

Schatting van de bijdrage van achtergronduitspoeling aan de emissie van metalen van bodem naar oppervlaktewater

Aanvulling op WENR-rapport 3139

P.F.A.M. Römken, F.J.E. van der Bolt en L. Renaud



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Schatting van de bijdrage van achtergronduitspoeling aan de emissie van metalen van bodem naar oppervlaktewater

Aanvulling op WENR-rapport 3139

P.F.A.M. Römken, F.J.E. van der Bolt en L. Renaud

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat (VWS).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, juli 2023

Gereviewd door:
Gert-Jan Reinds, Teamleider Duurzaam Bodemgebruik

Akkoord voor publicatie:
Gert-Jan Reinds, Teamleider Duurzaam Bodemgebruik

Rapport 3280
ISSN 1566-7197

P.F.A.M. Römkens, F. van der Bolt en L. Renaud, 2022. *Schatting van de bijdrage van achtergronduitspoeling aan de emissie van metalen van bodem naar oppervlaktewater. Aanvulling op WENR-rapport 3139.* Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3280. 40 blz.; 17 fig.; 7 tab; 7 ref.

Uitspoeling uit de bodem draagt in belangrijke mate bij aan de belasting van het oppervlaktewater met zware metalen in Nederland. In 2022 is een herzien model ontwikkeld om voor veertien metalen een schatting te maken van de uitspoeling uit de bodem naar oppervlaktewater. Daarbij is geen onderscheid gemaakt in uitspoeling van metalen die van nature in de bodem voorkomen (hier verder aangeduid als 'achtergronduitspoeling') en metalen die door menselijk handelen in de bodem terechtgekomen zijn (hier verder aangeduid als 'antropogene uitspoeling'). Het voorliggende rapport beschrijft een methodiek om het onderscheid tussen de antropogeen beïnvloede en achtergronduitspoeling te kunnen maken. Op basis van meetdata van metalen uit de Geochemische Bodematlas en gebruikmakend van bodemeigenschappen (Fe- en Al-oxiden, pH, P) is het model in staat per bodemlaag de verdeling te berekenen tussen de hoeveelheid metalen die van nature voorkomt en de additionele metalen die door menselijk handelen in de bodem terechtgekomen zijn. Deze verhoudingen worden toegepast om voor de bovengrond (0-30 cm) en de ondergrond (GLG -1m) het aandeel van de achtergronduitspoeling en van de antropogene uitspoeling te berekenen op landelijke en regionale schaal. De resultaten zijn op landelijke schaal gepresenteerd als ton/jaar en zijn regionaal gedifferentieerd als concentratie in het uitspoelend water voor zowel de 0-30cm-laag als de laag GLG -1m.

Leaching from soil contributes significantly to the total load of heavy metals in Dutch surface waters. In 2022 the model used to quantify the emission caused by leaching from soil to surface waters was revised and extended to be used for 13 metals and arsenic. This model however was not used to discriminate between leaching of metals from natural origin and those that have entered the soil as a result of anthropogenic activities. In this report we therefore describe a recently developed method that enables us to discriminate between naturally present metals in soil versus those from anthropogenic activities. Used measured data from approx. 350 samples from the Geochemical Soil Atlas from the Netherlands a model and based on soil properties (pH, Fe- and Al-oxide, P) the model is able to calculate the distribution of metals of natural origin versus metals added to soil due to anthropogenic activities. This distribution is used to calculate the contribution of what is called background leaching and leaching of metals from anthropogenic origin; both for the topsoil (0 – 30 cm) and the subsoil at a depth equal to 1 m below the average lowest groundwater level (GLG -1m). Data are presented in ton/year at national level and at regional level based on concentration in the percolating water from both the 0-30 layer and at a depth equal to 1 meter below the mean lowest groundwater level solution (GLG -1m).

Trefwoorden: zware metalen, achtergronduitspoeling, grondwater, oppervlaktewater, emissie achtergrondgehalten.

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/633634> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2023 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research.
Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- 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.

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



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Inhoud

Verantwoording	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Methode	13
2.1 Aanpak algemeen	13
2.2 Aanpassen schematisering bodem	14
2.3 Invloed van aan- en afvoerposten op de uitspoeling van metalen	15
2.4 Berekenen emissie metalen op basis van achtergrondgehalten	15
3 Resultaten	17
3.1 Aandeel achtergrondgehalte zware metalen bovengrond	17
3.2 Metaalconcentraties in het bodemwater in de 0-30cm-laag en op het grensvlak (GLG -1m)	18
3.3 Aandeel van de achtergrondbelasting in de totale emissie naar oppervlaktewater: landelijke data	27
3.4 Regionale verdeling van de achtergrond en antropogene belasting van oppervlaktewater	31
4 Conclusies en aanbevelingen	35
4.1 Landelijk	35
4.2 Regionaal	36
4.3 Discussie en Aanbevelingen	36
Literatuur	38

Verantwoording

Rapport: 3280

Projectnummer: 5200047764-7

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Teamleider team Duurzaam bodemgebruik

naam: Dr. ir. Gert Jan Reinds

datum: 26 juni 2023

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Dr. ir. Gert Jan Reinds

datum: 26 juni 2023

Samenvatting

Uitspoeling van zware metalen vanuit de bodem naar het grond- en oppervlaktewater kan een belangrijke bijdrage leveren aan de totale belasting van het oppervlaktewater. Dit is relevant, omdat het behalen van kwaliteitsdoelen voor oppervlaktewater alleen gerealiseerd kan worden als het totale pakket van maatregelen afgestemd is op de herkomst van deze stoffen. Emissie uit bijvoorbeeld RWZI's vereist andere maatregelen dan het reguleren van uitspoeling. De emissie uit de bodem is daarbij zowel afhankelijk van de huidige voorraad in de bodem in combinatie met bodemeigenschappen, maar op de lange termijn ook van de aanvoer naar de bodem zelf. Maatregelen om deze emissie te beperken, richten zich daarom zowel op sturing van de aanvoer naar de bodem zelf als op bodem- en waterbeheer. Een complicerende factor daarbij is dat voor zware metalen geldt dat deze, anders dan voor veel andere contaminanten zoals PFAS, deels van natuurlijke oorsprong zijn. De emissie die aan deze fractie van natuurlijke oorsprong zijnde metalen gerelateerd is, kan derhalve ook als natuurlijk beschouwd worden. De vraag die nu voorligt, is in hoeverre de huidige emissie uit de bodem daarom bepaald wordt door de van nature in de bodem voorkomende hoeveelheid metalen dan wel door de metalen die door menselijk handelen in de bodem terechtgekomen zijn.

Tot 2022 maakte het model voor de berekening van de emissie uit de bodem geen onderscheid in metalen van natuurlijke herkomst en metalen die in de bodem voorkomen als gevolg van menselijk handelen. Om dit onderscheid wel te kunnen maken, is daarom in 2022 een model ontwikkeld dat – per bodemlaag die in het rekenmodel onderscheiden wordt – de metalen verdeelt in een deel dat van nature in de betreffende laag voorkomt en een deel dat in de bodem gekomen is door menselijk handelen. In de berekeningen voor de Emissieregistratie die in 2022 gerapporteerd zijn (Bolt en Römkens, 2022), is dit model weliswaar al beschreven en ingebouwd, maar is bij de uitvoer van de resultaten geen onderscheid gemaakt in de natuurlijke en antropogene bijdrage in de uiteindelijke totale emissie van bodem naar oppervlaktewater.

In deze studie is het model uit 2022 gebruikt om het aandeel in de totale emissie te berekenen van metalen van natuurlijke herkomst versus die van antropogene herkomst. Daarbij is een aanvullende berekening uitgevoerd waarbij alleen het achtergrondgehalte van de metalen is meegenomen in de berekening van de emissie. Dit is mogelijk, omdat bij de modelherziening in 2022 een modelstructuur is opgenomen die voor elke laag zowel het achtergrondgehalte aan metalen in de vaste fase berekent als het deel dat door antropogene activiteiten in de bodem zit. Door dit antropogene aandeel in elke bodemlaag op nul te zetten, kan een fictief natuurlijk bodemprofiel – dat alleen achtergrondgehalten voor elke laag bevat – doorgerekend worden. Daarbij maken we onderscheid tussen de berekende concentratie in het bodemwater in de 0-30cm-laag en die in de laag van 30 cm tot GLG -1m. Daarnaast is de totale emissie (landelijk) berekend op basis van het natuurlijke bodemprofiel en vergeleken met de eerder berekende totale emissie.

Om de achtergronduitspoeling te berekenen, is het ook nodig om de verdeling tussen metalen in de vaste fase per bodemlaag te berekenen. Daaruit blijkt dat voor Ba, Cr, Ni, U, As en Co meer dan 65% (voor Co) tot meer dan 80% (voor Ba) van de metalen in de bovengrond op het niveau van het achtergrondgehalte ligt. Voor Zn, Se, Cu, Cd en Pb geldt het omgekeerde en varieert het aandeel van het achtergrondgehalte in de bovengrond van 40% (Zn) tot minder dan 25% (voor Cd en Pb). Deze variabele verdeling voor het aandeel van het achtergrondgehalte en dat van antropogene herkomst, komt overeen met de verwachting op basis van de (historische) emissie van metalen naar bodem en atmosfeer.

Ondanks dit relatief grote aandeel van metalen van antropogene herkomst in de vaste fase van de bodem is de totale bijdrage aan de uiteindelijke emissie naar oppervlaktewater voor de meeste metalen beperkt. Zo is het aandeel van de antropogene metalen aan de emissie voor Cr, Ni, U, Se, As, V, Ba en Co aan de totale emissie naar het oppervlaktewater minder dan 5% en bedraagt het aandeel van de achtergronduitspoeling meer dan 95%. Voor Cu, Pb, Sb en Zn varieert het aandeel van de antropogene emissie tussen 8% en 24%. Voor Mo en Cd is deze antropogene bijdrage zelfs dominant en loopt op tot 44% (Mo) en 65% (Cd).

Voor de meeste metalen (m.u.v. Cd, Sb en Mo) is de bijdrage van de antropogeen bepaalde uitspoeling uit de 0-30cm-laag daarbij groter dan die uit de ondergrond (de laag tussen 30 cm en GLG -1m). Daarbij is vooral de antropogene bijdrage aan de uitspoeling uit de bovengrond van Cu (7.5%), Cd (9.5%) en Zn (16%) relevant als aandeel op de totale emissie. Dit weerspiegelt daarmee de invloed van onder meer het gebruik van dierlijke mest (Cu en Zn) en atmosferische depositie en kunstmest (Cd) op de emissie. Voor de meeste andere metalen is de antropogene bijdrage aan de uitspoeling uit de bovengrond gering en schommelt rond de 1% van de totale emissie. Voor de ondergrond (30 cm-GLG -1m) geldt dat de antropogeen bepaalde emissie groot is voor Cd (55% van de totale emissie) en Mo (43%). In mindere mate is ook de emissie van Sb (10%) en Zn (7.9%) uit de laag van 30 cm tot GLG -1m relevant. Daarbij is wel sprake van een sterke regionale verdeling als het gaat om de bijdrage van de antropogene uitspoeling. Zo is de antropogene emissie voor Ba (15-30% van de totale emissie) en U (5-10%) uitsluitend relevant in het Veenweidegebied (Zuid-Holland en Utrecht), terwijl die voor Cd domineert in het Zuidoostelijke zandgebied. Dit is deels veelal het gevolg van de combinatie van specifieke bodemeigenschappen en historische bronnen.

De resultaten van deze verkennende berekening lijken voor de meeste metalen plausibel, maar moeten desalniettemin met enige voorzichtigheid gebruikt worden. Zeker in het geval van regionale variatie. Zowel het model voor de berekening van de achtergrondgehalten en de daarop gebaseerd antropogene aanrijking als de kaartbeelden van de totale gehalten is voor een aantal metalen gebaseerd op een beperkt aantal meetpunten. Dat geldt in hoge mate voor Co, maar ook voor Sb en Mo.

Daarnaast is op dit moment geen validatie mogelijk van de berekende gehalten in de tussenliggende bodemlagen (tussen 30 cm en de laag van 80-120 cm) en de daarop gebaseerde verdeling tussen achtergrondgehalten en antropogeen bepaalde metaalgehalten. Deze gehalten zijn modelresultaten en kunnen regionaal afwijken door aanwezigheid van specifieke regionale bronnen of afwijkende moedermaterialen en meer generiek door onzekerheden in de invoerdata. Zo valt bijvoorbeeld het geringe aandeel van de antropogene aanrijking van Zn in de ondergrond van de bodem in de Kempen op. Daar waar deze voor Cd wel duidelijk in de data (en modelberekeningen) voorkomt, ontbreekt deze vrijwel volledig voor Zn.

Indien het model gebruikt gaat worden voor dynamische berekeningen om het effect van maatregelen te berekenen, is het essentieel om voor deze metalen aanvullende data te verzamelen. Dit is van groter belang indien het model of de uitkomsten daarvan op regionale schaal gebruikt worden.

1 Inleiding

Uitspoeling van zware metalen en arseen uit de bodem naar oppervlaktewater levert een bijdrage aan de totale emissie van metalen naar het oppervlaktewater. Onder de totale emissie wordt hier de som van de uitspoeling uit de bodem (tot een diepte van GLG -1m) en die via grondwater bedoeld. Het deel van de uitspoeling dat uit de bodem komt, kan worden onderverdeeld in een deel dat afkomstig is van metalen die van nature in de bodem aanwezig zijn (hier verder aangeduid als 'achtergronduitspoeling') en in een deel afkomstig van metalen die door menselijk handelen aan de bodem zijn toegevoegd (hier verder aangeduid als 'antropogene uitspoeling').

Inzicht in de bijdrage van uitspoeling uit de bodem van de antropogene en achtergronduitspoeling laat zien in welke mate maatregelen effectief kunnen zijn bij het reduceren van de totale vracht van bodem naar water. Voor metalen waarvoor de achtergronduitspoeling dominant is, geldt dat maatregelen om de antropogene bijdrage te reduceren niet effectief hoeven te zijn. Dat suggereert in dat geval ook dat er – regionaal – sprake kan zijn van natuurlijk verhoogde gehalten die niet noodzakelijkerwijs een indicatie van menselijk handelen zijn. Op dit moment is onduidelijk wat de verhouding is tussen de achtergronduitspoeling en de bijdrage van antropogeen beïnvloede uitspoeling.

Voor vrijwel alle metalen geldt namelijk dat zij van nature in de bodem voorkomen als onderdeel van mineralen of organische stof. Regionale verschillen in de hoogte van de achtergronduitspoeling worden vooral bepaald door de natuurlijke variatie in gehalten in bodemvormende mineralen als klei en oxiden, in combinatie met verschillen in bodemeigenschappen als pH en organische stof. Zo bevatten sommige riviersedimenten vaak hogere gehalten aan zink, nikkel of chroom vergeleken met zand- of veenbodems. Ook lokale verschillen in de geochemische omstandigheden hebben invloed op processen als reductie en oxidatie. Dat leidt in kwelgebieden, o.a. aan de randen van de Veluwe, regionaal tot hogere concentraties in bodemvocht en/of grondwater, wat kan leiden tot een grotere achtergronduitspoeling.

Voor die metalen waarvan bekend is dat ze als gevolg van landgebruik aan de bodem zijn toegevoegd, blijkt de verdeling van metalen over het achtergrondgehalte en het antropogeen bepaalde deel inderdaad af te wijken van metalen waarvan het aannemelijk is dat ze niet of in veel lagere hoeveelheden voorkomen in producten als mest, compost of lucht.

Historisch gezien zijn onder meer bemesting met dierlijke mest (Cu en Zn), kunstmest (Cd en in mindere mate U) en atmosferische depositie (Pb, Cd) relevant. Daarnaast is ook aanvoer via verontreinigd rivierslib regionaal van invloed geweest, onder andere in de stroomgebieden van Maas (en zijrivieren als Geul en Roer), Waal en Rijn. Ook voor andere metalen (U, As, Se) zijn deze bronnen relevant, ofschoon er veel minder informatie over is dan voor Cu, Zn of Pb. Door de aanvoer via bemesting, slib of via de lucht zijn de gehalten aan metalen in veel bodems hoger dan ze van nature waren, waarbij deze invloed vooral in de bovengrond zichtbaar is.¹ Voorbeelden van regio specifieke antropogene beïnvloeding van de bodemkwaliteit zijn daarnaast de Kempen, het Veenweidegebied en veel uiterwaarden van rivieren als Maas, Roer en Waal.

In de tot nu toe uitgevoerde berekeningen van de emissie zijn de antropogene en achtergronduitspoeling samengevoegd tot de totale belasting. Het metaalgehalte in de bodem is vastgesteld aan de hand van totaalmetingen in boven- en ondergrond. Daarbij is een methode ontwikkeld om de mate van antropogene aanrijking te schatten en te berekenen voor elke bodemlaag die in het model onderscheiden wordt. Dit is met name nodig om gehalten van metalen in de tussenliggende bodemlagen, d.w.z. de bodemlagen dieper dan 30 cm tot aan de ondergrond (80 cm), te kunnen berekenen.

¹ Voor een deel van de overstromingsgebieden van de (grote) rivieren geldt overigens dat de sedimenten van de laatste twee decennia al meetbaar schoner zijn dan die uit de jaren 70 en 80 van de vorige eeuw.

De resultaten van de berekeningen tonen aan de concentraties metalen in bodemwater regionaal hoog kunnen zijn en deels ook normen, zoals onder andere die voor de KRW, overschrijden. Dit komt overeen met waargenomen overschrijdingen van concentraties in het oppervlaktewater. De vraag die nu voorligt, is of, en zo ja in welke mate, deze verhoogde concentraties bepaald worden door de achtergrondgehalten en/of door de antropogeen beïnvloede gehalten. Als verhoogde concentraties in uitspoelend bodemwater bepaald worden door de variatie in de achtergrondgehalten in de bodem en de lokale bodemcondities (pH, textuur, organische stof), kunnen deze (regionaal) als 'normaal', ofwel als achtergrondconcentratie beschouwd worden.

Indien op basis van de modelberekening aangetoond wordt dat de concentratie in het uitspoelende bodemwater vooral of mede door antropogene uitspoeling bepaald wordt, betekent dit dat deze concentraties deels het gevolg zijn van menselijk handelen en kunnen ze niet als achtergronduitspoeling beschouwd worden. In dat geval zouden maatregelen zoals reductie van aanvoer van metalen of bodemmanagement (zoals sturen van pH of hydrologie) wellicht effectief kunnen zijn om dit antropogeen bepaalde deel van de emissie te verlagen.

Met het model dat is gebruikt voor de Emissieregistratie 1990-2019 (Bolt en Römkens, 2022) wordt de totale uitspoeling van metalen berekend door per bodemlaag op basis van het reactieve metaalgehalte en bodemeigenschappen (pH, organische stof, oxiden en textuur) een concentratie in het poriewater te berekenen. De combinatie met een hydrologisch model resulteert dan, per bodemlaag, in een flux van metalen naar het oppervlaktewater en fluxen naar de naastgelegen bodemlagen.

Het metaalgehalte per onderscheiden bodemlaag is op dit moment opgebouwd uit een deel 'antropogeen' en een deel 'achtergrond'. Om het aandeel van de antropogene belasting aan de totale emissie te kunnen berekenen, moeten de emissies behorende bij de achtergrondgehalten worden berekend. Daartoe moeten de gehalten in de bodem aangepast worden, zodanig dat deze alleen het achtergrondgehalte bevatten. Dat is mogelijk, omdat er voor elk metaal een relatie is afgeleid die op basis van het gehalte aan oxiden en pH een achtergrondgehalte berekent. Omdat in het model deze parameters (oxiden en pH) voor elke laag aanwezig zijn, kan ook voor elke rekenlaag een bijbehorend achtergrondgehalte afgeleid worden. Door alle rekeneenheden op die manier te voorzien van een profiel gebaseerd op achtergrondgehalten, kan op regionale en landelijke schaal de totale achtergronduitspoeling berekend worden. De overige bodemparameters die nodig zijn voor de berekening van de uitspoeling (pH, organische stof, oxiden en textuur) blijven ongewijzigd. Eventuele veranderingen in deze parameters door landgebruik laten we buiten beschouwing.

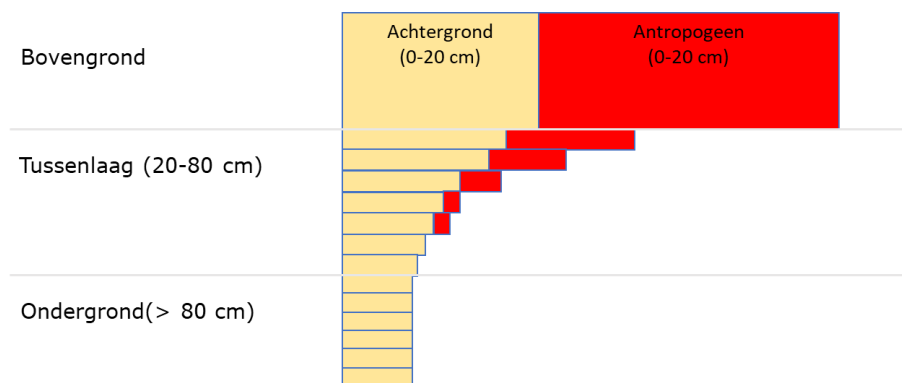
De aldus berekende vracht op basis van achtergrondgehalten kan dan vervolgens – per metaal – vergeleken worden met de totale vracht zoals gerapporteerd in 2022 (Bolt en Römkens, 2022). Dit geeft dan een beeld van het aandeel van de bijdrage van het antropogene deel aan de totale emissie en van de achtergronduitspoeling; de som van beide is dan uiteraard de totale emissie.

Het doel van deze studie is om de bijdrage van de achtergrond- en antropogene uitspoeling aan de totale uitspoeling (vracht) voor de huidige situatie (lees: de huidige gehalten aan metalen in de bodem en huidige bodemparameters) te kwantificeren. Daarbij wordt zowel de concentratie van metalen berekend als het aandeel van achtergrondgehalten en antropogene aanrijking op de vracht. Omdat naar verwachting het grootste deel van de antropogene aanrijking van metalen in de bovengrond (hier 0-30 cm) is opgehoopt, berekenen we naast de concentratie op het grensvlak van bodem en grondwater (GLG -1m) ook de concentraties (achtergrond vs. antropogeen) in de 0-30cm-laag. Juist omdat metalen relatief immobiel zijn, kan de invloed van de antropogene aanrijking op de concentraties in het bodemvocht in de bovengrond groot zijn, terwijl die invloed op de totale vracht klein is omdat er over korte tijdsperiodes (1-10 jaar) gezien weinig of geen transport vanuit de bovengrond naar diepere bodemlagen optreedt. Dat betekent ook dat in gebieden met hoge grondwaterstanden de invloed van de 0-30cm-laag op de emissie naar oppervlaktewater relatief hoog kan zijn, daar waar de kwaliteit van de 0-30cm-laag in gebieden met lagere grondwaterstanden nauwelijks van invloed zal zijn.

2 Methode

2.1 Aanpak algemeen

In 2022 is een update gemaakt voor de berekening van de uitspoeling van veertien metalen uit landbouw- en natuurbodems. Daarbij is op basis van een vernieuwde schematisering van de bodem voor elke rekeneenheid een bodemprofiel opgesteld per onderscheiden (diepte)laag. Per laag is daarin informatie beschikbaar van de metaalgehalten (op basis van 0.43 N HNO₃-gehalten) als bodemeigenschappen (pH, organische stof, klei alsmede Fe, Al en P op basis van een oxalaatextractie). Het metaalgehalte in elke laag is opgebouwd uit een deel achtergrond- en een deel antropogene bijdrage. Dit is voor een fictief bodemprofiel schematisch weergegeven in Figuur 2-1. In de bovengrond (0-20 cm) wordt het antropogene deel berekend als het verschil tussen het gemeten reactieve gehalte (data) en de berekende achtergrondwaarden. De diepte van 20 cm is hierbij gebruikt, omdat dit de bemonsteringsdiepte van de monsters in de Geochemische Atlas is geweest (Mol et al., 2012). In de tussenlagen waarvoor geen data voorhanden zijn, hier weergegeven als de laag tussen 20 en 80 tot cm, wordt het aandeel antropogene aanrijking berekend uit onder meer het gehalte aan oxalaat extraheerbaar fosfaat als indicator voor het gebruik van mest, dat als een van de belangrijkste bronnen van metalen (in Nederland) geldt. Meer informatie over deze berekening en de verdeling van het antropogene gehalte aan metalen in de tussenlagen is opgenomen in Bolt en Römken (2022).



Figuur 2-1 Schematisering van de metaalgehalten in de bodem met de drie stappen waarin de gehalten worden berekend (uit: Bolt en Römken 2022). Noot: in de berekeningen van de gemiddelde concentratie in het bodemwater wordt een laag van 0-30 cm als bovengrond gehanteerd. De data in de Geochemische Bodematlas Nederland (Mol et al., 2012) voor de bovengrond zijn echter gebaseerd op de laag van 0-20 cm zoals in deze figuur weergegeven.

Door het berekende gehalte als gevolg van de antropogene aanrijking in een nieuwe rekenvariant op nul te zetten, kan de emissie berekend worden op basis van het – theoretische – natuurlijke achtergrondgehalte. Dit is een maat voor de te verwachten emissie uit de bodem indien er geen antropogene belasting van de bodem zou zijn opgetreden en die voor de Nederlandse bodem dus als natuurlijk gezien mag worden.

Met behulp van het in 2022 gerapporteerde model wordt deze achtergrondemissie berekend op regionale en landelijke schaal. Daarbij rapporteren we de resultaten in tabel- en kaartvorm, waarbij het aandeel van de achtergronduitspoeling (en antropogeen) als deel van het totaal wordt gepresenteerd. Daarbij hanteren we dezelfde regionale indeling als in Figuur 8-4 (pag. 93 in Bolt en Römken, 2022) en maken we onderscheid tussen de totale emissie en die uit landbouw of natuur (cf. Tabel 8-1). Daarbij maken we ook onderscheid tussen het aandeel achtergronduitspoeling t.o.v. totaal tot een diepte van GLG -1m (bodemuitspoeling) en het aandeel achtergronduitspoeling op basis van de totale emissie (bodem tot GLG -1m én grondwater,

cf. Tabel 8-2). Als uitvoer rapporteren we zowel *de vracht* (in ton/jaar) per eenheid (cf. Figuur 8-4) als *de gemiddelde profiel gewogen concentratie* (cf. Figuur 8-5). Aan de hand van de verschilkaarten (totale emissie – achtergrond) geven we inzicht in de mate waarin het aandeel van de achtergronduitspoeling of het antropogene deel van de uitspoeling regionaal verschilt.

2.2 Aanpassen schematisering bodem

Het huidige gehalte aan metalen per onderscheiden bodemlaag is het totaal van een deel achtergrond- en een deel antropogene bijdrage. In de oorspronkelijke modelberekening van de totale emissie wordt de antropogene bijdrage berekend door een correctie met behulp van het oxalaat extraheerbaar gehalte aan fosfaat en de gemeten aanrijking in de bovengrond (zie Bolt en Römkens, hoofdstuk 6, par 6.6). Voor de berekening van de achtergronduitspoeling wordt de antropogene bijdrage op nul gezet. Per onderscheiden laag gebruiken we in de berekening in deze rapportage een achtergrondgehalte met behulp van de relatie op basis van oxiden en pH. In Tabel 2-1 staan de coëfficiënten voor de berekening van het achtergrondgehalte voor de veertien onderzochte metalen op basis van het gehalte aan Fe- en Al-oxiden en de pH. Het achtergrondgehalte wordt berekend volgens verg. 1.

$$\text{Log}(Q_{\text{met achtergrond}}) = a + b \cdot \log(\text{oxiden}) + c \cdot \text{pH}_{\text{CaCl}_2} \quad [1]$$

Waarin a, b en c de coëfficiënten zijn uit Tabel 2-1. Deze relaties zijn afgeleid van de 100 meetpunten voor de bepaling van de achtergrondwaarden waarbij hier alleen de monsters voor de ondergrond (50-100 cm -mv) zijn gebruikt (Lamé et al., 2004). De schatting van het achtergrondgehalte voor elke laag wordt berekend in mg/kg droge stof. Het gehalte aan oxiden is in mmol/kg en de pH betreft pH-CaCl₂. Voor molybdeen (Mo) en antimoon (Sb) zijn de gevonden relaties niet statistisch significant, maar worden wel toegepast voor de tussenlagen en bovengrond. De berekende gehalten in de bovengrond en tussenlaag voor Mo en Sb zijn dus mogelijk niet betrouwbaar. Dit heeft deels te maken met de zeer lage gehalten aan beide metalen; in meer dan 80% van de monsters lag de meetwaarde onder de detectiegrens. Voor het schematiseren van de metaalgehalten in de diepere ondergrond (lagen dieper dan 80 cm) gebruiken we de meetwaarden van gehalten in de ondergrond uit de Geochemische BodemAtlas (Mol et al., 2012) zoals ook is gedaan in de berekening voor de Emissieregistratie (Bolt en Römkens, 2022). Vanaf 80 cm zijn daarbij dus vaste gehalten in de bodem gebruikt, waarbij de aanname is dat deze van natuurlijke oorsprong zijn.

Tabel 2-1 Overzicht van de coëfficiënten voor het schatten van de achtergrondwaarde van metalen met behulp van de ijzer- en aluminiumoxiden en de pH op basis van de AW2000-data in de 50-100cm-laag (bron: Bolt en Römkens, 2022).

	INT (a)	Oxiden (b)	pH (c)	R ²	se(Y-est)
Zn	-1.33	0.83	0.08	0.58	0.26
V	-1.82	0.83	0.14	0.49	0.36
U	-2.84	0.65	0.12	0.33	0.41
Se	-4.14	1.10	0.15	0.59	0.36
Sb*	0.15	0.69	-2.15	0.03	0.11
Pb	-1.11	0.67	0.06	0.43	0.28
Ni	-2.98	1.14	0.16	0.54	0.42
Mo*	-2.63	0.20	0.06	0.13	0.31
Cu	-1.94	0.94	0.06	0.35	0.45
Cr	-1.62	0.70	0.05	0.65	0.18
Co	-3.49	1.15	0.19	0.52	0.47
Cd	-3.77	1.08	0.07	0.52	0.37
Ba	-0.44	0.91	-0.03	0.31	0.44
As	-2.15	0.69	0.15	0.48	0.34

* Voor Mo en Sb zijn de modellen niet significant, mede omdat voor beide metalen het gemeten gehalte in de ondergrond in veel (> 80%) monsters van het AW2000-bestand lager is dan de rapportagegrens (voor beide 0.01 mg kg⁻¹).

2.3 Invloed van aan- en afvoerposten op de uitspoeling van metalen

Voor een aantal metalen, waaronder Cu, Zn en in mindere mate metalen als Pb of U, is er sprake van aanvoer via kunstmest, dierlijke mest, compost en atmosferische depositie. Voor onder andere As en Ni kan er lokaal ook sprake zijn van aanvoer via kwel. Aan de andere kant vindt er echter onttrekking van metalen uit de bodem plaats. Dit gebeurt met name via gewasopname en uitspoeling; erosie is, in Nederland, van onderschikt belang. Voor vrijwel alle metalen geldt echter dat de bodemvoorraad op enig moment veel groter is dan de netto balans van aanvoer minus afvoer. Dat betekent dat de invloed van aanvoer en afvoer van metalen binnen een jaar nauwelijks of geen invloed heeft op de concentratie van metalen in de bodem en daarmee op de concentratie van het uitspoelende bodemwater. Dat betekent dat de netto verandering van het gehalte in de bodem in één jaar door aanvoer via mest en atmosfeer of afvoer via gewas op de emissie naar het oppervlaktewater en grondwater verwaarloosbaar is.²

Voor zink geldt bijvoorbeeld dat de totale bodemvoorraad bij een gehalte van 50 mg/kg in de laag van 0-20 cm met een dichtheid van 1.2 kg/L ongeveer 120 kg Zn bedraagt. De jaarlijkse aanvoer van mest ligt in de orde grootte van 0.5 tot 2 kg/ha (De Vries et al., 2004). Dit suggereert dat de invloed van de mestgift op de concentratie in het uitspoelende bodemwater voor een berekening voor een gegeven jaar zeer klein is. Temeer omdat er ook sprake is van afvoer via gewas en uitspoeling waardoor de netto invloed op het gehalte (en daarmee de concentratie in het bodemvocht) binnen een jaar verwaarloosbaar is.

Het is daarom aannemelijk dat aan- en afvoerposten zoals opgenomen in het model binnen een termijn van een jaar geen invloed hebben op het gehalte aan metalen in de onderscheiden bodemlagen en daarmee de bijdrage van de achtergronduitspoeling. De invloed van aanvoer- dan wel afvoerposten op de berekening van de concentraties in het bodemwater is hier daarom verder buiten beschouwing gelaten en het model zoals gehanteerd in 2022 (inclusief aan- en afvoer) is toegepast.

2.4 Berekenen emissie metalen op basis van achtergrondgehalten

In het model zoals gerapporteerd in 2022 wordt de emissie van metalen berekend door het optellen van de vracht uit de bodem tot een diepte van GLG -1m en de emissie via grondwater afkomstig uit de lagen dieper dan GLG -1m. Beneden de grenslaag zoals in de studie van 2022 gebruikt (GLG -1m) veronderstellen we dat de concentraties in (bovenste) grondwater op dit moment niet beïnvloed worden door de bodem en/of adsorptieprocessen. Per regio zijn daarom voor alle metalen default-concentraties afgeleid uit data. De emissie van metalen via grondwater wordt berekend door deze (regionaal verdeelde) default-concentraties te vermenigvuldigen met de waterflux voor elke eenheid binnen deze regio. Daarmee geldt ook dat dit deel van de vracht als onderdeel van de achtergrond gezien kan worden. Er zijn weinig of geen aanwijzingen dat de concentraties in grondwater door menselijk handelen al substantieel veranderd (gestegen) zijn.

De vracht afkomstig uit de achtergrondgehalten wordt op twee manieren berekend:

- *Als verschil tussen de concentratie en vracht uit de bodem tot GLG -1m op basis van de totale gehalten in de bodem en die op basis van achtergrondgehalten.* In de rapportage uit 2022 is aangetoond dat het aandeel van de emissie uit de bodem (tot aan de grenslaag) op de totale emissie (inclusief grondwater) varieert van 33% voor Ba tot meer dan 90% voor cadmium en molybdeen. Effecten van het berekenen van de emissie op basis van achtergrondgehalten zullen daarom (veel) groter zijn voor metalen, met een groter aandeel van de emissie uit het bodemdeel.
- *Als verschil tussen de totale emissie (conform 2022) inclusief grondwater en de berekende vracht op basis van achtergrondgehalte.* Uiteindelijk bepaalt de totale emissie via bodem én grondwater de belasting van het oppervlaktewater. Daarom berekenen we ook het effect van de achtergronduitspoeling inclusief het aandeel via grondwater. De verhouding tussen de ontwateringsfluxen onder en boven 1m -GLG bepalen

² Een uitzondering hierop vormt mogelijk de directe afspoeling van metalen in mest in geval van hevige neerslag kort na bemesting. Dergelijke incidentele processen zijn echter niet in het model opgenomen.

met de emissieconcentraties uit de lagen de daadwerkelijke achtergrondbelasting. Dat roept de vraag op of voor het uitschakelen van de antropogene invloed i.e. het berekenen van de werkelijke achtergrondbelasting niet ook de waterhuishouding en het landgebruik zouden moeten worden aangepast. Voor deze verkenning is dit niet gebeurd.

Omdat een groot deel van de metalen die via landgebruik in de bodem terecht zijn gekomen in de bovengrond geaccumuleerd zijn, is naar verwachting het antropogene effect op de concentratie in het poriewater het grootst in de bovengrond. Bovendien is de bovengrond de laag die via maatregelen te beïnvloeden is, hetzij via reductie van de aanvoer, hetzij door het manipuleren van bodemeigenschappen die de concentratie beïnvloeden (onder andere via de pH of het organischestofgehalte van de bodem).

Om inzicht te geven in welke mate er een verschil in de antropogene bijdrage is tussen de bovengrond en op het grensvlak (GLG-1m) presenteren we per metaal ook de verandering in de berekende concentratie op deze twee dieptes.

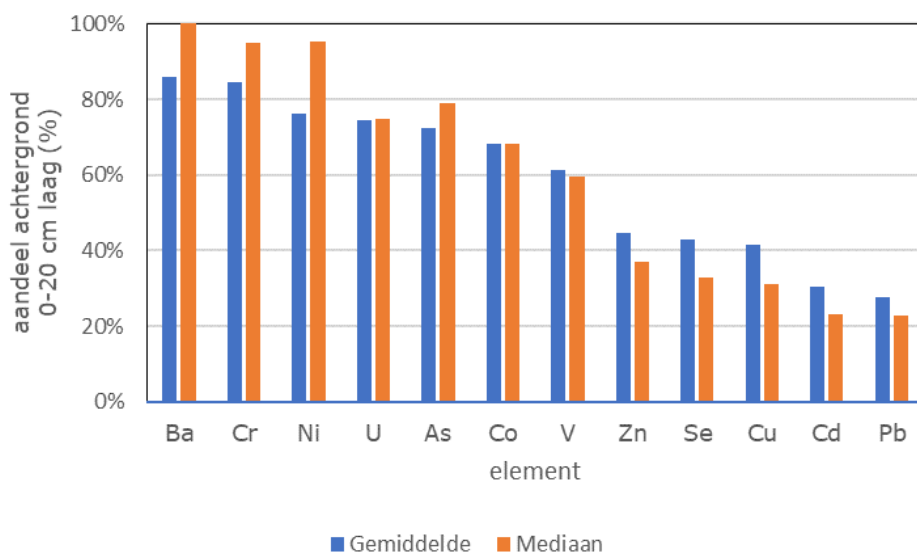
Noot: de concentraties en vrachten van de achtergronduitspoeling worden berekend door een combinatie van de berekende concentratie in bodemvocht op basis van de berekende achtergrondwaarden in de bodem. Beide modellen (partitierelaties voor de berekening van concentratie en achtergrondgehalten in de vaste fase) kennen een bepaalde mate van onzekerheid. Dit maakt dat er sprake is van een range in de berekende bijdrage van de achtergrondbelasting. Met name voor sommige metalen (o.a. Mo en Co) is de modelkwaliteit (berekening achtergrondgehalten en/of concentratie in het bodemvocht) beperkt, vaak gerelateerd aan het geringe aantal data dat beschikbaar is voor modelafleiding. Het effect van modelonzekerheid op de variatie in de bijdrage van achtergronduitspoeling wordt in dit voorstel verder niet uitgewerkt.

3 Resultaten

3.1 Aandeel achtergrondgehalte zware metalen bovengrond

Met behulp van de coëfficiënten in Tabel 2-1 is voor de 0-20cm-laag het achtergrondgehalte (reactieve gehalten in de vaste fase) van de zware metalen in de bodem berekend. Figuur 3-1 toont het aandeel van het achtergrondgehalte ten opzichte van het totaalgehalte in de bovengrond (0-20 cm, corresponderend met de bemonsteringsdiepte van de monsters in de Geochemische Bodematlas Nederland; Mol et al., 2012) in aflopende volgorde (gemiddelde en mediaan van alle ongeveer 300 datapunten). Dit betreft overigens alleen het reactieve deel (zoals gemeten met 0.43 N HNO₃) van de zware metalen dat in de modelberekening gebruikt wordt om de concentratie in het bodemvocht te berekenen. Het aandeel van de metalen dat als achtergrondgehalte in de bovengrond geclassificeerd kan worden, is uitgedrukt als de ratio tussen het berekende achtergrondgehalte en het gemeten totaalgehalte in de datapunten van de Geochemische Bodematlas (n = ongeveer 300). Omdat voor de tussenliggende bodemlagen geen data van de reactieve gehalten bekend zijn, is de verhouding van achtergrond ten opzichte van totaal niet berekend (dit zou alleen op basis van gemodelleerde totaalgehalten gedaan kunnen worden).

Uit de data in Figuur 3-1 blijkt dat voor metalen als Ba, Cr, Ni, U, As, Co en V het aandeel aan metalen van natuurlijke herkomst in de vaste fase dominant (60-100%) is ten opzichte van de antropogene bijdrage. Voor metalen als Zn, Cu, Pb, Cd en Se is dit omgekeerd en domineert, in de 0-20cm-laag, het aandeel antropogeen ten opzichte van het natuurlijke achtergrondgehalte. Deze resultaten lijken plausibel, want afgezien van Se, komen Cd, Zn, Pb en Cu voor in de bekende bronnen van metalen (mest, kunstmest en, voor lood atmosferische depositie). Het relatief hoge aandeel van de antropogene belasting voor Se kan op dit moment niet verklaard worden.



Figuur 3-1 Aandeel van het natuurlijke achtergrondgehalte in de bodem (vaste fase) aan het totale reactieve gehalte aan metalen in de bovengrond. Noot: vanwege de zeer beperkte kwaliteit van de voorspelling van de verdeling tussen antropogeen en natuurlijk gehalte zijn de data voor Mo en Sb niet weergegeven.

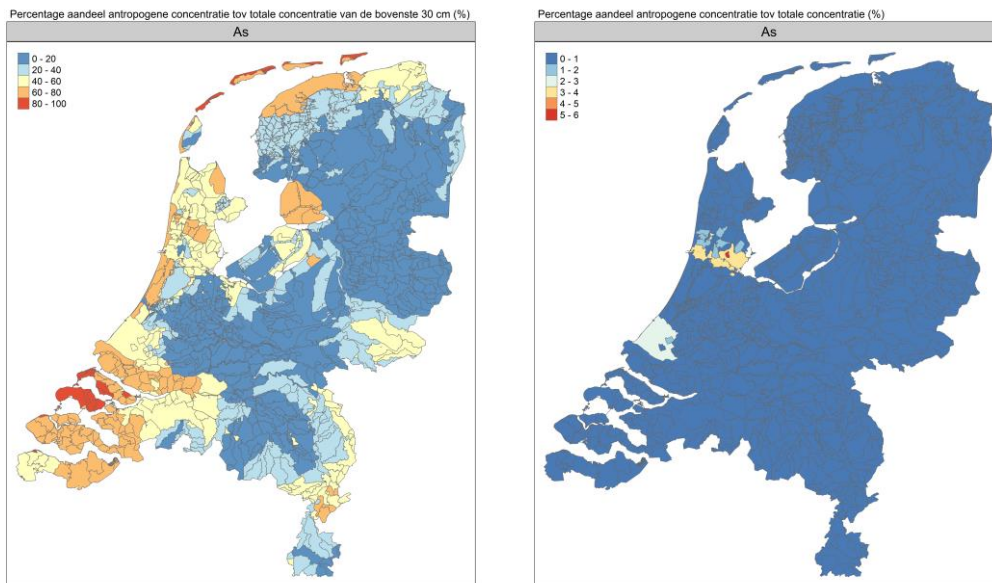
3.2 Metaalconcentraties in het bodemwater in de 0-30cm-laag en op het grensvlak (GLG -1m)

In Figuur 3-2 t/m Figuur 3-9 staat voor de onderzochte metalen en arseen het berekende aandeel van de antropogene aanrijking op de concentratie in het poriewater van de 0-30cm-laag.³ Dit aandeel is berekend als de ratio van de concentratie in het bodemwater horende bij het (berekende) achtergrondgehalte en het actuele gehalte voor de twee onderscheiden bodemlagen:

$$\text{Ratio}_{\text{laag-i}} = \text{Concentratie Bodemwater}_{\text{achtergrond laag-i}} / \text{Concentratie Bodemwater}_{\text{totaal-reactief laag-i}}$$

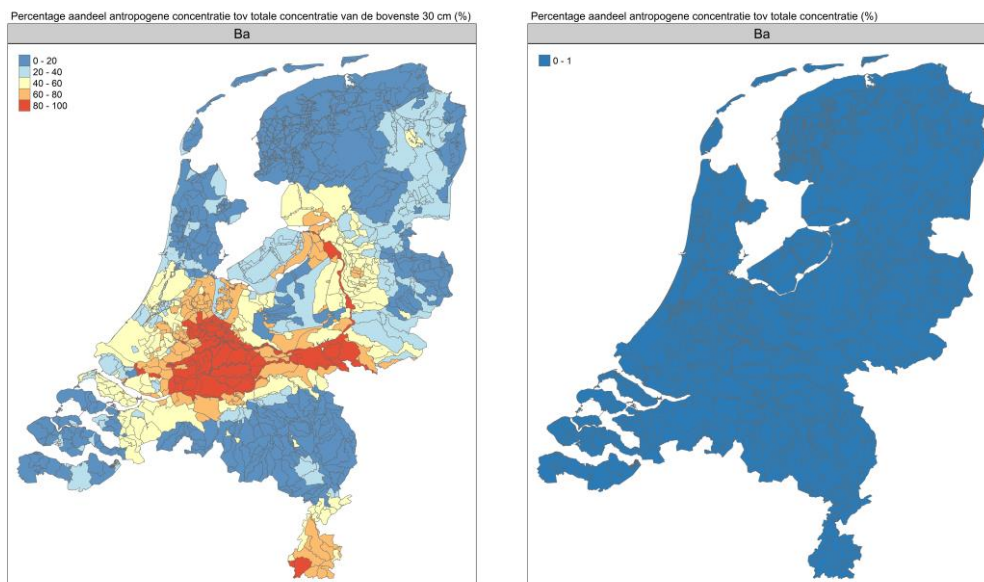
Het aandeel antropogeen is dus gelijk aan 100 – het percentage achtergrond. De concentratie is daarbij steeds de flux-gewogen gemiddelde concentratie, omdat de laag van 0-30 meerdere bodemlagen bevat.

Daarbij maken we onderscheid tussen de flux-gewogen gemiddelden van de concentratie in de 0-30cm-laag (links) en die op het grensvlak (GLG -1m; rechts). Bij de interpretatie van de data in Figuur 3-2 t/m Figuur 3-9 is het belangrijk onderscheid te maken tussen de bijdrage van de antropogene (of achtergrond) *concentratie in het bodemwater* ten opzichte van de bijdrage van de antropogene dan wel de achtergrondgehalten *in de bodem* zoals gegeven in Figuur 3-1. Voor een aantal stoffen zoals Ba is een groot deel van de huidige gehalten in de bodem van antropogene herkomst. Dat betekent echter niet automatisch dat daardoor ook de concentratie in het bodemwater in dezelfde mate bepaald wordt door deze antropogene aanrijking. De uiteindelijke concentratie in het bodemwater wordt namelijk uiteindelijk bepaald door de combinatie van het gehalte in de vaste fase (reactief gehalte) en de bodemeigenschappen in die laag. Dat maakt dat in gronden met een hoog klei- of organischestofgehalte of met een hoge pH, de invloed van het gehalte in de vaste fase op de concentratie klein kan zijn. Met andere woorden: een groot aandeel van de antropogene belasting op het gehalte in de bodem vertaalt zich niet noodzakelijkerwijs in een even groot aandeel in de concentratie in het bodemwater.



Figuur 3-2 Bijdrage van de antropogene belasting aan de berekende concentratie in het poriewater in de 0-30cm-laag (links) en op het grensvlak (GLG -1m, rechts) van As.

³ Deze diepte is gekozen als representatiefste voor de bovengrond die direct onder invloed van menselijke activiteiten staat. De keuze voor 20, 25 of 30 cm is daarbij deels arbitrair.

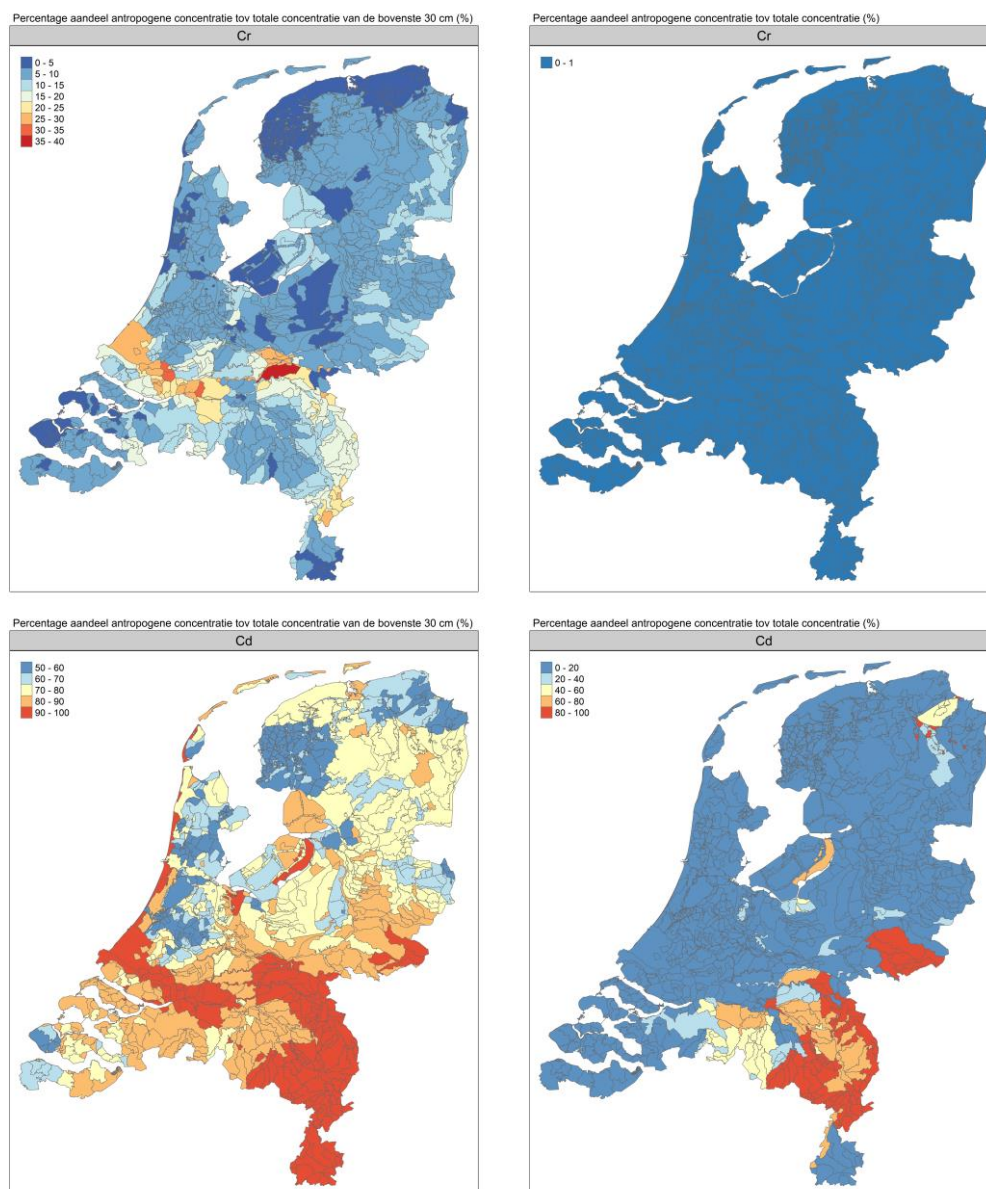


Figuur 3-3 Bijdrage van de antropogene belasting aan de berekende concentratie in het poriewater in de 0-30cm-laag (links) en op het grensvlak (GLG -1m, rechts) Ba.

Voor As en Ba heeft de antropogene aanvoer landelijk geen invloed op de berekende concentratie op GLG-1m en wordt deze in hoofdzaak door de achtergrondgehalten bepaald.

Ook de berekende antropogene bijdrage aan de emissies van As in de zone rondom het Amsterdam-Rijn kanaal (< 5%) is nog steeds klein ten opzichte van de bijdrage van de achtergronduitspoeling. In de 0-30cm-laag daarentegen is de invloed van de antropogene belasting voor arseen in gronden langs de kust (klei, hoge pH, hoge grondwaterstanden) groot en loopt op tot lokaal 80-100% in Zeeland en Zuid-Holland. Mogelijk is er in bodems die onder invloed van zoutwaterafzettingen staan sprake van afwijkende achtergrondgehalten die niet of minder verklaard worden door de generieke relatie met oxiden en pH. De hogere gehalten aan As in deze gebieden zouden dus ook van natuurlijke herkomst kunnen zijn. Dit dient verder onderbouwd te worden.

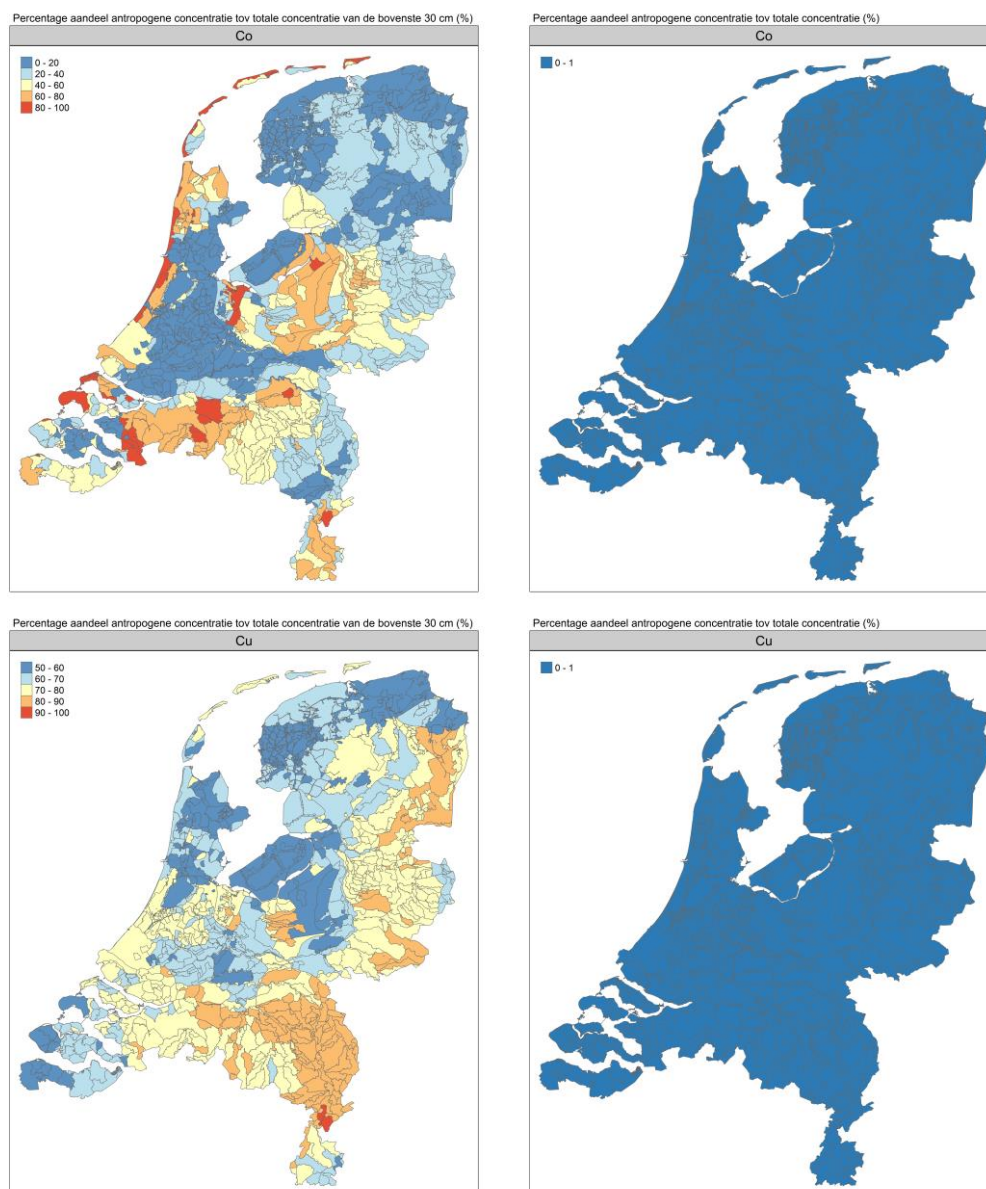
Voor Barium is de invloed in de bodemlaag van 0 tot 30 cm het grootst in het rivierkleigebied, het veenweidegebied en, in mindere mate, in Zuid- en Midden-Limburg. Dit lijkt vooral gerelateerd aan de hogere gehalten aan Ba in riviersedimenten van Rijn, IJssel en Waal en minder in die van de Maas.



Figuur 3-4 Bijdrage van de antropogene belasting aan de berekende concentratie in het poriewater in de 0-30cm-laag (links) en op het grensvlak (GLG -1m, rechts) van Cr (boven) en Cd (onder).

De concentratie chroom wordt op een diepte van GLG-1m volledig bepaald door de achtergrondgehalten. Dit komt vooral doordat chroom relatief immobiel is (ten opzichte van metalen als Cd of Zn). Ook in de bovengrond is de invloed van de antropogene aanrijking beperkt en bepaalt de achtergrondconcentratie veelal 80-85% van de concentratie in het bodemwater. Dit komt doordat de oplosbaarheid van chroom, ook bij hogere gehalten in de bodem, zeer laag is. Alleen in de sterk belaste riviersedimenten van Maas en Waal is een groot aandeel van de belasting met Cr afkomstig uit het antropogene deel van het chroomgehalte in de bodem.

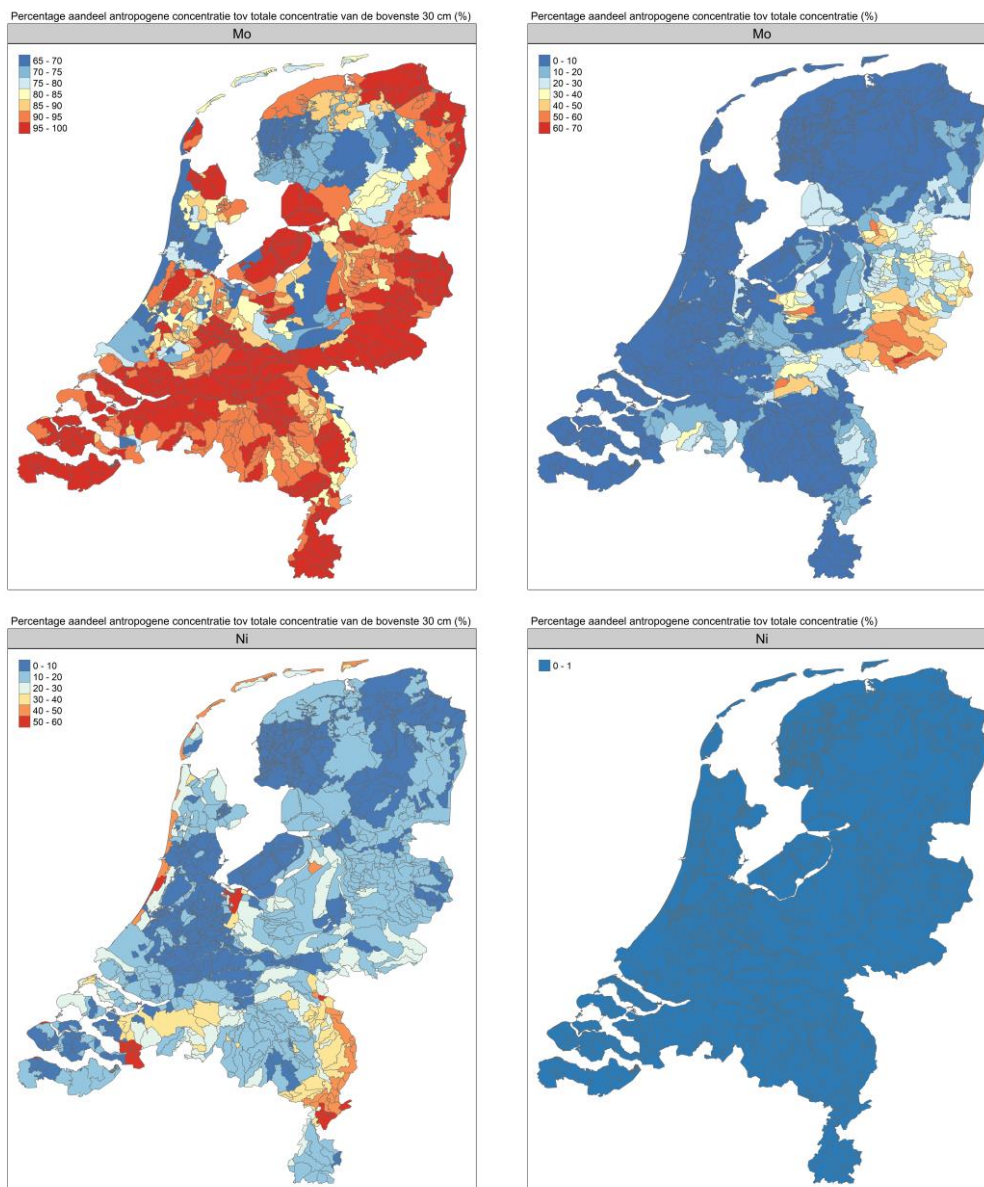
Voor Cd is het beeld anders en wordt in Zuidoost-Brabant en Midden- en Noord-Limburg ook op een diepte van GLG-1m een duidelijke invloed van de antropogene aanrijking gevonden. Dit is gerelateerd aan de regionaal sterk verhoogde gehalten aan Cd in de bodem. Deze data suggereren dat in dit gebied de invloed van de aanvoer van Cd (zowel door atmosferische depositie als ook via verontreinigde riviersedimenten van Maas en Roer) al invloed heeft in de diepere bodemlagen. Dit is in de 0-30cm-laag sterker zichtbaar. In Nederland is het aandeel van antropogene belasting aan de concentratie meer dan 50% van het totaal. Alleen in het Veenweidegebied, delen van de Achterhoek en in een deel van de kleigronden is dit iets lager vanwege de natuurlijk hogere achtergrondgehalten.



Figuur 3-5 Bijdrage van de antropogene belasting aan de berekende concentratie in het poriewater in de 0-30cm-laag (links) en op het grensvlak (GLG -1m, rechts) van Co (boven) en Cu (onder).

Voor Co en Cu is de antropogene bijdrage niet van invloed op de concentratie op GLG -1m; deze wordt volledig bepaald door de achtergrondgehalten.

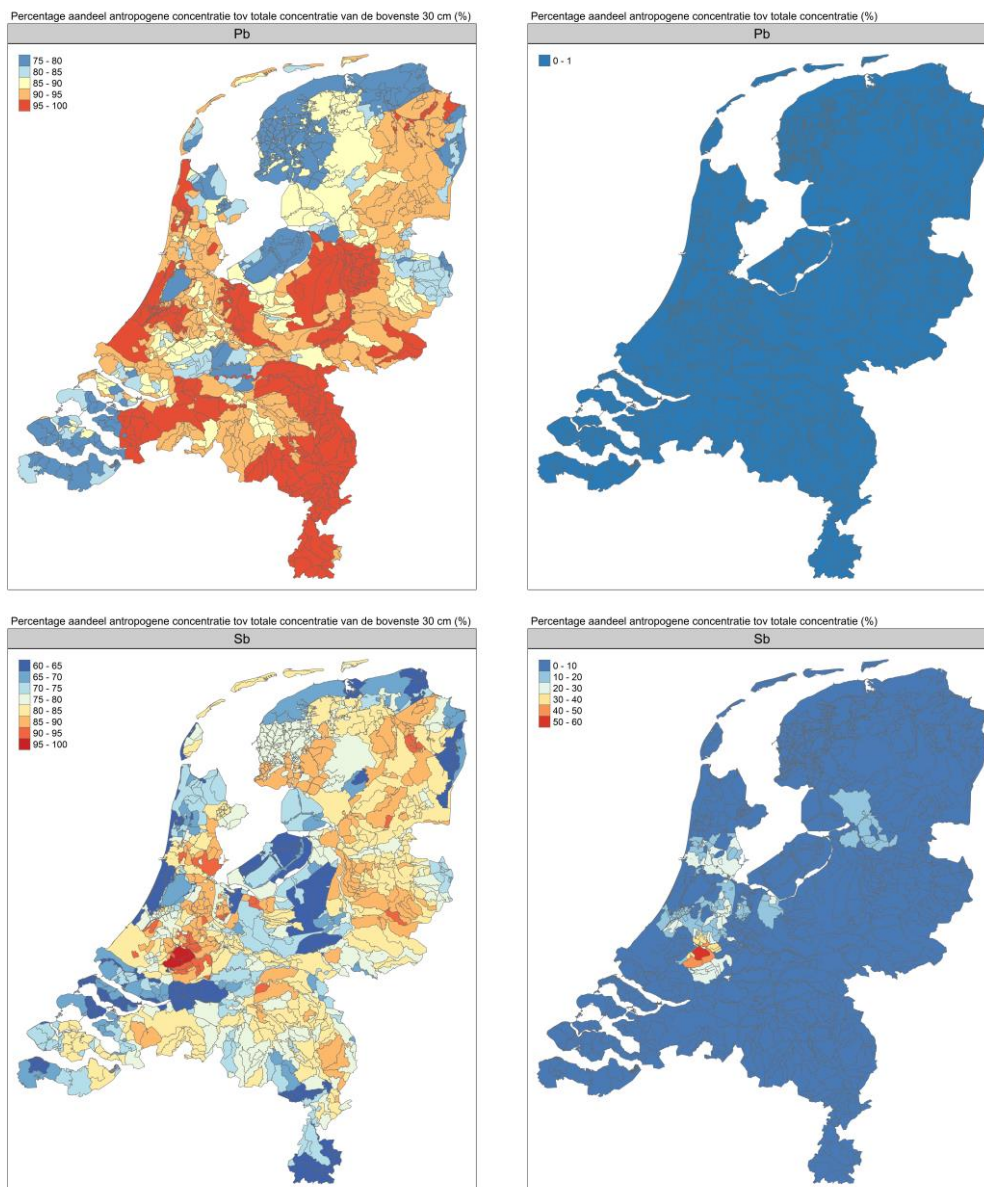
Voor Co is er in de bovengrond wel een duidelijk signaal van de antropogene bijdrage in de zandgebieden van Brabant en Gelderland en Zuid-Limburg en de duinen. Voor Cu is de bijdrage van de antropogene gehalten aan de concentratie in het bodemwater groot (> 70% van de uitspoeling) in de zandgebieden en in delen van West-Nederland. Dit komt (voor de zandgebieden) overeen met de intensieve veehouderij, wat suggereert dat er al wel een invloed is van de aanvoer via mest en de concentratie in de 0-30cm-laag, maar dat deze invloed niet tot op grotere diepte rijkt. In kleigronden (sterke binding aan de bodem) en natuurgebieden (Veluwe, geen of veel minder beïnvloeding van het gehalte in de bodem door landbouw) is deze invloed kleiner.



Figuur 3-6 Bijdrage van de antropogene belasting aan de berekende concentratie in het poriewater in de 0-30cm-laag (links) en op het grensvlak (GLG -1m, rechts) van Mo (boven) en Ni (onder).

Voor Mo suggereren de data dat er sprake is van een relatief grote invloed van de antropogene aanrijking op de concentraties in het bodemvocht in de Achterhoek en de Eemsvallei in de ondergrond. De berekening van het achtergrondgehalte van Mo en de daarop gebaseerde berekende verdeling van de concentratie in een antropogeen beïnvloed deel is echter onzeker vanwege de matige kwaliteit van de relatie die is toegepast voor de berekening van het achtergrondgehalte. Deze data en regio's waar er sprake zou zijn van een groter aandeel van de antropogene belasting moeten daarom met het nodige voorbehoud geïnterpreteerd worden. Voor regio's waar Mo in oppervlaktewater een knelpunt vormt, verdient het aanbeveling om de verdeling van Mo tussen het antropogene en natuurlijke aandeel in de bodem verder te onderzoeken.

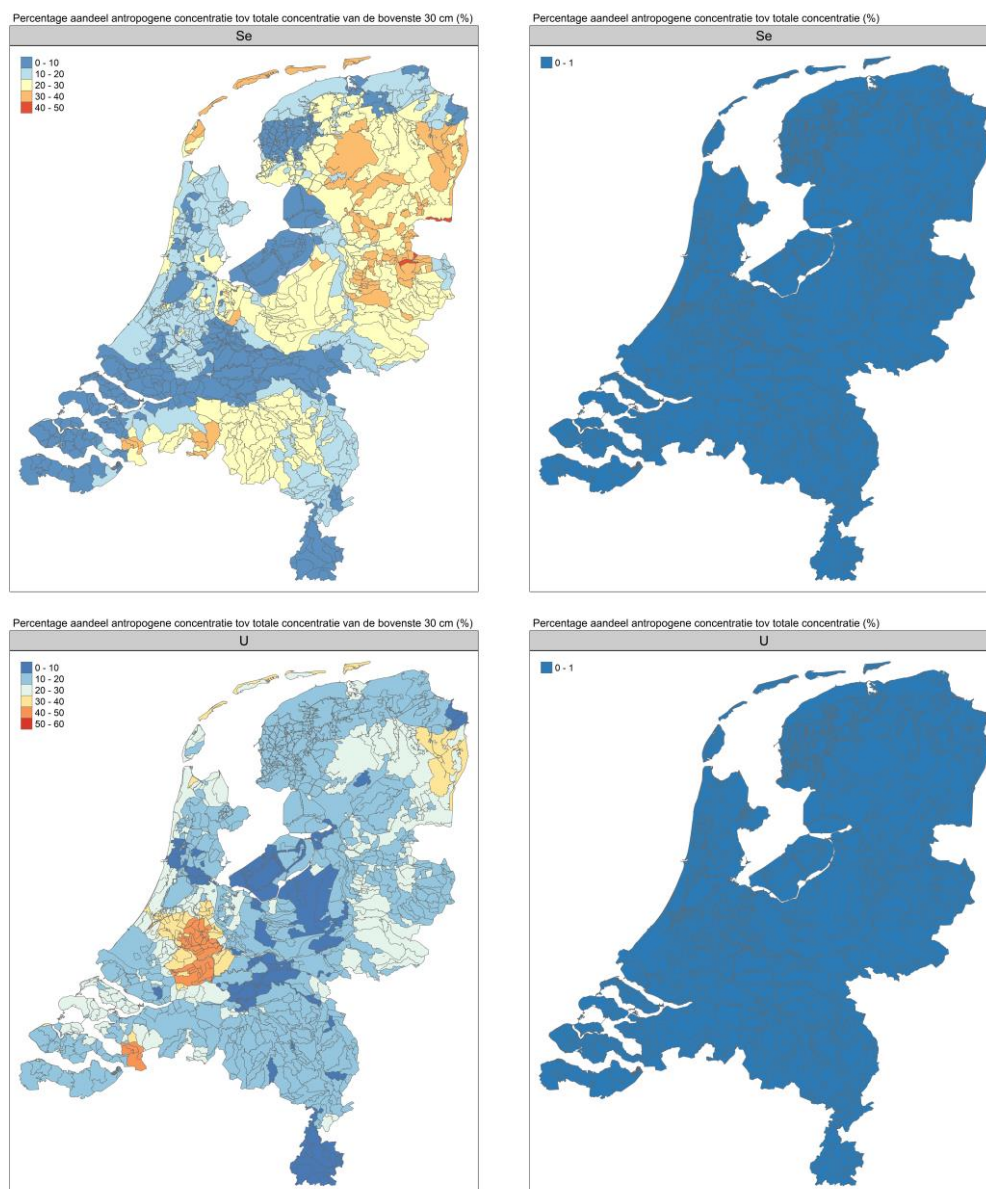
Voor Ni is er vooralsnog geen aanwijzing dat de concentraties op GLG-1m beïnvloed zijn door antropogene aanrijking. In de bovengrond zien we die invloed met name in het Maasdal en, in mindere mate, in een aantal beekdalen. Dit bevestigt het vermoeden dat de regionaal afwijkende concentraties meer bepaald zijn door variatie in natuurlijke gehalten en redoxprocessen dan door aanvoer via mest of andere bronnen. Dit dient echter beter onderbouwd te worden.



Figuur 3-7 Bijdrage van de antropogene belasting aan de berekende concentratie in het poriewater in de 0-30cm-laag (links) en op het grensvlak (GLG -1m, rechts) van Pb (boven) en Sb (onder).

Voor Pb geldt dat er een duidelijke invloed is van de antropogene aanrijking op de concentraties in de bovengrond, maar dat deze invloed niet rijkt tot GLG -1m. Dit komt vooral doordat de mobiliteit van Pb heel laag is waardoor vrijwel alle lood dat in de bodem komt in de bovengrond vastgelegd wordt. De concentraties in de bovengrond worden daardoor vrijwel volledig bepaald door de hoeveelheid Pb die via menselijk handelen in de bodem is gekomen.

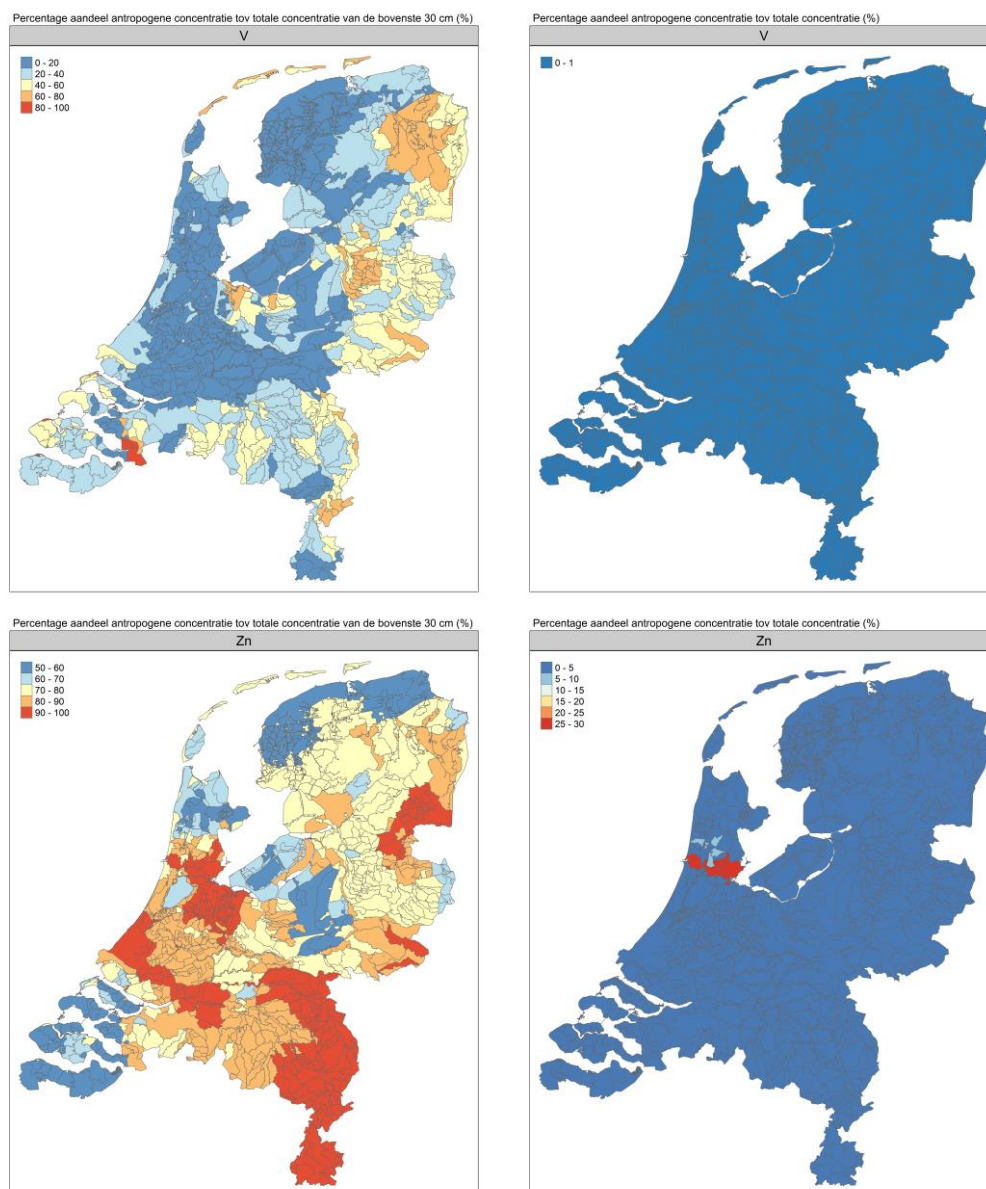
Voor Sb zien we in delen van de Krimpenerwaard een relevante bijdrage van de antropogene gehalten op een diepte van GLG -1m. De berekende antropogeen bepaalde concentratie in het bodemwater varieert daarbij van 10 tot 60% van de totale concentratie in het bodemwater op die diepte. In mindere mate komt dit ook voor in delen van het Veenweidegebied. Dit komt ook overeen met de bijdrage in de bovengrond, die in de Krimpenerwaard en het Veenweidegebied sterker is dan in de meeste andere regio's. Voor de bovengrond geldt dat het merendeel van de variatie in de concentraties in het bodemwater daarmee bepaald worden door de antropogene aanrijking.



Figuur 3-8 Bijdrage van de antropogene belasting aan de berekende concentratie in het poriewater in de 0-30cm-laag (links) en op het grensvlak (GLG -1m, rechts) van Se (boven) en U (onder).

Voor Se is de invloed van de antropogene aanrijking op de concentratie in het bodemwater in de ondergrond gering tot afwezig. Ook de invloed in de bovengrond is veelal minder dan voor de meeste andere metalen. Dit lijkt in tegenspraak te zijn tot het – berekende – hoge aandeel van seleen van antropogene herkomst (zie Figuur 3-1) in de bodem. Het geringe berekende antropogene deel in de concentratie in het bodemwater (ook in de bovengrond veelal lager dan 30% m.u.v. het Veenweidegebied) suggereert dat de binding van seleen aan de vaste fase zodanig is dat er ondanks een toename van antropogene herkomst geen evenredige stijging optreedt in de concentratie in het bodemwater. Dit effect is sterker in kleigronden dan in zandgronden, wat op zich consistent is, omdat binding van metalen in kleigronden veelal sterker is dan in zandgronden. Een stijging van het gehalte in de bodem – van antropogene herkomst – zal volgens deze redenering dan ook eerder in zand- dan in kleigronden zichtbaar zijn.

Voor U is er in de ondergrond geen aanrijking in de concentratie afkomstig van de antropogene belasting. In de bovengrond komen antropogeen verhoogde gehalten aan U vooral voor in het Veenweidegebied, ook al is het verschil in absolute gehalten aan U in het Veenweidegebied en de rest van Nederland niet heel erg groot en zijn de gehalten ook in het Veenweidegebied laag te noemen. Voor U wordt de variatie in de concentratie in hoge mate (> 80-90% in heel NL met uitzondering van het Veenweidegebied) bepaald door achtergrondgehalten.



Figuur 3-9 Bijdrage van de antropogene belasting aan de berekende concentratie in het poriewater in de 0-30cm-laag (links) en op het grensvlak (GLG -1m, rechts) van V (boven) en Zn (onder).

Een beperkte bijdrage van antropogene aanrijking voor vanadium is alleen waarneembaar in de bovengrond van met name het oostelijke zandgebied en – heel lokaal – rondom de Brabantse Wal. In de ondergrond is deze bijdrage niet zichtbaar. Ook hier geldt dat dergelijke regionale afwijkingen verder onderbouwd moeten worden met metingen van de gehalten aan vanadium.

Voor Zn zijn de gebieden waar sprake is van verhoogde aanvoer naar de bodem in de oostelijke zandgebieden en het Veenweidegebied zichtbaar en is de concentratie in het bodemwater van de bovengrond voor meer dan 70% bepaald door de antropogene aanrijking van zink in de bodem. Dit is grotendeels gerelateerd aan de aanvoer van zink met onder meer dierlijke mest (zandgebieden) en toemaak (historisch gebruik van stedelijk afval in de veengebieden). Op een diepte van GLG -1m is deze invloed echter niet aantoonbaar, ondanks dat Zn een relatief mobiel element is vergeleken met metalen als Pb en Cu. De resultaten voor Zn moeten echter met enig voorbehoud geïnterpreteerd worden. Dat geldt zeker voor gebieden waar sprake is van een duidelijke regionale beïnvloeding van de gehalten in de bodem, zoals de Kempen. De berekening van de antropogene aanrijking is deels bepaald door de beschikbare data en gemeten concentraties daarin en anderzijds door de modelaanpak. Voor Zn geldt dat er wellicht te weinig data in de database aanwezig zijn om de regionale afwijking van gehalten in de ondergrond goed te kunnen karakteriseren. Het feit dat de data in Figuur 3-9 suggereren dat er voor Zn op een diepte van GLG -1m geen

sprake zou zijn van antropogene beïnvloeding, moet daarom nader vastgesteld worden. Een mogelijkheid hiertoe is een betere karakterisering van de reactieve gehalten aan Zn in de ondergrond.

Hetzelfde geldt voor de regionaal afwijkende bijdrage van de antropogene gehalten in het gebied rond het Noordzeekanaal/Amsterdam op de diepte van GLG -1m. Of in dat gebied sprake is van een groter aandeel van de antropogene belasting of een anomalie kan met de huidige data niet vastgesteld worden. In Tabel 3-1 staat per metaal een samenvatting van de gebieden waar sprake is van een duidelijk aandeel van de antropogene belasting op de concentratie in het bodemwater.

Tabel 3-1 Gebieden met duidelijke invloed van de antropogene belasting op de concentratie in het bodemwater op 0-30 cm en GLG -1m.

Bovengrond (0-30 cm)	Ondergrond (GLG-1m)
Kustgebieden, Maasstroomgebied, Achterhoek	n.v.t.
Rivierkleigebieden, Veenweidegebied, Zuid-Limburg	n.v.t.
Rivierkleigebied	n.v.t.
Heel NL m.u.v. kleigebieden aan de kust (NH, ZH, Fr, Gr)	O-Brabant, M- en N-Limburg, Achterhoek
Zuid-Limburg, W Noord Brabant, Veluwe	n.v.t.
Zandgronden NL	n.v.t.
Heel NL m.u.v. kleigebieden aan de kust (NH, ZH, Fr)	Achterhoek
Maasstroomgebied, W Noord Brabant	n.v.t.
Zandgronden NL	n.v.t.
Zandgronden NL, Veenweidegebied, Biesbosch	Veenweidegebied/Biesbosch
Zandgronden NL	n.v.t.
Veenweidegebied (Veenkoloniën)	n.v.t.
Zandgronden	n.v.t.
Heel NL m.u.v. kustgebieden en Veluwe	Noordzeekanaal ¹

¹ Mogelijk een artefact gerelateerd aan lage databeschikbaarheid; ook het ontbreken van een bijdrage in onder meer de Kempen lijkt twijfelachtig. Nader regionaal onderzoek naar de gehalten aan metalen in de ondergrond is hiervoor noodzakelijk.

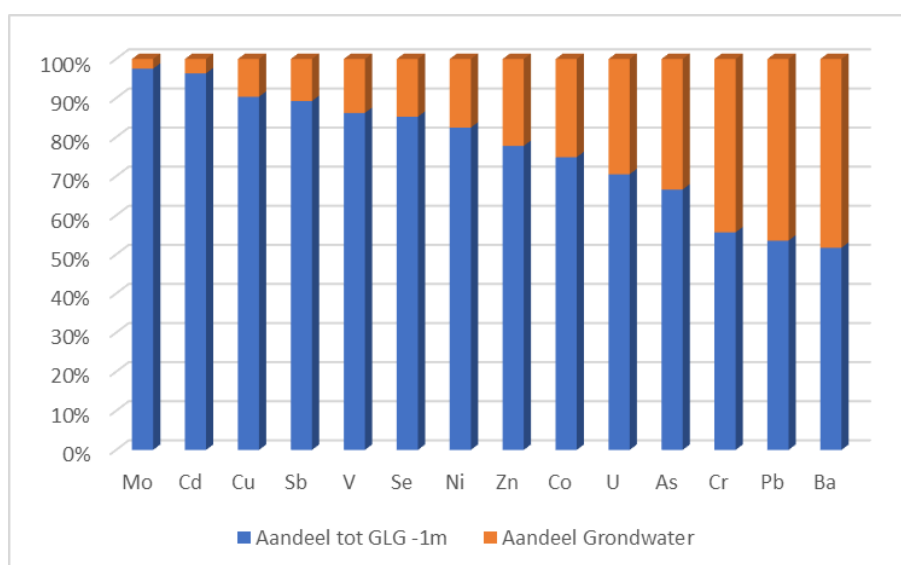
3.3 Aandeel van de achtergrondbelasting in de totale emissie naar oppervlaktewater: landelijke data

In Tabel 3-2 staat een overzicht van de verdeling van de totale emissie (1) uit bodem (2) en grondwater (3) naar het oppervlaktewater. Het aandeel uit bodem en grondwater staat gegeven in ton/jaar en als relatief aandeel aan de totale emissie (in % van de totale emissie). Onder 'bodem' valt in deze studie de laag tussen het oppervlak en een diepte van GLG -1m. Onder 'grondwater' valt de totale emissie afkomstig uit lagen dieper dan GLG -1m.

Tabel 3-2 Bijdrage van de emissies uit de bodem (tot GLG -1m) en de laag dieper dan GLG -1m (incl. grondwater) aan de totale emissie naar oppervlaktewater.

	Totale emissie (1)		Bodem (2)	Grondwater (3)	
	Bodem en Grondwater		Emissie tot GLG -1m	Emissie > GLG -1m	
	ton/jaar	ton/jaar	% totaal	ton/jaar	%totaal
As	15392	10252	67%	5140	33%
Ba	538011	278271	52%	259740	48%
Cd	3697	3562	96%	135	4%
Co	7680	5751	75%	1929	25%
Cr	5983	3330	56%	2653	44%
Cu	16364	14783	90%	1581	10%
Mo	18653	18189	98%	464	2%
Ni	26226	21624	82%	4602	18%
Pb	818	438	54%	380	46%
Sb	1442	1287	89%	155	11%
Se	4826	4113	85%	713	15%
U	424	299	71%	125	29%
V	16399	14137	86%	2262	14%
Zn	76362	59383	78%	16979	22%

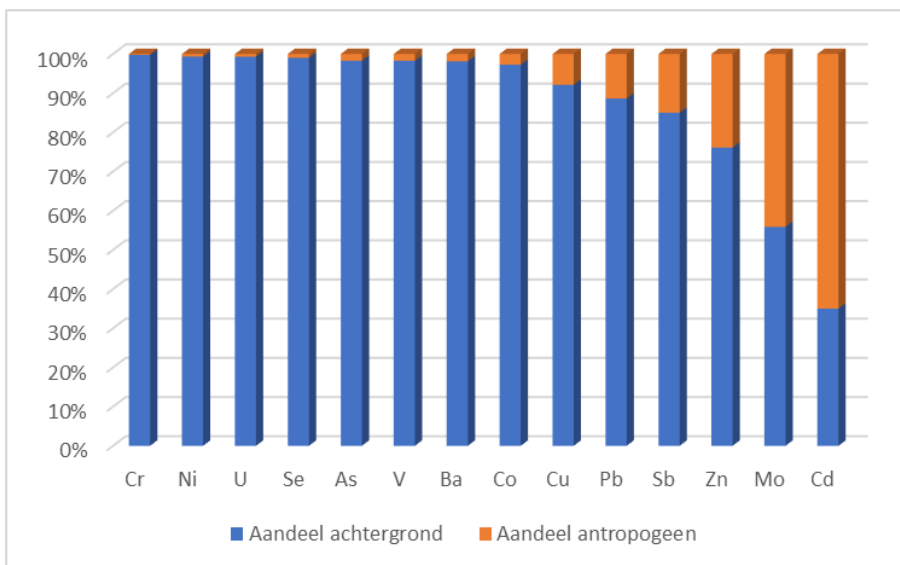
In Figuur 3-10 staat deze informatie weergegeven als het relatieve aandeel van de emissies uit de bodem (tot GLG -1m) en uit grondwater (dieper dan GLG-1m) aan de totale emissie. De metalen zijn gesorteerd in aflopende bijdrage van de emissie uit de bodem (tot GLG -1m).



Figuur 3-10 Aandeel emissie uit de bodem (tot GLG -1m, in blauw) en grondwater (dieper dan GLG -1m in oranje) aan de totale emissie naar oppervlaktewater.

Het aandeel van de emissie uit grondwater wordt in deze benadering a priori bij de achtergronduitspoeling gerekend onder de aanname dat er op dit moment geen wezenlijke invloed is van menselijk handelen op de concentratie in grondwater. Vooral voor metalen als U, Cr, Pb, Ba en As is het aandeel van de emissie via grondwater aan de totale emissie substantieel (zo'n 30% of meer), terwijl voor Mo, Cd, Cu, Sb, V, Se, Ni en Zn juist meer dan zo'n 80% van de emissie uit de bodem tot GLG -1m afkomstig is.

Zoals eerder getoond, is er met name in de bodemlaag tot GLG- 1m sprake van antropogene aanrijking van deze metalen in de vaste fase van de bodem (Figuur 3-1). Dit betekent niet automatisch dat dit leidt tot een evenredige toename in de emissie uit de bodem tot GLG -1m. Dit blijkt ook uit de data in Figuur 3-11. Hierin staat het relatieve aandeel van de achtergronduitspoeling en antropogeen bepaalde emissies naar oppervlaktewater in aflopende volgorde van de bijdrage van de achtergronduitspoeling. De achtergronduitspoeling is daarbij de som van de achtergronduitspoeling uit de bodem en de totale emissie via grondwater. Hieruit blijkt dat voor de metalen Cr, Ni, U, Se, As, V, Ba en Co de totale emissie naar het oppervlaktewater voor meer dan 95% bepaald wordt door de achtergronduitspoeling. Voor Cu, Pb, Sb en Zn varieert dit tussen 8% en 24%, terwijl dit voor Mo en Cd oploopt tot 44% (Mo) en 65% (Cd).



Figuur 3-11 Aandeel van de achtergronduitspoeling in de totale emissie van zware metalen en arseen naar oppervlaktewater.

In Tabel 3-3 (absolute emissie in ton/jaar) en Tabel 3-4 (relatieve emissie in %) staat de totale emissie (onder 1), het aandeel antropogeen bepaalde uitspoeling (2) en de achtergronduitspoeling (3). Daarnaast is er een onderscheid gemaakt in het aandeel van zowel de achtergronduitspoeling en antropogeen bepaalde uitspoeling afkomstig uit de 0-30cm-laag (4 en 5) en de laag van 30 cm tot GLG -1m (6 en 7). Dit onderscheid is relevant, omdat maatregelen die ingrijpen op de bodem veelal betrekking hebben op de bodemlaag van 0 tot 30 cm. Dit betreft onder meer maatregelen gericht op de aanvoer naar de bodem (via mest of anderszins) en bodemmaatregelen gerelateerd aan organische stof of zuurgraad. Anderzijds zijn maatregelen die ingrijpen op de waterhuishouding, zoals het verhogen of verlagen van de grondwaterstand, vooral van invloed op de fluxen uit de bodemlagen van 30 cm tot GLG -1m.

Tabel 3-3 Totale landelijke emissies (ton. J⁻¹) onderscheiden naar achtergrond- en antropogene belasting.

Metaal	Totale Emissie			Emissie uit 0-30 cm		Emissie uit 30 cm tot GLG -1m	
	Totaal (1)	Antropogeen (2)	Achtergrond (3)	Antropogeen (4)	Achtergrond (5)	Antropogeen (6)	Achtergrond (7)
	ton. J ⁻¹	ton. J ⁻¹	ton. J ⁻¹	ton. J ⁻¹	ton. J ⁻¹	ton. J ⁻¹	ton. J ⁻¹
As	15392	264	15128	180	781	84	9207
Ba	538011	10111	527900	7534	16426	2576	251735
Cd	3697	2402	1295	352	116	2050	1044
Co	7680	210	7471	138	1224	72	4317
Cr	5983	13	5970	13	293	0	3024
Cu	16364	1288	15076	1220	1258	68	12237
Mo	18653	8231	10422	205	91	8027	9866
Ni	26226	167	26059	138	2983	29	18474
Pb	818	93	725	93	24	0	321
Sb	1442	216	1226	68	25	148	1046
Se	4826	47	4779	29	362	18	3704
U	424	3	421	3	27	0	269
V	16399	287	16112	184	970	103	12880
Zn	76362	18234	58128	12193	3206	6041	37943

Tabel 3-4 Relatieve bijdrage (%) van de achtergrond- en antropogene belasting aan de totale landelijke emissies.

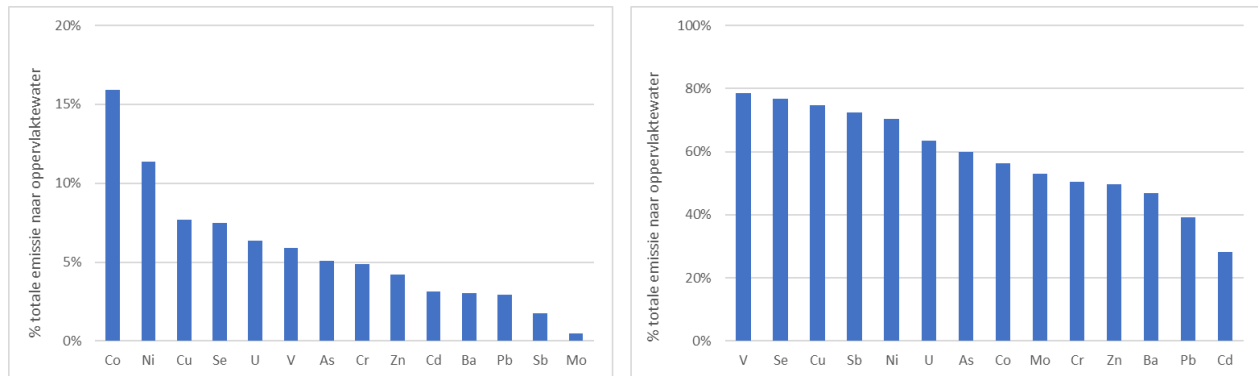
	Aandeel in Totale emissie		Bodem			
	Achtergrond	Antropogeen	0-30 cm		30 cm – GLG -1m	
			Achtergrond	Antropogeen	Achtergrond	Antropogeen
As	98%	2%	5,1%	1,2%	60%	0,5%
Ba	98%	2%	3,1%	1,4%	47%	0,5%
Cd	35%	65%	3,1%	9,5%	28%	55%
Co	97%	3%	16%	1,8%	56%	0,9%
Cr	100%	0%	4,9%	0,2%	51%	0,0%
Cu	92%	8%	7,7%	7,5%	75%	0,4%
Mo	56%	44%	0,5%	1,1%	53%	43%
Ni	99%	1%	11%	0,5%	70%	0,1%
Pb	89%	11%	2,9%	11%	39%	0,0%
Sb	85%	15%	1,7%	4,7%	73%	10%
Se	99%	1%	7,5%	0,6%	77%	0,4%
U	99%	1%	6,4%	0,7%	63%	0,0%
V	98%	2%	5,9%	1,1%	79%	0,6%
Zn	76%	24%	4,2%	16%	50%	7,9%

In Figuur 3-12 en Figuur 3-13 zijn, in aflopende volgorde, de bijdrage van respectievelijk de achtergronduitspoeling (Figuur 3-12) en de antropogene uitspoeling (Figuur 3-14) uit de bodem gegeven. Samen met de emissie via grondwater vormt dit de totale emissie van metalen die via uitspoeling het oppervlaktewater bereiken.

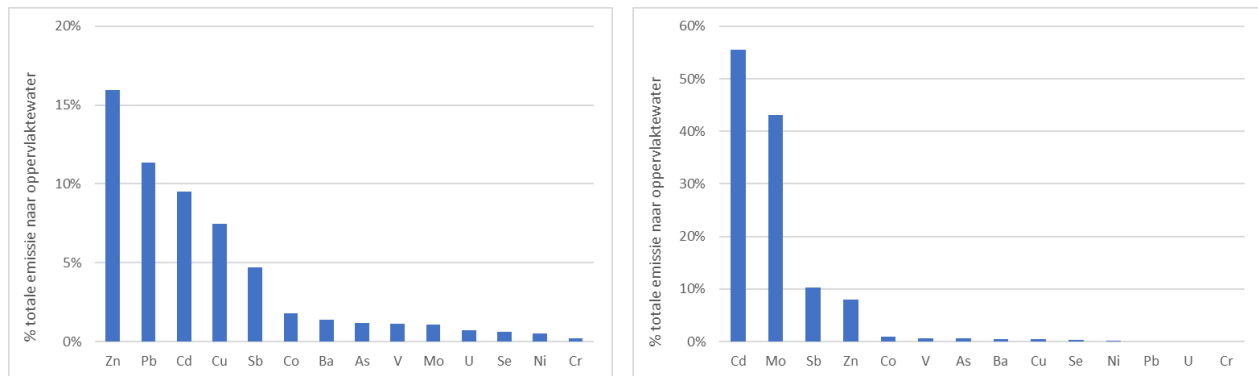
De achtergronduitspoeling uit de laag van 30 cm tot GLG -1m (Figuur 3-12 rechts) is voor de meeste metalen – m.u.v. Cd en Pb – dominant (> 50% van de totale emissie naar het oppervlaktewater) ten opzichte van de bijdrage van de antropogene bijdrage (uit deze laag).

De emissie uit de 0-30cm-laag die aan de achtergrondgehalten toegeschreven kan worden, is alleen voor Co en Ni enigszins van betekenis (11-16% van de totale emissie; zie Figuur 3-12 links). Voor de overige elementen is het aandeel uit de 0-30cm-laag gerelateerd aan de achtergrondemissie klein (1-8%).

Omgekeerd blijkt de antropogene bijdrage voor Cd, Pb, Cu en Zn uit de 0-30cm-laag relevant. In de 30cm-tot GLG -1 laag is er een substantiële bijdrage voor Cd en Zn maar minder voor Cu en Pb, die vanwege hun lagere mobiliteit minder ver in het bodemprofiel zijn doorgedrongen. Het relatief grote aandeel van de antropogene bijdrage voor Mo (43%) moet met enig voorbehoud geïnterpreteerd worden vanwege de matige kwaliteit van de modellen voor dit element.



Figuur 3-12 Aandeel van de achtergronduitspoeling aan de totale emissie naar oppervlaktewater uit de 0-30cm-laag (links) en de laag van 30 cm tot aan GLG -1m (rechts).



Figuur 3-13 Aandeel van de antropogene uitspoeling aan de totale emissie naar oppervlaktewater uit de 0-30cm-laag (links) en 30cm-GLG -1m-laag (rechts).

Tot slot staat in Tabel 3-5 het relatieve aandeel van de emissie uit de bodem (tot GLG -1m) aan de totale emissie van metalen naar het oppervlaktewater (onder 1). Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de bijdrage van de antropogeen bepaalde emissie (onder 2) en de achtergronduitspoeling (3). Daaruit blijkt dat voor de meer mobiele metalen als Cd en in mindere mate Zn de grote bijdrage uit de bodem voor een groter deel bepaald wordt door de antropogene bijdrage van de metaalgehalten in de bodem. Voor minder mobiele metalen als Cu en Pb is weliswaar een groot deel van de metalen in de bodem van antropogene herkomst (Figuur 3-1), maar is de bijdrage van de antropogeen verhoogde gehalten in de bodem aan de totale emissie naar oppervlaktewater beperkt. Zo is het aandeel van de emissie voor Cu uit de bodem 90% van de totale emissie, maar is dit voor 8% gerelateerd aan de bijdrage van de antropogene gehalten in de bodem. Voor Pb is het aandeel van de emissie uit de bodem 54% (van de totale emissie), maar is ook hier de directe bijdrage van de antropogene emissie 11% t.o.v. 42% voor de achtergronduitspoeling.

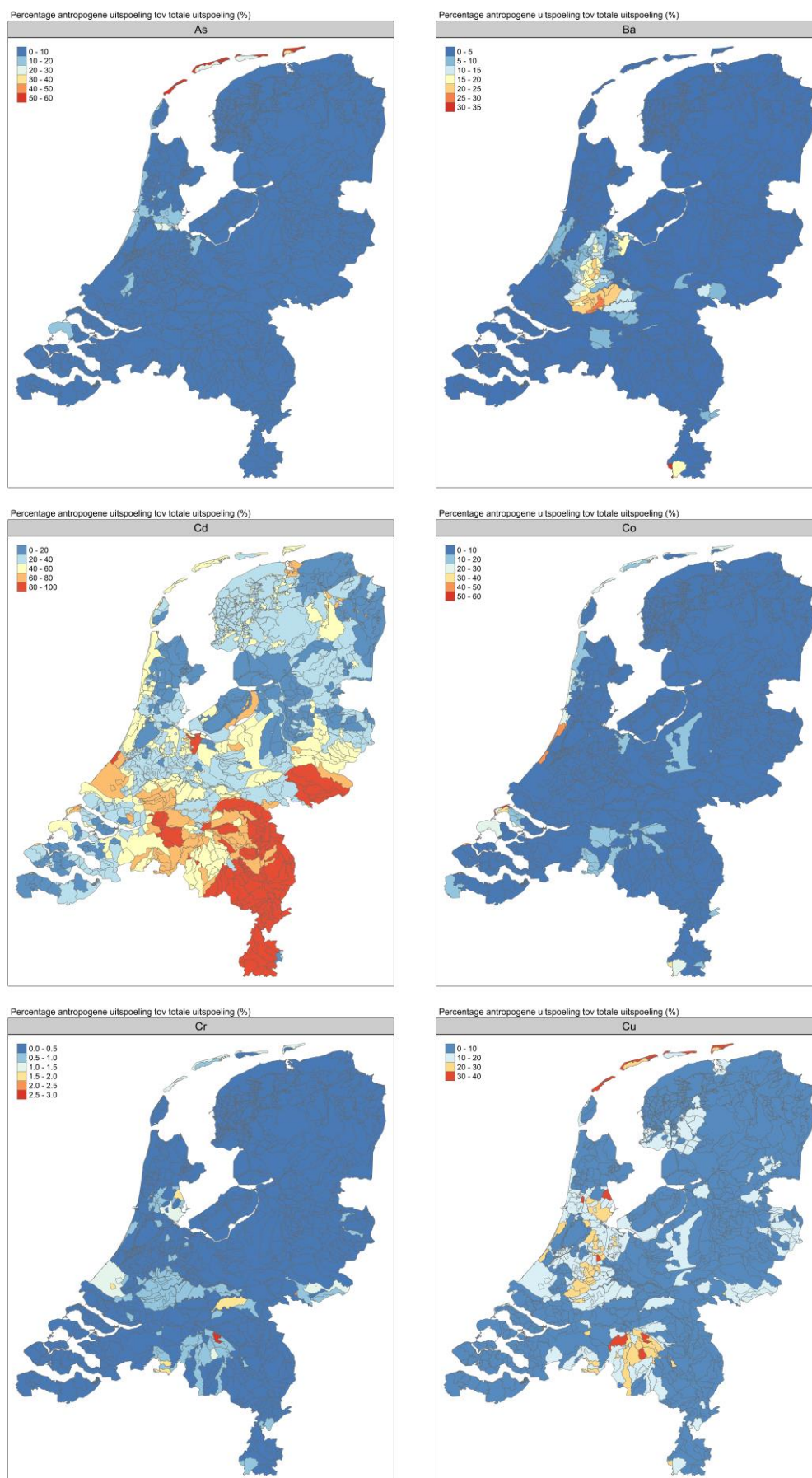
Tabel 3-5 Aandeel van de emissie uit de bodem (tot GLG -1m) aan de totale emissie van metalen naar oppervlaktewater (1) en de verdeling tussen de antropogeen bepaalde emissie (2) en achtergronduitspoeling (3). Noot: de emissie via grondwater is daarbij dus gelijk aan 100% - aandeel emissie uit bodem onder (1).

	Aandeel Totale Emissie uit Bodem (1)	Aandeel antropogeen (2)	Aandeel achtergrond (3)
As	67%	2%	65%
Ba	52%	2%	50%
Cd	96%	65%	31%
Co	75%	3%	72%
Cr	56%	0%	55%
Cu	90%	8%	82%
Mo	98%	44%	53%
Ni	82%	1%	82%
Pb	54%	11%	42%
Sb	89%	15%	74%
Se	85%	1%	84%
U	71%	1%	70%
V	86%	2%	84%
Zn	78%	24%	54%

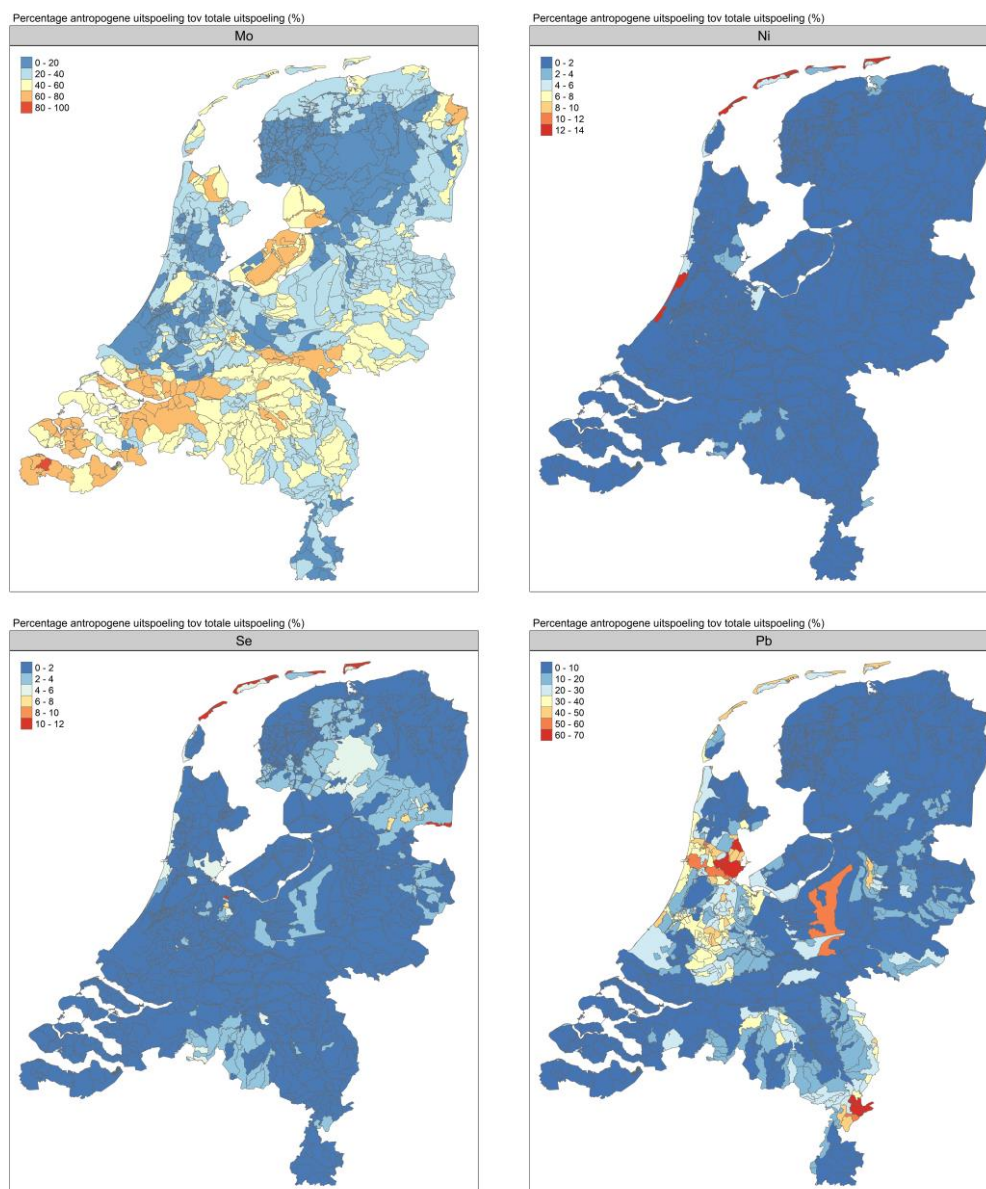
3.4 Regionale verdeling van de achtergrond en antropogene belasting van oppervlaktewater

In Figuur 3-14 t/m Figuur 3-16 staat per metaal het aandeel van de antropogene bijdrage aan de totale emissie van metalen vanuit de bodem naar het oppervlaktewater. De totale emissie is de som van de emissie uit de laag tot GLG -1m en het aandeel vanuit grondwater.

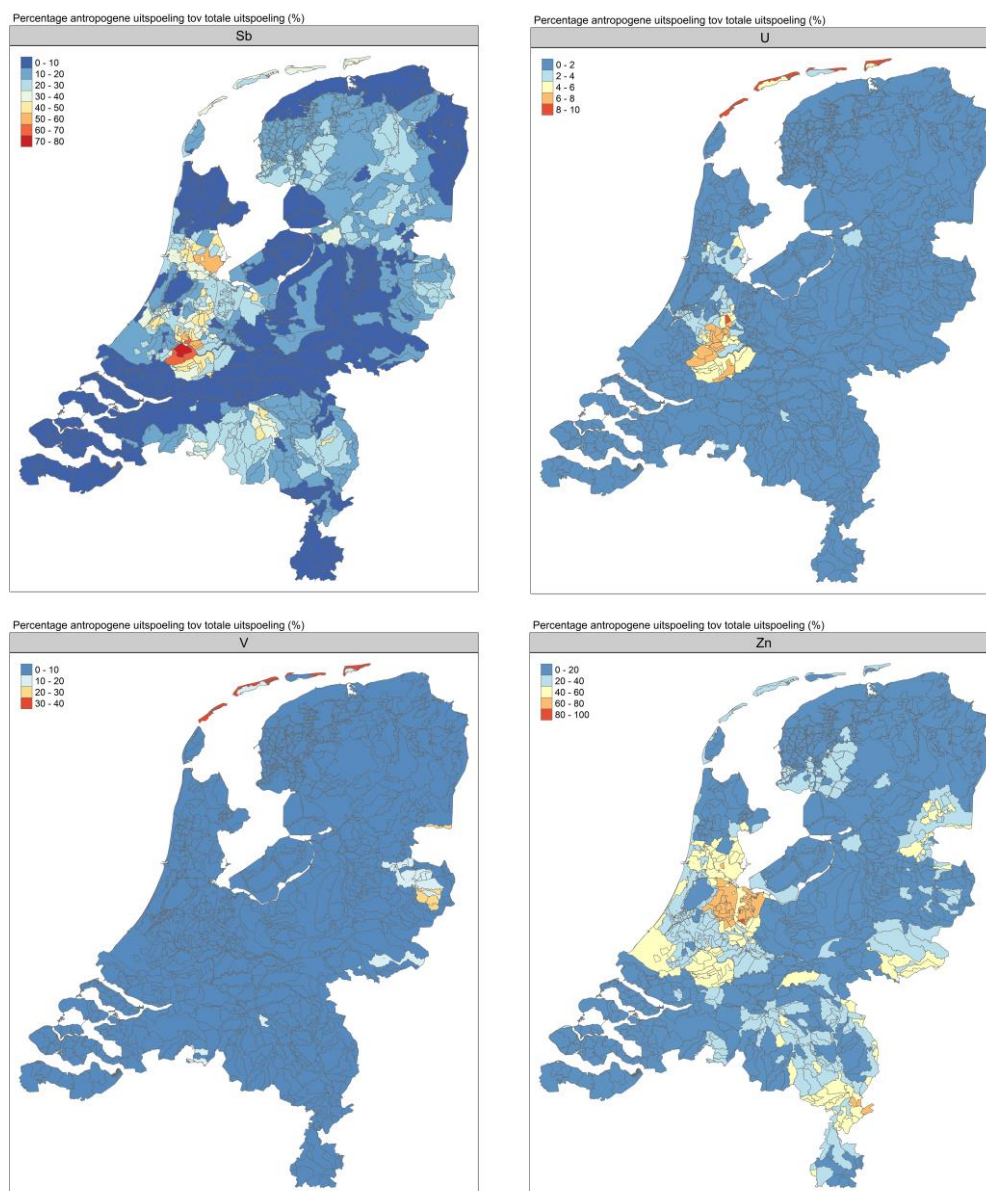
Noot: de schaalverdeling is niet voor alle metalen dezelfde. Deze is geschaald al naargelang het aandeel van de antropogene bijdrage. Zo varieert die van 0-100% voor Cd maar van 0-3% voor Cr. Donkerblauwe kleuren geven daarbij steeds die gebieden aan waar het achtergrondgrondgehalte van de betreffende metalen het dominante aandeel levert voor de emissie van metalen. Het achtergrondgehalte is gelijk aan 100% minus de antropogene bijdrage.



Figuur 3-14 Aandeel van de antropogene belasting aan de totale emissie van As, Ba, Cd, Co, Cr en Cu naar oppervlaktewater.



Figuur 3-15 Aandeel van de antropogene belasting aan de totale emissie van Mo, Ni, Se en Pb naar oppervlaktewater.



Figuur 3-16 Aandeel van de antropogene belasting aan de totale emissie van Sb, U, V en Zn naar oppervlaktewater.

In Tabel 3-6 staat per metaal een overzicht van gebieden met een grote antropogene bijdrage aan de emissie naar oppervlaktewater. Voor de overige gebieden is de achtergronduitspoeling de dominante bron van de emissie van metalen naar oppervlaktewater.

Tabel 3-6 Gebieden met een antropogene bijdrage aan de emissie van zware metalen naar oppervlaktewater.

Metaal	Gebieden met grote antropogene bijdrage	Metaal	Gebieden met grote antropogene bijdrage
As	Niet relevant, m.u.v. Waddeneilanden ¹	Ni	Niet relevant, m.u.v. Waddeneilanden ¹
Ba	Veenweidegebied	Se	Niet relevant
Cd	Zandgrond Z-NI	Pb	Maasstroomgebied, Veluwe, Veenweide, regio Amsterdam
Co	Niet relevant	Sb	Veenweidegebied
Cr	Niet relevant	U	Veenweidegebied
Cu	Noord-Brabant, Veenweide, Waddeneilanden ¹	V	Niet relevant
Mo	Zandgronden NL, Flevopolders	Zn	Veenweidegebied, M-Limburg, O-Noord Brabant, Achterhoek, Twente

¹ Mogelijk een artefact gerelateerd aan lage databeschikbaarheid voor dit type bodem.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Landelijk

De gehalten aan zware metalen inclusief arseen in de bovengrond van de bodem zijn mede bepaald door menselijk handelen. In de bovengrond varieert het aandeel van de antropogene bijdrage aan de gehalten in de vaste fase tussen 20% voor metalen als Cr, Ni en Ba, tot meer dan 60% voor metalen als Cu, Cd, Se, Pb en Zn. Voor deze laatste groep van metalen geldt dat de antropogene bijdrage een grote invloed heeft op de concentratie in het uitspoelende bodemwater.

De totale waterflux uit de 0-30cm-laag die naar het oppervlaktewater gaat, is echter klein ten opzichte van de fluxen uit diepere bodemlagen en het grondwater. Ook is de mobiliteit van metalen als Cu en Pb relatief laag. Daarom is de invloed van de antropogene belasting op de uitspoeling uit de bovengrond op de totale emissie van metalen (uit de bovengrond, ondergrond en het grondwater) naar het oppervlaktewater gering. Alleen voor Cu (7.5%), Cd (9.5%), Pb (11%) en Zn (16%) draagt de antropogene bijdrage uit de bovengrond in significante mate bij aan de totale emissie.

In de ondergrond, de bodemlaag tussen 30 cm en GLG -1m, is voor de meeste metalen de bijdrage van de achtergronduitspoeling dominant en varieert tussen 50 en 80% (van de totale emissie uit bodem en grondwater) voor de meeste metalen. Alleen voor Cd vormt de emissie afkomstig van antropogene herkomst uit de ondergrond de dominante bron (55%), voor Zn is dit 7.9%. Vanwege de lagere mobiliteit van Cu en Pb is voor deze metalen de bijdrage van het antropogene deel uit de laag tot GLG -1m verwaarloosbaar (< 1%).

Op landelijke schaal wordt de concentratie in het bodemwater op een diepte van GLG -1m voor de meeste metalen vrijwel volledig bepaald door de natuurlijke achtergrondgehalten. Dit suggereert dat de antropogene aanrijking (nog) niet van invloed is op de gehalten aan metalen op grotere diepte. Uitzondering hierop zijn met name Cd en, in veel mindere mate, Mo en Sb. Cadmium is een van de meest mobiele zware metalen en is bovendien een van de metalen met regionaal (Brabant/Limburg) een duidelijk aanwijsbare bron. Seleen en Sb zijn relatief mobiele metalen die bovendien voornamelijk als anion in de bodem voorkomen.

Voor zowel Se als Sb (en ook voor Co en Mo) moeten de resultaten met voorbehoud geïnterpreteerd worden, omdat de kwaliteit van de modellen voor de berekening van de gehalten aan metalen in bodem en bodemwater laag is.

Voor Zn zijn meer data in de Kempen nodig om de bijdrage van de antropogene belasting in dit gebied te kunnen kwantificeren. Voor Zn is het waarschijnlijk dat de gehalten in de ondergrond in de Kempen beïnvloed zijn door de industriële emissie van Zn. In de database die is gebruikt voor het maken van de landelijke kaartbeelden voor Zn zijn voor deze regio weinig data voorhanden. Zo bedraagt het maximale Zn-gehalte in de ondergrond in de database die ten grondslag ligt aan de kaart 26 mg kg⁻¹, wat voor deze regio duidelijk een te lage waarde is. Hierdoor is het berekende aandeel van de antropogene belasting in de Kempen zeer waarschijnlijk onderschat.

Resumerend is op landelijke schaal de bijdrage van de achtergrondgehalten op de emissie naar oppervlaktewater dominant (> 95%) voor As, Ba, Co, Cr, Ni, Se, U, en V. Voor Cu, Pb en Sb geldt dat ook, alhoewel de bijdrage van de achtergronduitspoeling afneemt van 80 tot 95% en tot 50 à 80% voor Zn en Mo. Dit met het voorbehoud dat voor Zn de antropogene bijdrage aan de emissie in de Kempen en omstreken onderschat is. Alleen voor Cd geldt dat de bijdrage van de achtergronduitspoeling (35%) kleiner is dan die van de antropogene bepaalde uitspoeling (65% van de totale emissie).

4.2 Regionaal

Zoals uit de landelijke data blijkt, domineert de bijdrage van de natuurlijke achtergronduitspoeling in veel gevallen de totale emissie. Voor de metalen As, Co, Cr, Ni, Se, en V is er ook nauwelijks sprake van regionale variatie in de bijdrage van achtergrond- vs. antropogene uitspoeling en wordt de totale emissie grotendeels (>99%) bepaald door de achtergrondgehalten aan metalen in de bodem.

Regionale afwijkingen op dit beeld zijn te zien voor Ba, Cd, Cu, Mo, Pb, Sb, U en Zn. Daarbij vallen vooral de bijdragen van de antropogene emissies op in het Veenweidegebied (voor Ba, Cu, Sb, U en Zn) en in Zuidoost-Nederland (voor Cd, Cu, Mo, Pb en Zn). Voor deze gebieden is er een duidelijke link met antropogene bronnen van metaalaccumulatie in de bodem door – deels historische – industriële activiteiten (Cd, Zn, Pb) en landbouw (Cu, Zn, Cd). De verhoogde antropogene bepaalde emissie in het Veenweidegebied is daarbij het gevolg van verhoogde gehalten in de bodem (o.a. door het gebruik van toemaak) en de hoge grondwaterstanden, waardoor er een hoger aandeel van de emissie uit de bovengrond kan optreden.

De resultaten van de emissie uit de 0-30cm-laag van de bodem laten zien dat de invloed van het huidige landgebruik, met name het gebruik van dierlijke mest en/of kunstmest als bron van Cd, Cu en Zn, invloed heeft op de totale emissie. Deze bijdrage varieert van 8% voor Cu en 10% voor Cd tot 16% voor Zn. Deze percentages zijn laag wanneer we de totale antropogene voorraad van deze metalen in de bodem beschouwen (zo'n 60 tot 80% van de totale voorraad). Dat suggereert dat het merendeel van de voorraad van metalen afkomstig van menselijk handelen nog steeds in de bodem aanwezig is. Maatregelen die met name de aanvoer van metalen via mest reduceren, zullen dus ook pas op langere termijn een invloed hebben, omdat de totale bodemvoorraad voorlopig zo groot is dat de huidige concentraties (en daarmee de huidige emissies) via uitspoeling weinig zullen veranderen.

4.3 Discussie en Aanbevelingen

Voor het merendeel van de hier onderzochte metalen lijkt de totale emissie naar oppervlaktewater momenteel in hoge mate bepaald te worden door de van nature in de bodem aanwezige metalen.

Voor Mo en Co, en in mindere mate Se en Sb, moeten de resultaten (en zeker de regionale verdeling van de emissie) vanwege modelonzekerheden met voorbehoud geïnterpreteerd worden.

Verder komen regionaal, bijvoorbeeld op de Waddeneilanden, afwijkende, veelal hogere bijdragen voor van de antropogene bepaalde emissie (o.a. voor Ni, U, Se, V). In hoeverre dat realistisch is, kan op grond van dit model niet bepaald worden. Feit is dat modelvoorspellingen in dit type bodem (kalkrijke zandgronden) vaak een hoge mate van onzekerheid kennen. Deels omdat dit type bodem maar zeer beperkt voorkomt in de databases op grond waarvan het model afgeleid is, anderzijds ook omdat de concentraties in bodemwater vaak heel laag zijn, deels lager dan de detectiegrens, wat leidt tot een hogere mate van modelonzekerheid in dit soort gronden.

Dit soort afwijkingen wordt onder meer ook gevonden voor de concentratie op GLG -1m voor Zn (rondom Amsterdam) en Cd (Randmeren). Dit kan een gevolg zijn van enkele metingen met afwijkende gemeten gehalten die een onevenredige invloed hebben op onder meer de gebruikte concentraties voor uitspoeling uit de diepere lagen in de bodem.

Toepassing van de in dit rapport gepresenteerde modellen voor de berekening van het achtergrondgehalte en de daarop gebaseerde berekening van de antropogene bijdrage aan de uitspoeling werkt voor de meeste metalen redelijk tot goed. Dat geldt met name voor bodems zonder specifieke (lokale of regionale) antropogene verontreiniging en voor de bovengrond in zijn algemeenheid.

Voor bodems die sterk onder invloed staan of hebben gestaan van door de mens veroorzaakte verontreiniging (lokaal dan wel regionaal) is er behoefte aan meer data en een betere onderbouwing dan wel validatie van het modelconcept, met name waar het gehalten aan metalen in de ondergrond betreft (o.a. Zn).

Het model voor de berekening van de bijdrage van de achtergronduitspoeling is in eerste instantie geschikt voor toepassing op landelijke schaal, d.w.z. voor Nederland als geheel of voor de vier grote afwateringseenheden. Als de methode zoals beschreven in het rapport uit 2022 en deze rapportage ook toegepast wordt op regionale schaal, dan gelden de volgende aanbevelingen of acties voor de verbetering van onderliggende relaties en betrouwbaarheid van modelvoorspellingen:

1. *Verrichten van additionele metingen voor Co, Mo in de bodem* ter verbetering van het ruimtelijke beeld van de gehalten aan reactieve metalen in de bovengrond. Op dit moment is het aantal datapunten voor metalen als Co en Mo zeer beperkt of van matige kwaliteit. Dit maakt dat het ruimtelijke beeld van de metalen in de bovengrond en de ondergrond feitelijk een hoge mate van onzekerheid kent.
2. *Genereren van data ter validatie van de berekening van het achtergrondgehalte aan metalen in de bodem.* Met name de ondergrond (> 30 cm) draagt in hoge mate bij aan de emissie van metalen naar oppervlaktewater, maar het aantal – en de kwaliteit van – data om een goede landelijke dekking te maken van deze achtergrondgehalten is zeer beperkt. Aanbevolen wordt daarom om van diepere bodemlagen het gehalte aan 0.43 N HNO₃ extraheerbaar metaal in combinatie met het gehalte aan oxiden en pH te bepalen in een brede range van typische bodemtypen in Nederland. Het verrichten van aanvullende metingen in al eerder verzamelde representatieve monsters in een landelijke dekkend bestand (o.a. Landelijke Steekproef Kaarteenheden; Finke et al., 2001) kan daarbij een praktische aanpak zijn.
3. *Validatie van het model voor de berekening van de concentratie in het bodemwater* voor een aantal metalen voor de typische bodemtypen in Nederland. Vooral voor Mo, Se, Sb is de kwaliteit van de data voor het afleiden van modellen voor de berekening van de concentratie in bodemwater beperkt, zeker in combinatie met lage gehalten in de bodem en bodemwater.
4. *Validatie van modelvoorspellingen voor alle metalen in sterk afwijkende bodemtypen*, zoals kalkrijke zandgronden (o.a. Waddeneilanden) en lössgronden (Zuid-Limburg). Voor deze bodemtypen zijn, vergeleken met andere bodemtypen, weinig data voorhanden. Datzelfde geldt voor gebieden waar sprake is van een duidelijk regionale beïnvloeding van het metaalgehalte. Dat betreft onder meer Zn in de Kempen en omliggende gebieden.

Literatuur


- Bolt, F.J.E. van der, T. Kroon, P. Groenendijk, L.V. Renaud, J. van den Roovaart, C.M.C.M. Janssen, S. Loos, P. Cleij, A. van den Linden en A. Marsman, 2020. Het Landelijk Waterkwaliteitsmodel: Uitbreiding van het Nationaal Water Model met waterkwaliteit ten behoeve van berekeningen voor nutriënten. Wageningen, Wageningen Environmental Research rapport 3005.
- Bolt, F.J.E., van der, en P.F.A.M. Römkens (red.), 2022. LWKM zware metalen; Emissieberekeningen voor de EmissieRegistratie 1990-2019. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3139.
- De Vries, W., P.F.A.M. Römkens, & J.C.H. Voogd, 2004. Prediction of the long term accumulation and leaching of zinc in Dutch agricultural soils: a risk assessment study. Alterra-report; No. 1030. <https://edepot.wur.nl/41912>
- Finke, P.A., J.J. de Gruijter en R. Visschers, 2001. Status 2001 Landelijke Steekproef Kaarteenheden en toepassingen; Gestructureerde bemonstering en karakterisering Nederlandse bodems. Wageningen, Alterra, rapport 389.
- Galen, F., van, L. Osté en E. Van Boekel, 2020. Nationale analyse waterkwaliteit. Onderdeel van de Delta-aanpak Waterkwaliteit. PBL Planbureau voor de Leefomgeving. Den Haag. PBL-publicatienummer: 4002.
- Mol, G., J. Spijker, P. van Gaans en P.F.A.M. Römkens. 2012. Geochemische bodematlas van Nederland. Wageningen Academic Publishers, 276 pp., ISBN 9789086861866.
- Lamé, F.P.J., D.J. Brus, en R.H. Nieuwenhuis, 2004. Achtergrondwaarden 2000. Hoofdrapport AW2000 fase 1. TNO-rapport, NITG 04-242-A.

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3280
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.



To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3280
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

