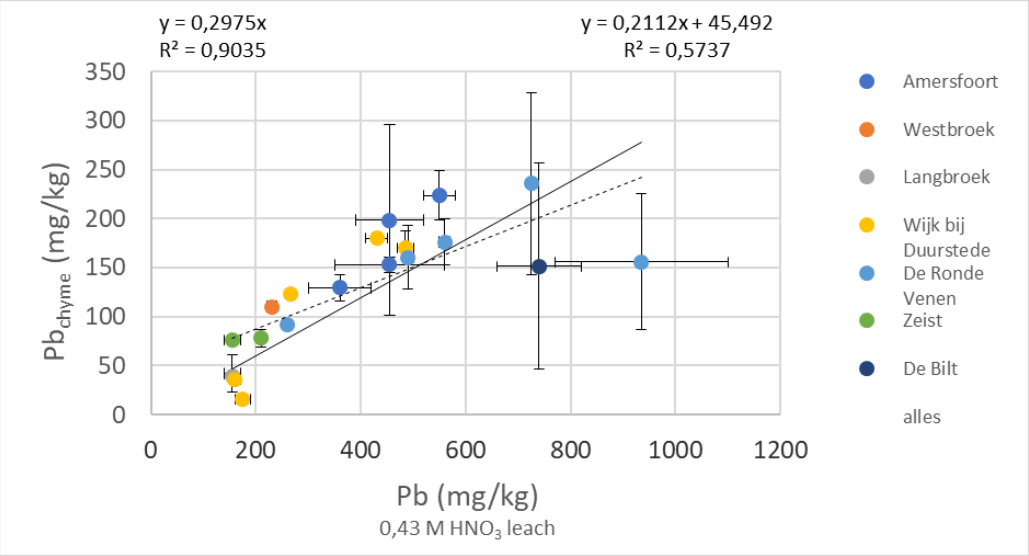
5.1, 2, e *et al.* (2008) en 5.1, 2, e (2014) hebben ook de orale biobeschikbaarheid van bodemmonsters uit Wijk bij Duurstede bepaald met het RIVM IVD model. Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ in deze monsters varieert van 1 tot 75% (n=8). Het betreft echter niet alleen bodemmonsters van toemaakdekken en stedelijke ophooglagen, maar ook van een historische stortplaats en van een locatie waar sprake is geweest van alleen atmosferische looddepositie. Indien deze twee locaties buiten beschouwing worden gelaten dan varieert Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ van 1 tot 10% (n=6). Deze waardes zijn allen lager dan de Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes gemeten in onderhavig onderzoek. De laagste Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waarde in het onderhavige onderzoek is 13%. Het betreft wel een bodemmonster uit Wijk bij Duurstede (Bijlage D: monster WbD 01-A). Mogelijk worden de lage Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes bepaald door de ouderdom van de bodemverontreinigingen. Enkele bodemmonsters uit Wijk bij Duurstede waren al verontreinigd met lood in De Middeleeuwen (tussen 500 en 1000 A.D.). Naarmate (antropogeen) lood langer in de bodem aanwezig is, zullen de makkelijk oplosbare loodverbindingen zijn uitgespoeld of omgezet naar stabielere, minder oplosbare, secundaire loodverbindingen. Dit resulteert in een lagere orale biobeschikbaarheid van lood 5.1, 2, e 2014).

In onderhavig onderzoek zijn de laagste relatieve orale biobeschikbaarheden voor lood gemeten in De 5.1, 2, e Venen (29 – 43%) en de hoogste in Amersfoort (53 – 78%). In Wijk bij Duurstede liggen de waardes, met uitzondering van WBD 01-A (13%), hier tussenin (48 – 62%). Mogelijk worden de verschillen verklaard door het type loodbron, de ouderdom van de verontreiniging en de bodemkarakteristieken. In §3.4 wordt nader ingegaan op de mogelijke relatie tussen bodemkarakteristieken en orale biobeschikbaarheid van lood.

3.3 HNO_3 extractie als een indicator voor het loodgehalte in het chyme (RIVM IVD model)

5.1, 2, e *et al.* (2014) hebben onderzocht of het mogelijk is om met een 0,43 M HNO_3 leach, de orale biobeschikbaarheid van lood te bepalen. De resultaten van de 0,43 M HNO_3 leach kwamen goed overeen met de *in-vivo* meetresultaten 5.1, 2, e *et al.,* 2014). Hierbij wordt opgemerkt dat de validaties slechts waren gebaseerd op zes bodemmonsters.

In onderhavig onderzoek is onderzocht of de resultaten van een 0,43 M HNO_3 leach overeenkomen met Pb_{chyme}, zoals bepaald met het RIVM IVD model. In figuur 4 zijn de loodgehaltes zoals bepaald met de HNO_3 leach uitgezet tegen Pb_{chyme} zoals bepaald met het RIVM IVD model.



Figuur 4. Pb_{chyme} (mg/kg) versus Pb (mg/kg) bepaald in een 0,43 M HNO_3 leach van de bodemmonsters van stedelijke ophooglagen en toemaakdekken binnen de provincie Utrecht. De foutbalken geven de absolute verschillen tussen de duplo- en/of triplobepalingen per bodemmonster weer.

In figuur 4 is een correlatie te zien tussen het loodgehalte van de bodemmonsters, bepaald in een 0,43 M HNO_3 extract, en het loodgehalte in het chyme van het RIVM IVD model. De correlatie coëfficiënt (R^2) is ~ 0,57 als niet wordt gefit door de oorsprong en ~ 0,90 als wel wordt gefit door de oorsprong. Een aantal monsters (DRV 01-B en BLT 01-A) wijkt sterk af van de correlatielijn. Dit wordt deels veroorzaakt door de heterogeniteit van de monsters (door de aanwezigheid van puindeeltjes). Gezien de waargenomen verschillen tussen de meetresultaten van het RIVM IVD model en de HNO_3 leach (in enkele monsters), is de HNO_3 leach geen geschikte alternatieve methode voor het bepalen van de orale biobeschikbaarheid van lood in bodems.

3.4 Correlaties tussen bodemkarakteristieken en de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood (Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$)

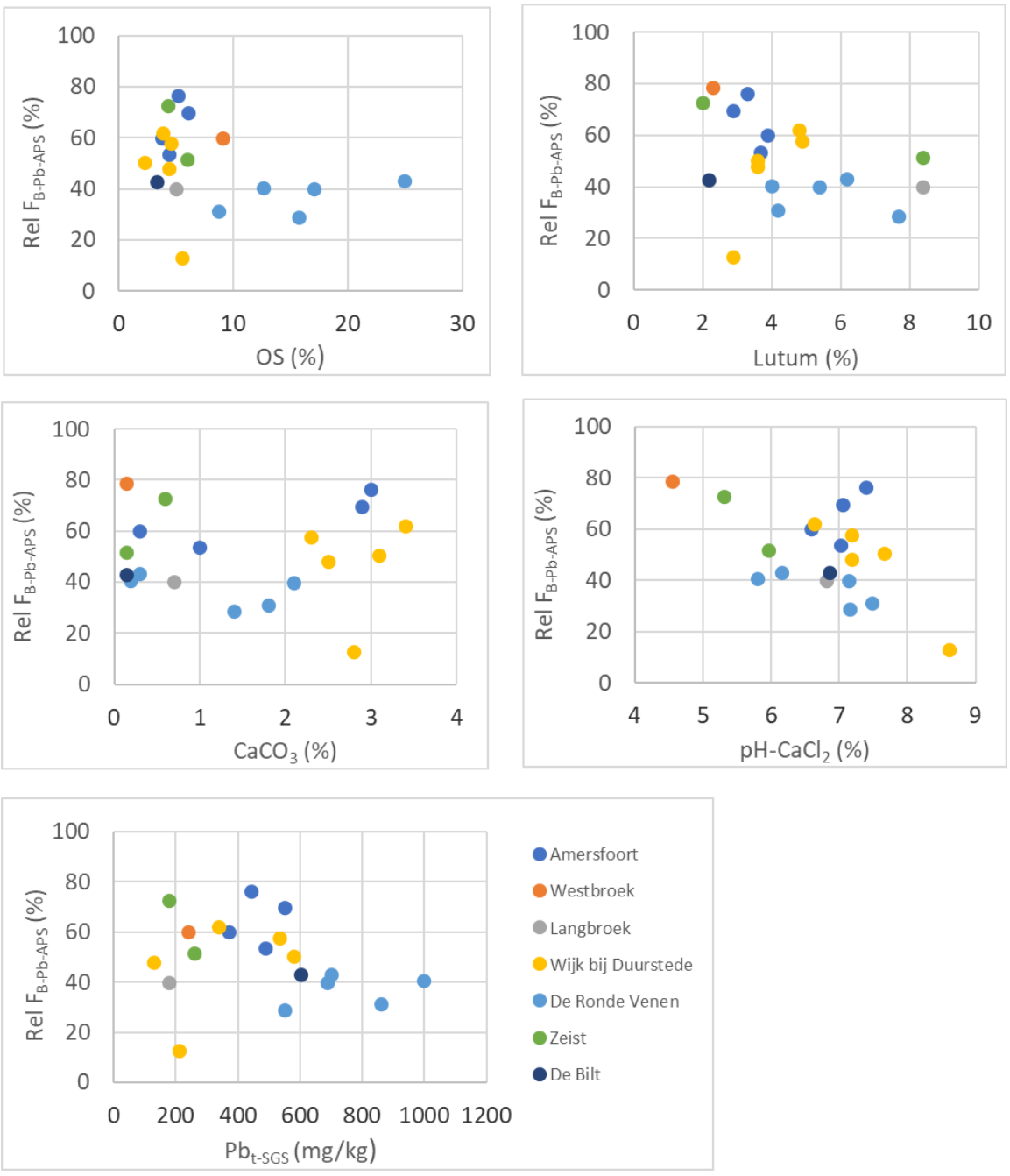
Diverse onderzoekers, waaronder 5.1, 2, e *et al* (2006) en 5.1, 2, e (2014), hebben aangetoond dat de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood afhankelijk kan zijn van bodemkarakteristieken, zoals organisch stof-, lutum- en calciumcarbonaatgehalte en bodem pH.

In figuur 5 zijn OS, lutum, $CaCO_3$ en pH-$CaCl_2$ uitgezet tegen Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$). In figuur 5 zijn geen hele sterke correlaties te zien tussen Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ en de bodemkarakteristieken. De volgende relaties vallen het meeste op:

1. Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ lijkt af te nemen met een toenemende pH. Bodemmonster WSB 01-A heeft de laagste pH (Bijlage D: 4,55) en de hoogste Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ (Bijlage D: 78%).

Bodemmonster WSB 01-A heeft de hoogste pH (Bijlage D: 8,62) en de laagste Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ (13%).

2. De Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ lijkt af te nemen met toenemende OS gehaltes. Bodemmonsters uit De Ronde Venen hebben de hoogste OS gehaltes (Bijlage D: 8,8 – 25%) en de laagste Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes (Bijlage D: 29 - 43%).
3. Het patroon Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ en het Pb gehalte lijkt sterk op dat van Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ en het OS gehalte. Dit komt zeer waarschijnlijk omdat de monsters uit De Ronde Venen zowel de hoogste OS gehaltes (Bijlage D: 8,8 – 25%) als de hoogste Pb gehaltes hebben (Bijlage D: 550 – 1000 mg/kg).



Figuur 5. OS, lutum, $CaCO_3$, pH-$CaCl_2$ en $Pb_{t\text{-}SGS}$ gehalte versus Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ in de bodemmonsters van stedelijke ophooglagen en toemaakdekken binnen de provincie Utrecht.

Er lijkt geen relatie te bestaan tussen Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ en de lutum en $CaCO_3$ gehaltes (figuur 5). Omdat Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ van meerdere bodemkarakteristieken afhankelijk lijkt te zijn, is een multiple lineaire regressie analyse (LMRA) uitgevoerd, waarbij onderzocht is of het mogelijk is om de Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waarden te voorspellen op basis van Pb, lutum, OS, $CaCO_3$ en pH-$CaCl_2$. In tabel 3 zijn de LMRA resultaten samengevat, zowel voor

1) Pb, OS, $CaCO_3$ en pH-$CaCl_2$
2) OS, $CaCO_3$ en pH-$CaCl_2$

Het lutumgehalte blijkt geen voorspellende bodemkarakteristiek te zijn voor de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood. De andere bodemkarakteristieken – Pb gehalte, OS gehalte, $CaCO_3$ gehalte en pH-$CaCl_2$ – lijken in min of meerdere mate de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood te voorspellen. In tabel 3 is te zien dat een significante correlatie is waargenomen voor Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ en het OS gehalte, het $CaCO_3$ gehalte en pH-$CaCl_2$. Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ blijkt af te nemen met een toenemend OS gehalte en een toenemende pH, en toe te nemen met een toenemend $CaCO_3$ gehalte. Voor het Pb gehalte is geen significante correlatie ($P>0.05$) waargenomen met Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$. De verschillen in de MLRA resultaten waarbij het Pb gehalte wel en niet is meegenomen, zijn zeer gering. Dit duidt op een beperkende voorspellende factor van het Pb gehalte.

Het is opmerkelijk dat het $CaCO_3$ gehalte en de pH een tegengesteld effect hebben op de relatieve orale biobeschikbaarheid voor lood. Over het algemeen hebben bodems met een laag $CaCO_3$ gehalte een lage pH en omgekeerd. Dit is ook het geval voor de bodemmonsters uit onderhavig onderzoek. De relatie tussen het $CaCO_3$ gehalte en de bodem pH, in de 19 onderzochte bodemmonsters, is pH-$CaCl_2$ = 0,52 ×$CaCO_3$ + 5,984 (R^2 =0,46). Mogelijk wordt de tegengestelde voorspellende waarde van de pH en $CaCO_3$ veroorzaakt door het geringe aantal waarnemingen in dit onderzoek (n=19) en de beperkte variatie in $CaCO_3$ gehaltes (<0,2 – 3,4%). De spreiding in de bodem pH is wel groter (4,55 – 8,62).

Tabel 3. MLRA resultaten (a, d, c, d, ε en P-waardes). Significante correlaties ($P<0.05$) zijn aangeduid met ###.

Rel F	**a: $CaCO_3$**	**b: pH**	**c: log(OS)**	**d: log(Pbt-SGS)**	**ε**
RIVM IVD Met Pbt-SGS	8,9536 ($P<0.05$) ###	-20,7400 ($P<0.05$) ###	-27,7056 ($P<0.05$) ###	10,4752 ($P=0.35$)	172,0315 ($P<0.05$) ###
log(IVD)	8,7695 ($P<0.05$) ###	-19,8837 ($P<0.05$) ###	-23,3829 ($P<0.05$) ###	-	190,3730 ($P<0.05$) ###

Een mogelijke verklaring voor de negatieve correlatie tussen de bodem pH en de relatieve orale beschikbaarheid van lood is het zuur bufferende vermogen van bodems met een hogere pH. Als de pH van het chyme (gedeeltelijk) wordt gebufferd door de bodem pH, lost er relatief minder lood op. Dit resulteert in lagere Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes.

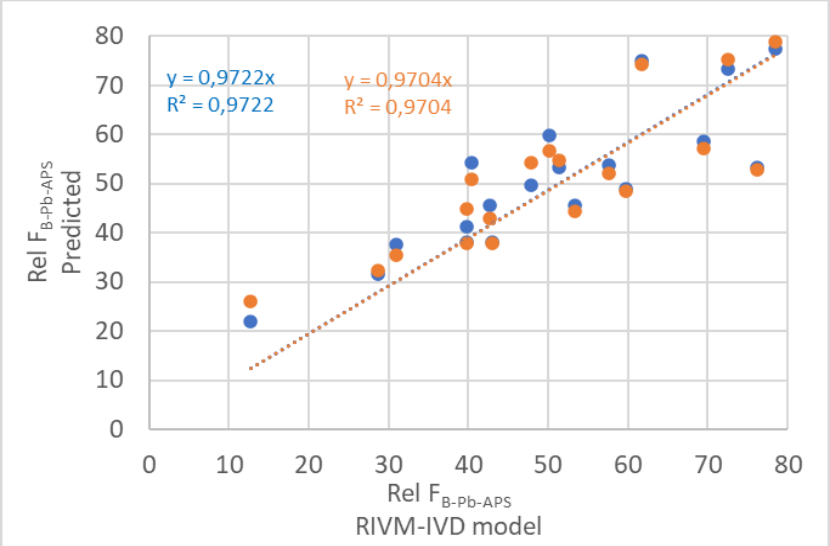
De negatieve correlatie tussen het OS gehalte en de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood is ook waargenomen door 5.1, 2, e (2014). Een mogelijke verklaring voor de waargenomen negatieve correlatie is de sterke binding van lood aan organisch materiaal.

Lood dat oplost uit de primaire antropogene looddeeltjes, bindt zich aan het organische materiaal en vormt stabielere secondaire loodfasen, zoals loodsulfide. Deze organisch materiaal gerelateerde secondaire loodfasen lossen relatief slecht op in de chyme.

Nader onderzoek – met bodemmonsters met een grotere spreiding in $CaCO_3$ gehaltes - is gewenst om vast te stellen waarom (en of nog steeds) bij toenemende $CaCO_3$ gehaltes de Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes toenemen.

In figuur 6 zijn de gemeten Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes uitgezet tegen de voorspelde Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes op basis van de MLRA resultaten.

In figuur 6 is te zien dat Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ redelijk goed voorspeld kan worden op basis van de gemeten 1) Pb, $CaCO_3$ en OS gehaltes en pH-$CaCl_2$ (R^2=0,97) en 2) $CaCO_3$ en OS gehaltes en pH-$CaCl_2$ (R^2=0,97). In figuur 6 is te zien dat de voorspellende waarde van het Pb gehalte zeer gering is. Hierbij wordt opgemerkt dat de MLRA is uitgevoerd op een zeer beperkte dataset en dat de resultaten (nog) niet gevalideerd zijn met onafhankelijke bodemmonsters uit de provincie Utrecht (bodemmonsters die niet zijn meegenomen in de MLRA). Aanvullend onderzoek kan meer inzicht geven in de relatie tussen de orale biobeschikbaarheid van lood en de bodemkarakteristieken.



Figuur 6. De met het RIVM IVD model gemeten Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes versus de voorspelde Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes op basis van de MLRA resultaten (● alle parameters; ● zonder $Pb_{t\text{-}SGS}$).

3.5 De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in bodems van stedelijke ophooglagen en toemaakdekken binnen de provincie Utrecht

Behalve in onderhavig onderzoek, hebben 5.1, 2, e *et al*. (2008) en 5.1, 2, e (2014) ook de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in bodems binnen de provincie Utrecht bepaald. In alle 3 de onderzoeken is de dezelfde IVD methode gebruikt (met een inweeg van 0,6 gram). In Tabel 3 zijn de Pb en OS gehaltes en de Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ waardes weergegeven voor bodems binnen de provincie Utrecht, afkomstig van stedelijke ophooglagen en toemaakdek (n=30).

Tabel 3. Pb en OS gehaltes, en de relatieve orale biobeschikbaarheid (Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$) van lood in bodems van stedelijke ophooglagen en toemaakdek binnen de provincie Utrecht.

Locatie	**Monster-naam**	**Pb (mg/kg)**	**OS (mg/kg)**	**Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ (%)**	**Referentie**
De Ronde Venen	PU 6	1452	32,0	36[#1]	5.1, 2, e *et al.* (2008) en Walra-5.1, 2, e (2004)
De Ronde Venen	PU 7	1014	33,9	26[#1]	
De Ronde Venen	PU 8	648	37,8	20[#1]	
De Ronde Venen	PU 9	918	34,4	20[#1]	
De Ronde Venen	PU 10	744	30,0	18[#1]	
De Ronde Venen	PU 11	595	20,3	35[#1]	
De Ronde Venen	DRV 03-A	700	25,0	43	Onderhavig onderzoek
De Ronde Venen	DRV 01-B	860	8,8	31	
De Ronde Venen	DRV 02-A	690	17,1	40	
De Ronde Venen	DRV 04-A	550	15,8	29	
De Ronde Venen	DRV 05-B	1000	12,7	40	
Wijk bij Duurstede	WbD 01-A	210	5,6	13	
Wijk bij Duurstede	WbD 02-A	130	4,4	48	
Wijk bij Duurstede	WbD 03-A	535	4,6	58	
Wijk bij Duurstede	WbD 04-B	580	2,3	50	
Wijk bij Duurstede	WbD 05-B	340	3,9	62	
Wijk bij Duurstede	PU 5	1006	6,9	14	5.1, 2, e (2004)
Wijk bij Duurstede	WIJK 297	194	6,7	10	
Wijk bij Duurstede	WIJK 298	129	5,2	3	
Wijk bij Duurstede	WIJK 317	416	5,3	3	
Wijk bij Duurstede	WIJK 312	222	4,9	1	
Amersfoort	AMS 01-A	370	3,8	60	Onderhavig onderzoek
Amersfoort	AMS 02-A	490	4,4	53	
Amersfoort	AMS 03-A	445	5,2	76	
Amersfoort	AMS 03-B	550	6,1	70	
Westbroek	WSB 01-A	240	9,1	78	
Langbroek	LNB 01-B	180	5,0	40	
Zeist	ZST 01-B	260	6,0	51	
Zeist	ZST 02-B	180	4,3	73	
De Bilt	BLT 01-A	605	3,4	43	

[#1] Gemiddelde van de meetresultaten van 5.1, 2, e *et al.* (2008) en 5.1, 2, e (2004)

De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood (Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$) in bodems van stedelijke ophooglagen en toemaakdekken in de provincie Utrecht, op basis van alle beschikbare data (tabel 3), varieert van 1 tot 78% (n=19). De P50 en P80 waardes zijn respectievelijk 40 en 58%. In plaats van de landelijke default rel F waarde van 74% (P80), kan voor bodems van stedelijke ophooglagen en toemaakdekken binnen de provincie Utrecht een default rel F waarde van 58% (P80) worden gehanteerd.

Gezien de substantiële hoeveelheid beschikbare data voor De Ronde Venen en Wijk bij Duurstede, kunnen hier gebiedsspecifieke rel F waardes worden gehanteerd.

De rel F waardes in bodems in De Ronde Venen, afkomstig van toemaakdek, variëren van 18 tot 43% (n=11). De P50 en P80 waardes zijn respectievelijk 31 en 40%. Voor De Ronde Venen kan een locatie specifieke rel F waarde van 40% (P80) worden gehanteerd. Het RIVM maakt nog onderscheid tussen bodems met een OS percentage <20% en >20%. Indien hier rekening mee wordt gehouden, is de P80 waarde voor bodems met en OS percentage <20% en >20% binnen De Ronde Venen respectievelijk 40% en 36%

De rel F waardes in bodems in Wijk bij Duurstede, afkomstig van (Middeleeuwse) stedelijke ophooglagen, variëren van 1 tot 62% (n=10). De P50 en P80 waardes zijn respectievelijk 14 en 52%. Voor Wijk bij Duurstede kan een locatie specifieke rel F waarde van 52% (P80) worden gehanteerd.

Het is natuurlijk ook mogelijk om voor iedere afzonderlijke onderzoekslocatie – per particuliere tuin, moestuin, kinderspeelplaats, etc. – de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in de bodem te bepalen middels het RIVM IVD model. Binnen de provincie Utrecht varieert dit, voor bodems van stedelijke ophooglagen of toemaakdek, tussen 1 en 78% (tabel 3). Hierbij wordt opgemerkt dat blootstelling veelal niet plaatsvindt op één specifieke locatie, maar op diverse locaties.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Rel F waardes binnen de provincie Utrecht

- De relatieve orale biobeschikbaarheid van lood (Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$) in bodems binnen de provincie Utrecht, afkomstig van stedelijke ophooglagen en toemaakdek, varieert tussen 1 en 78% (n=30). De P50 en P80 waardes zijn respectievelijk 43 en 58%. Binnen de provincie Utrecht kan voor stedelijke ophooglagen en toemaakdekken een default rel F waarde van 58% (P80) worden gehanteerd. Ter vergelijking: de landelijk vastgestelde default waarde is 74%.
- Voor stedelijke ophooglagen en toemaakdekken in de De Ronde Venen en Wijk bij Duurstede kunnen gebiedsspecifieke rel F waardes worden gehanteerd.
  - Voor De Ronde Venen is de rel F waarde 40% (P80). Als onderscheid wordt gemaakt in OS gehaltes <20% en >20% dan zijn de rel F waardes respectievelijk 40% en 36% (P80).
  - Voor Wijk bij Duurstede is de rel F waarde 52% (P80).
- Het is ook mogelijk om voor iedere afzonderlijke onderzoekslocatie – per particuliere tuin, moestuin, kinderspeelplaats, etc. – de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in de bodem te bepalen middels het RIVM IVD model.

De relatie tussen rel F en bodemkarakteristieken

- Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ voor bodems in de provincie Utrecht lijkt afhankelijk te zijn van het OS gehalte, het $CaCO_3$ gehalte en de pH-$CaCl_2$.
  - Rel FB-Pb-APS is negatief gecorreleerd met pH-CaCl2. Mogelijk speelt het zuur bufferende vermogen van de bodem hierin een rol. Als de pH van chyme (gedeeltelijk) wordt gebufferd door de bodem pH, lost er relatief minder lood op. Dit resulteert in lagere Rel FB-Pb-APS waardes.
  - Rel FB-Pb-APS is negatief gecorreleerd met OS gehaltes. Mogelijk speelt de sterke binding van lood aan organisch materiaal hierin een rol. Lood dat oplost uit de primaire antropogene looddeeltjes, bindt zich aan het organische materiaal en vormt stabielere secondaire loodfasen, zoals loodsulfide. Deze organisch materiaal gerelateerde secondaire loodfasen lossen relatief slecht op in chyme.
  - Rel FB-Pb-APS is positief gecorreleerd met $CaCO_3$ gehaltes. De reden hiervoor is vooralsnog onbekend.
- Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ kan redelijk goed worden voorspeld op basis van het OS gehalte, het $CaCO_3$ gehalte en pH-$CaCl_2$. R^2 is 0,97 (gefit door de oorsprong). Dit is vooralsnog gebaseerd op een beperkte dataset, die niet is gevalideerd met onafhankelijke monsters.
- Momenteel wordt in de praktische uitvoering alleen in De Ronde Venen (toemaakdekken) gebruik gemaakt van de relatie tussen het OS gehalte en Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen OS gehaltes < 20% en > 20%. Mogelijkerwijs zou dit ook kunnen worden uitgebreid met het $CaCO_3$ gehalte en de pH-$CaCl_2$. Dit is in onderhavig onderzoek echter niet nader onderzocht.

HNO_3 leach als voorspeller voor het Pb_{chyme} gehalte

- Hoewel er een correlatie is waargenomen tussen de Pb gehaltes gemeten in het chyme van het RIVM IVD model en de Pb gehaltes in de HNO_3 leach, komen de meetresultaten van een aantal monsters niet goed overeen. Dit wordt (deels) veroorzaakt door de heterogeniteit van deze bodemmonsters. Door de monsters in duplo en/of in triplo te meten wordt dit deels ondervangen. Dit is echter onvoldoende om de HNO_3 leach als alternatief voor het IVD model in te zetten om de biobeschikbaarheid van lood in bodems te bepalen.

4.2 Aanbevelingen

- Indien Provincie Utrecht voornemens is om van additionele bodemmonsters de relatieve orale biobeschikbaarheid te bepalen, dan wordt aangeraden om van deze monsters ook de bodemkarakteristieken te bepalen. Het is met name voor $CaCO_3$ interessant om te bepalen of de positieve correlatie met Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ stand houdt bij een breder bereik van de $CaCO_3$ gehaltes.
- Als Provincie Utrecht interesse heeft in nader onderzoek naar de 0,43 M HNO_3 leach als snelle methode voor het bepalen (schatten) van Pb_{chyme}, dan is het raadzaam om deze bepaling minimaal in duplo uit te voeren (net als geldt voor het RIVM IVD model).
- De recovery van de standaard referentiematerialen voldeed aan de eis voor de terugvinding van 75 tot 125%. Dit was niet het geval voor alle bodemmonsters. Door de aanwezigheid van een groot percentage grove (loodhoudende)puindeeltjes in de monsters en de geringe massa van de pellets (malen was niet mogelijk) was het niet mogelijk om de monsters volledig te ontsluiten. Er wordt aangeraden om de pellets niet nat-chemisch te analyseren op lood, maar om dit met een (handheld) XRF te doen.
- Dit is een onderzoeksrapport. Voor de vertaalslag naar de praktijk wordt aangeraden om een beleidsnotitie op te stellen.
- Een GIS-kaart maken van de provincie Utrecht waarop de stedelijke ophooglagen en toemaakdekken zijn aangegeven met aanduiding van de rel F waardes die daarvoor gelden. Deze kaart kan een onderlegger vormen voor de beleidsnotitie en de communicatie daarover. Deze kaart kan desgewenst opgenomen in de BIS-systemen van de omgevingsdiensten/gemeenten.

5 Referenties

Bodemrichtlijn (2020). https://www.bodemrichtlijn.nl/Begrippenlijst/ophooglaag Laatst geraadpleegd januari 2020.

5.1, 2, e A.T.C. en De Poorte, J. (1999). Risico's van bodemverontreinigingen in toemaakdek in de gemeente De Ronde Venen. Deel 1: Risico's voor de volksgezondheid en de landbouw. IBN-rapport 454, ISSN: 0928-6888.

5.1, 2, e W.I., Sips, A.J.A.M., Lijzen, J.P.A. en 5.1, 2, e A.G. (2007). Richtlijn: bepalen van de orale biobeschikbaarheid van lood in de bodem. RIVM rapport 711701060/2007.

5.1, 2, e W.I., Lijzen J.P.A., Sips A.J.A.M. and 5.1, 2, e A.G. (2008) The bioaccessibility and relative bioavailability of lead from soils for fasted and fed conditions: Derivation of the "average physiological state" correction factor. RIVM letter report 711701080, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, the Netherlands.

5.1, 2, e A.G., Brandon E.F.A., Swartjes F.A. and Sips A.J.A.M. (2006). How can information on oral bioavailability improve human health risk assessment for lead-contaminated soils? Implementation and scientific basis. RIVM Report no. 711701042, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, the Netherlands.

5.1, 2, e R.F., Pierson, C.T., Crovelli, R.A. (1993). An objective replacement method for censored geochemical data. Math. Geol. 25, 59-80.

5.1, 2, e P.C.E., 5.1, 2, e N., Schuurman, T., 5.1, 2, e R. Havenaar, R., Maathuis, A.J.H., Bouwmeester, H., Kramer, E., Hoogenboom, R., 5.1, 2, e W., *et al.* (2014). Bioavailability of Lead from Dutch Made grounds: A Validation Study*;* RIVM report 607711015.

5.1, 2, e N. (2007). Karakterisatie van lood in toemaakdekken in de Provincie Zuid-Holland. GeoConnect rapport GC 04-2007.

5.1, 2, e N. (2014). Lead in rural and urban soils and sediments in The Netherlands. Background, pollution, sources and mobility. PhD thesis, VU University.

5.1, 2, e N. (2022). Onderzoeksprotocol: Bepalen van de relatieve orale biobeschikbaarheid van lood in de provincie Utrecht: keuzes en afwijkingen t.o.v. de RIVM richtlijn.

Bijlage A. Veldwerkfoto´s



AMS 01-A

Geen foto beschikbaar

AMS 02-A

Geen foto beschikbaar

AMS 03-A en AMS 03-B



WSB 01-A



LNB 01-B



WbD 01-A



WbD 02-A



WbD 03-A



WbD 04-B



WbD 05-B



DRV 01-A



DRV 02-A



DRV 03-A



DRV 04-A



DRV 05-B



ZST 01-B

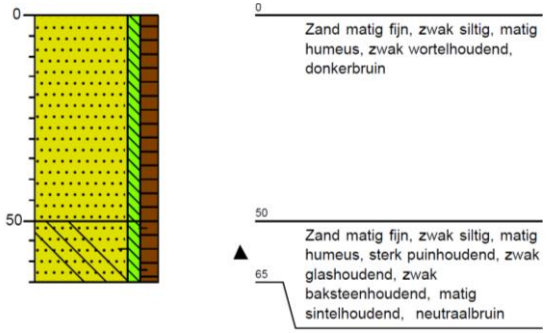


ZST 02-B

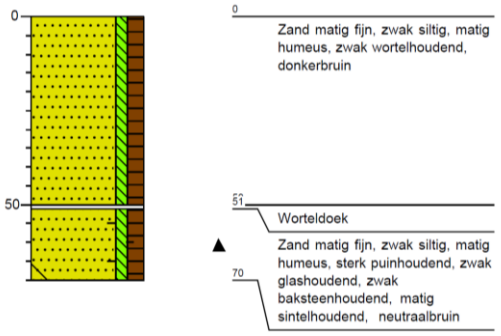


BLT 01-A

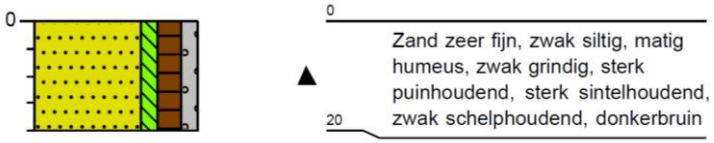
Bijlage B. Boorstaten



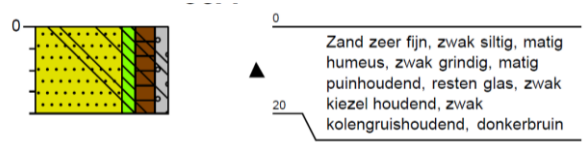
AMS 01-A



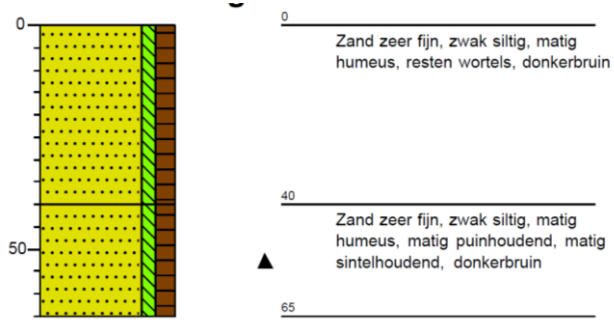
AMS 02-A



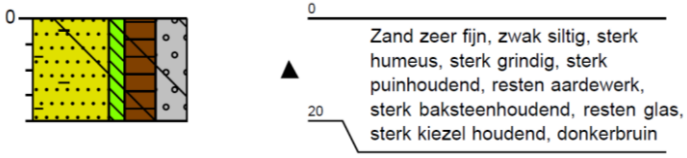
AMS 03-A en AMS 03-B



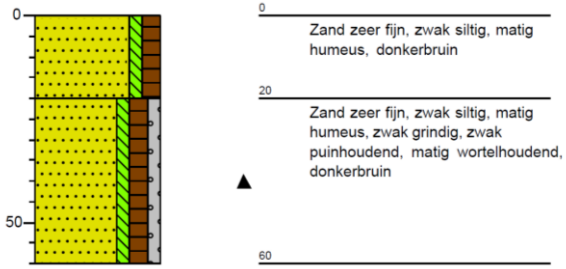
WSB 01-A



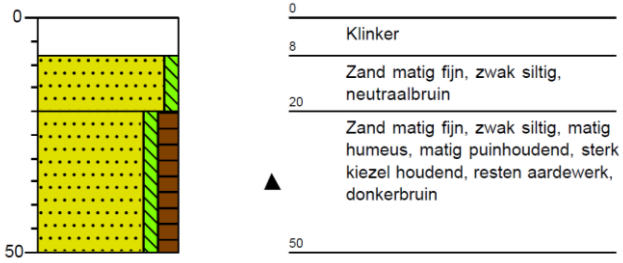
LNB 01-B



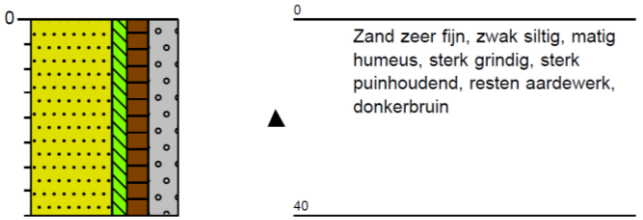
WbD 01-A



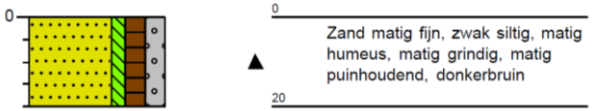
WbD 02-A



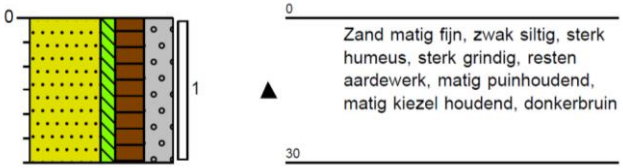
WbD 03-A



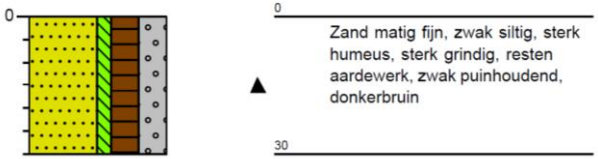
WbD 04-B



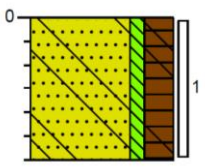
WbD 05-B

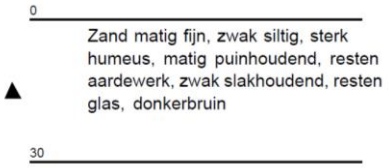


DRV 01-A

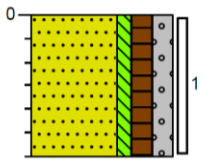


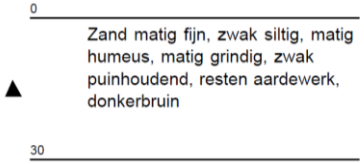
DRV 02-A



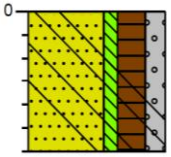


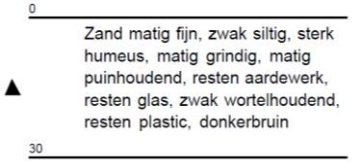
DRV 03-A



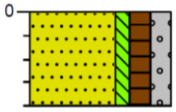


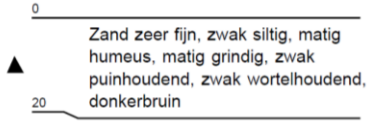
DRV 04-A





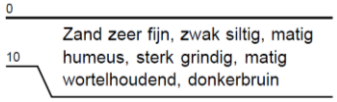
DRV 05-B





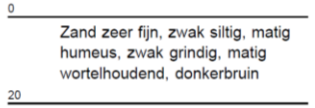
ZST 01-B





ZST 02-B





BLT 01-A

Bijlage C. Handheld XRF analyseresultaten

Monster	Monsterdiepte	Pb (mg/kg)						Pb (mg/kg)					
	cm-mv	n	Min.	Max.	Gem.	RSTD (%)		n	Min.	Max.	Gem.	RSTD (%)	Uitbijters
AMS 01-A	50 - 60	11	284	1064	381	60		10	284	341	313	7	1064
AMS 02-A	50 - 70	13	388	1596	599	54		11	388	565	480	12	900, 1596
AMS 03-A	0 - 20	12	401	677	528	14		11	401	623	515	11	677
AMS 03-B	0 - 20	10	409	609	501	12		10	409	609	501	12	
WSB 01-A	0 - 20	10	231	334	277	11		10	231	334	277	11	
LNB 01-B	40 - 65	11	151	201	174	7		11	151	201	174	7	
WbD 01-A	0 - 20	10	5.1, 2, e	228	206	6		10	5.1, 2, e	228	206	6	
WbD 02-A	20 - 60	10	125	200	151	15		10	125	200	151	15	
WbD 03-A	10 - 50	10	518	598	550	4		10	518	598	550	4	
WbD 04-B	30 - 40	10	516	739	627	12		10	516	739	627	12	
WbD 05-B	0 - 20	10	334	420	383	8		10	334	420	383	8	
DRV 01-B	0 - 30	13	617	1315	874	24		10	617	905	780	14	1088, 1160, 1315
DRV 02-A	0 - 30	10	482	787	645	13		10	482	787	645	13	
DRV 03-A	0 - 30	9	768	951	854	6		9	768	951	854	6	
DRV 04-A	0 - 30	11	268	448	385	12		10	369	448	398	7	268
DRV 05-B	0 - 30	12	965	1750	1089	17		11	965	1124	1029	18	1750
ZST 01-B	0 - 20	11	212	979	323	68		10	212	299	257	10	979
ZST 02-B	0 - 10	10	190	224	212	6		10	190	224	212	6	
BLT 01-A	30 - 50	10	509	850	642	16		9	509	713	619	12	850

AMS = Amersfoort
WSB = Westbroek
LNB = Langbroek
WbD = Wijk bij Duurstede
DRV = De Ronde Venen
ZST = Zeist
BLT = De Bilt

Bijlage D. SGS analyseresultaten aangevuld met enkele BGS analyseresultaten

Monster	$CaCO_3$	OS	Klei	pH	$Pb_{t\text{-}SGS}$	$Pb_{t\text{-}BGS}$	$Pb_{t\text{-}HXRF}$	$Pb_{HNO3\text{-}SGS}$ (mg/kg)			Pb_{chyme}	Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$
	(%)	(%)	(%)	($CaCl_2$)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Meting 1	Meting 2	Meting 3	(mg/kg)	(%)
AMS 01-A	0,3	3,8	3,9	6,59	370	427	313	420	300	-	129	60
AMS 02-A	1	4,4	3,7	7,03	490	540	480	560	350	-	153	53
AMS 03-A	3	5,2	3,3	7,40	445	487	515	520	390	-	199	76
AMS 03-B	2,9	6,1	2,9	7,06	550	573	501	580	520	-	224	70
WSB 01-A	>0,2	9,1	2,3	4,55	240	395	277	240	220	-	110	78
NLB 01-B	0,7	5	8,4	6,81	180	211	174	170	140	-	42	40
WbD 01-A	2,8	5,6	2,9	8,62	210	200	206	190	180	-	16	13
WbD 02-A	2,5	4,4	3,6	7,19	130	138	151	170	150	-	36	48
WbD 03-A	2,3	4,6	4,9	7,19	535	486	550	410	450	-	180	58
WbD 04-B	3,1	2,3	3,6	7,66	580	635	627	500	470	-	171	50
WbD 05-B	3,4	3,9	4,8	6,64	340	343	383	270	260	-	123	62
DRV 01-B	1,8	8,8	4,2	7,48	860	1169	780	1100	2200	770	156	31
DRV 02-A	2,1	17,1	5,4	7,15	$690^{\#1}$	624	645	480	500	-	160	40
DRV 03-A	0,3	25	6,2	6,16	$700^{\#1}$	863	854	570	550	-	176	43
DRV 04-A	1,4	15,8	7,7	7,16	$550^{\#1}$	370	398	250	270	-	92	29
DRV 05-B	0,2	12,7	4	5,80	1000	883	1029	720	730	-	236	40
ZST 01-B	<0,2	6	8,4	5,97	260	418	257	210	210	-	78	51
ZST 02-B	0,6	4,3	2	5,31	180	203	212	140	170	-	77	73
BLT 01-A	<0,2	3,4	2,2	6,86	605	695	619	840	680	700	151	43

SGS = Nederlands laboratorium ($^{\#1}$ heranalyse)
BGS = British Geological Survey
HXRF = handheld Röntgen Fluorescentie
AMS = Amersfoort
WSB = Westbroek
LNB = Langbroek
WbD = Wijk bij Duurstede
DRV = De Ronde Venen
ZST = Zeist
BLT = De Bilt

Bijlage E. Resultaten van het RIVM IVD model uitgevoerd door BGS

Monster	**Pbchyme (mg/kg)**			**Pbchyme**	**Pb_{pellet} (mg/kg)**			**$Pb_{recovery}$ (%)**			**Rel $F_{B\text{-}Pb\text{-}APS}$ (%)**		
	R1	R2	Gemiddeld	RSTD (%)	R1	R2	Gemiddeld	R1	R2	Gemiddeld	R1	R2	Gemiddeld
AMS 01-A	116	143	129	14	140	55,4	98	69	53	61	54	66	60
AMS 02-A	145	161	153	8	455	219	337	122	78	100	51	56	53
AMS 03-A	296	101	199	69	1315	172	743	362	61	212	114	39	76
AMS 03-B	199	249	224	16	120	205	163	58	83	70	62	77	70
WSB 01-A	105	115	110	7	180	185	182	119	125	122	75	82	78
NLB 01-B	61,5	22,6	42	65	76,7	56,2	66	77	44	60	58	21	40
WbD 01-A	16,4	15,0	16	6	176	128	152	91	68	80	13	12	13
WbD 02-A	30,9	41,8	36	21	54,7	63,3	59	66	81	73	41	55	48
WbD 03-A	183	178	180	2	179	159	169	68	63	65	58	57	58
WbD 04-B	188	153	171	14	418	346	382	104	86	95	55	45	50
WbD 05-B	119	127	123	4	190	185	187	91	92	91	60	64	62
DRV 01-B	225	86,6	156	63	854	331	593	126	49	87	45	17	31
DRV 02-A	193	128	160	28	402	293	347	86	61	74	48	32	40
DRV 03-A	152	200	176	19	447	390	419	86	84	85	37	49	43
DRV 04-A	90,7	93,6	92	2	229	175	202	58	49	53	28	29	29
DRV 05-B	143	329	236	56	456	470	463	60	80	70	24	56	40
ZST 01-B	69,2	87,2	78	16	137	107	122	79	75	77	45	57	51
ZST 02-B	72,3	80,7	77	8	5.1, 2, e	91,4	118	120	96	108	69	77	73
BLT 01-A	46,2	257	151	98	142	109	125	31	60	46	13	72	43

R = replicate

$Pb_{recovery} = (Pb_{chyme} + Pb_{pellet})/Pb_{t\text{-}SGS}$

AMS = Amersfoort

WSB = Westbroek

LNB = Langbroek

WbD = Wijk bij Duurstede

DRV = De Ronde Venen

ZST = Zeist

BLT = De Bilt