



Kennisnotitie

## Gevoeligheidsanalyse parameters voor kritische emissiewaarden bij uitloging uit bouwstoffen

### Inleiding

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft het voornemen om de komende jaren een herijking uit te voeren van de bodemregelgeving. De herijking moet resulteren in een vernieuwing en verbetering van de bodemregelgeving. Als onderdeel van de herijking is het normeringskader voor de toepassing van bouwstoffen door het RIVM gereconstrueerd en geëvalueerd. Een onderdeel van de evaluatie is om te beoordelen of het verbeteren van de methode van de uitloogmodellering van stoffen uit bouwstoffen een rol kan vervullen bij het oplossen van de ervaren knelpunten bij het hergebruik van bouwstoffen in de praktijk. Daarmee biedt deze evaluatie inzichten voor de herijking van de bodemregelgeving.

In het rapport van Brand et al. (2024) wordt de reconstructie en evaluatie van het normeringskader voor het hergebruik van bouwstoffen beschreven. Daarnaast zijn knelpunten en verbeterpunten bij de beoordeling en het gebruik van bouwstoffen in de praktijk verkend. In hoofdstuk 3 van die rapportage wordt de impact van de modelparameters op de door Verschoor et al. (2006) afgeleide kritische emissiewaarden (KEW) bij uitloging uit niet-vormgegeven bouwstoffen gepresenteerd. De weergave in het rapport heeft als doel om beleidsmakers een overzicht te geven van de invloed van modelparameters, zodat duidelijk is waar inhoudelijke of beleidsmatige verbeteringen de meeste impact hebben.

Deze kennisnotitie is de kwantitatieve onderbouwing van de impact van verschillende parameters op de uitloging en het stoftransport door de onverzadigde zone en daarmee de invloed op de KEW. Dit wordt gedaan door de methode toe te lichten en de kwantitatieve invloed op de KEW die zijn berekend met het model HYDRUS-1D te presenteren. Deze kennisnotitie moet daarom in samenhang met de rapportage van Brand et al. 2024 worden gezien.

### Nut kritische emissiewaarden

Binnen het doel van een circulaire economie in 2050 wordt gestreefd naar het hergebruik van zoveel mogelijk producten, waaronder ook bouwmaterialen. Secundaire bouwstoffen komen voort uit oude werken of reststromen van productieprocessen. Deze bouwstoffen bevatten stoffen die in potentie kunnen uitspoelen na toepassing van de bouwstof waardoor negatieve effecten op mens en milieu kunnen optreden. Om dit te voorkomen zijn chemische kwaliteitseisen ontwikkeld waar zowel primaire als secundaire bouwstoffen aan moeten voldoen voordat zij mogen worden toegepast. Deze eisen staan in het Besluit- en Regeling bodemkwaliteit (2022). Zo wordt een vaste set chemische eigenschappen getest om te zien of de bouwstof veilig toegepast kan worden.

### RIVM

Antonie van  
Leeuwenhoeklaan 9  
3721 MA Bilthoven  
Postbus 1  
3720 BA Bilthoven

T 088 689 91 11  
www.rivm.nl

### Auteurs:

J.M. van Genuchten  
R. Vis

### Centrum:

Centrum Duurzaamheid,  
Milieu en Gezondheid (DMG)

### Contact:

Ellen Brand  
ellen.brand@rivm.nl

### Kenmerk:

KN-2024-0028

DOI: 10.21945/RIVM-KN-  
2024-0028

### Datum:

12 juli 2024

Eén van de chemische eisen waar bouwstoffen aan moeten voldoen is de maximale emissiewaarde (MEW). Dit is de wettelijke maximale hoeveelheid van een stof die uit een bouwstof mag treden (mg/kg d.s.) in een kolomproef. Deze beleidsmatige waarde wordt deels<sup>1</sup> bepaald door een wetenschappelijk onderbouwde waarde: de kritische emissiewaarden (KEW). De KEW zijn door het RIVM en het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) in 2006 afgeleid en beschreven in Verschoor et al. (2006). Het doel van de MEW is om secundaire bouwstoffen te kunnen hergebruiken zonder het milieu te veel te belasten.

### ***Doelstelling***

De doelstelling van deze kennisnotitie is om een kwantitatief onderbouwd overzicht te geven van de invloed van de modelparameters op de wetenschappelijk voorgestelde KEW voor niet-vormgegeven bouwstoffen en om aan te geven hoe de huidige keuzes onderbouwd zijn binnen het beleidsmatig gekozen standaardscenario. Dit is gedaan door:

- 1) Te analyseren en kwantificeren wat de invloed is van individuele modelparameters op de KEW.
- 2) Voor iedere geëvalueerde parameter vast te stellen of deze beleidsmatig of inhoudelijk onderbouwd is.

### ***Afbakening kennisnotitie***

#### *Geen modevaluatie*

Een breed scala aan numerieke modellen is beschikbaar om stoftransport in de bodem te modelleren. De kennisnotitie focust niet op het evalueren van het gebruikte model, maar enkel op het verkennen van de gevoeligheid van de uitkomsten voor de input parameters.

#### *Standaardscenario*

Om wille van een eenduidig toetsingskader, is er in 2006 beleidsmatig voor gekozen om alle soorten bouwstoffen en toepassingen middels één standaardscenario in Nederland te beoordelen. Binnen dit standaardscenario worden een set vaste waarden voor verschillende invoer/modelparameters gebruikt. Uit de verschillende scenario's die zijn onderzocht door Verschoor et al. (2006) is door het voormalige ministerie van VROM (voorganger Ministerie Infrastructuur en Waterstaat) één standaardscenario geselecteerd. Het standaardscenario voor niet-vormgegeven bouwstoffen is gebruikt voor de berekeningen van de KEW en dient als uitgangspunt voor de selectie van de parameters die in deze kennisnotitie worden beschouwd.

#### *Metalen/Metalloïden*

In de gevoeligheidsanalyse worden de metalen en metalloïden van de Regeling bodemkwaliteit (Bijlage A; Tabel 1), onderzocht: antimoon (Sb), arseen (As), barium (Ba), cadmium (Cd), chroom (Cr), kobalt (Co), koper (Cu), kwik (Hg), lood (Pb), molybdeen (Mo), nikkel (Ni), seleen (Se), tin (Sn), vanadium (V) en zink (Zn). De stoffen bromide (Br), chloride (Cl), fluoride (F) en sulfaat (SO<sub>4</sub>), waarvoor ook in deze tabel KEW zijn genoteerd, zijn buiten beschouwing gelaten.

### ***Methode***

#### ***Stoftransport: Hydrus-1D***

De door Verschoor et al. (2006) berekende KEW zijn voor verschillende toepassingsscenario's berekend met de modellen PEARL en ORCHESTRA. Met deze

<sup>1</sup> Uit de evaluatie van Brand et al. 2024 blijkt dat slechts een deel van de wettelijke MEW voor uitloging gebaseerd is op de wetenschappelijk voorgestelde KEW zoals gerapporteerd in Verschoor et al. (2006). Voor de overige stoffen is er beleidsmatig voor gekozen om de voorgestelde KEW uit Verschoor et al. (2006) aan te scherpen of te verruimen.

modellen is het mogelijk het transport van uitlopende stoffen in de ondergrond uit bouwstoffen te berekenen. In deze kennisnotitie wordt de impact van de parameters geëvalueerd aan de hand van het model HYDRUS-1D (Šimůnek et al. 2008). In Negash & Verschoor (2022) is reeds gevalideerd dat dezelfde uitkomsten worden verkregen met HYDRUS als met PEARL bij gelijkwaardige input. Daarom is in deze kennisnotitie het stoftransport in de onverzadigde zone gemodelleerd met HYDRUS uitgaande van het standaardscenario volgens de PEARL-methode.

Door de Technische Commissie Bodembescherming (TCB) is in 2006 al geconstateerd dat de keuze tussen de modellen PEARL en ORCHESTRA van minder doorslaggevende invloed is op de berekende KEW. De hiervoor gegeven verklaring is dat de kwaliteit van diverse invoerparameters van grotere invloed is (TCB, 2006). Daarom ligt in deze kennisnotitie de focus op de invloed van zowel de inhoudelijke als beleidsmatige parameters die de modeluitkomsten beïnvloeden en niet op de gehanteerde modellen zelf.

### **Berekening kritische emissiewaarde**

Met HYDRUS wordt het stoftransport berekend aan de hand van de ingevoerde gegevens. Zowel de modelberekeningen als de formules worden beïnvloed door de gekozen invoerparameters. De uitkomst in de vorm van een concentratie op de vastgestelde toetspunten (vaak aangeduid met "Point of Compliance") binnen de compartimenten bodem en grondwater, ligt ten grondslag aan de berekening van de kritische immissiewaarde (Formule 1). Deze wordt gebruikt voor de berekening van de kritische emissiewaarde (Formule 2).

$$\text{Formule 1: } \textit{Kritische immissiewaarde} = MTT * \frac{\textit{Standaard emissie}}{\textit{concentratie toetspunt}}$$

Waarin:

*Kritische immissiewaarde:* De limiet voor de massa verontreinigende stof per vierkante meter bodem dat infiltreert na uitloging uit een bouwstof ( $\text{mg m}^{-2}$ ).

*MTT:* Maximaal toelaatbare toevoeging per stof voor bodem ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) of grondwater ( $\text{mg l}^{-1}$ ).

*Standaardemissie:*  $100 \text{ mg m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$ .

*Concentratie toetspunt:* De met HYDRUS-1D berekende concentratie voor het toetspunt in bodem of grondwater bij de standaardemissie.

$$\text{Formule 2: } \textit{Kritische emissiewaarde} = \frac{\textit{Kritische immissiewaarde} * (1 - e^{-\kappa * 10})}{\rho * h * (1 - e^{-\kappa * \frac{Ni * t}{\rho * h}})}$$

Waarin:

*Kritische emissiewaarde:* De limiet voor de massa van een verontreinigende stof die uitloopt per massa-eenheid van een bouwstof ( $\text{mg kg}^{-1} \text{ d.s.}$ )

*$\kappa$ :* De uitloogconstante (kappa) is de mate waarin de emissie afneemt.

*Ni:* Effectieve neerslag ( $\text{mm jaar}^{-1}$ ).

*t:* Tijd (jaar).

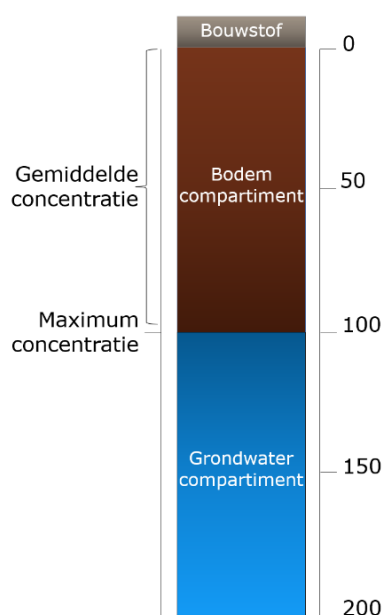
*$\rho$ :* Dichtheid van de bouwstof ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

*h:* Toepassingshoogte (m).

Voor de berekening van de KEW wordt als toetspunt in het bodemcompartiment de gemiddelde concentratie in de bovenste meter van de onverzadigde zone genomen. In het grondwatercompartiment is dit de maximale concentratie in de bovenste meter van

de verzadigde zone (Figuur 1). Het compartiment (i.e. bodem of grondwater) met de laagste KEW is leidend, waardoor altijd beide compartimenten beschermd zijn.

*Figuur 1 Conceptuele weergave van de compartimenten bodem en grondwater. Linkerzijde profiel; toetspunt compartiment bodem (gemiddelde concentratie) en grondwater (maximum concentratie). Rechterzijde profiel; diepte in cm.*



### **Parameters uitloogmodellering**

Bij de parameters van de uitloogmodellering kan onderscheid worden gemaakt in een tweetal categorieën:

- **Inhoudelijk onderbouwde parameters.** Deze zijn meetbaar, kunnen experimenteel worden vastgesteld en zijn veelal wetenschappelijk onderbouwd. De parameters zijn een vereenvoudiging van de realiteit om scheikundige of natuurkundige processen te kunnen modelleren.
- **Beleidsmatig gekozen parameters.** Deze kunnen niet worden gemeten maar worden mede bepaald door het beschermingsniveau dat men wenst te bereiken. Beleidsmatige parameters zijn daarom (noodzakelijk) subjectief. Dit zijn aannames en daardoor een vereenvoudiging van het gebruik van bouwstoffen in realiteit.

Hieronder worden de parameters binnen het standaardscenario voor niet-vormgegeven bouwstoffen toegelicht en worden de standaardwaarden gegeven die ten grondslag liggen aan de bestaande KEW. Daarnaast worden hieronder ook de gehanteerde (mogelijke) variaties van de parameters gegeven op basis waarvan de gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd. In deze notitie is telkens de invloed van één parameter geanalyseerd door deze enkele parameter aan te passen en de resulterende KEW te vergelijken met de KEW volgens het standaardscenario.

### **Inhoudelijke parameters en gekozen variatie**

#### *Partitiecoëfficiënt*

Het evenwicht tussen een stof in opgeloste toestand en die in de geadsorbeerde toestand wordt aangegeven met de partitiecoëfficiënt. De concentratie waarin een stof in

opgeloste of gebonden fase voorkomt is stofafhankelijk en heeft invloed op de transportsnelheid. In tegenstelling tot ORCHESTRA, is voor HYDRUS en PEARL lineaire adsorptie toegepast. In deze vereenvoudigde benadering wordt aangenomen dat de mate van adsorptie onafhankelijk is van de concentratie waarin het metaal voorkomt, de pH, de redoxomstandigheden en de interactie met andere stoffen. Een hoge partiticoëfficiënt is representatief voor stoffen die zich makkelijk binden aan, en ophopen in, de bodem. Bij een lage partiticoëfficiënt spoelen stoffen sneller uit naar het grondwater. De partiticoëfficiënten in het model zijn gebaseerd op meerdere onderzoeken die de adsorptie van verschillende stoffen in verschillende bodems hebben bestudeerd (De Groot et al. 1998; Buchter et al. 1989; Ambrose, 1999; Bockting, 1992; Sauvé et al. 2000; Baes et al. 1984). Verschoor et al. (2006) hebben de partiticoëfficiënt reeds geëvalueerd (zie Tabel 5.5 in Verschoor et al. 2006). De gevoeligheid van de KEW voor variaties op deze parameter is niet opnieuw geëvalueerd met HYDRUS, omdat dit nagenoeg tot dezelfde resultaten zou leiden als Verschoor et al. (2006).

#### *Uitloogconstante*

De uitloogconstante ( $\kappa$ ) dient als vertaling van de mate waarin de emissie uit een bouwstof afneemt over tijd. In realiteit is de uitloogconstante stof- en bouwstof specifiek, echter wordt voor de generieke benadering enkel rekening gehouden met de stof-specifieke uitloogconstante en wordt verondersteld dat dit voor iedere bouwstof hetzelfde is. Hierdoor is het beleid eenvoudiger dan wanneer er voor iedere combinatie van bouwstof en stof apart een  $\kappa$  en dus ook KEW zou gelden. Er wordt uitgegaan van een standaard uitloogconstante voor elke stof gebaseerd op het gemiddelde gedrag van een reeks bouwstoffen. De  $\kappa$  is binnen het standaardscenario gebaseerd op een dataset van gemiddeld 83 kolomproeven per stof (de Wilde, 1998). Voor de gevoeligheidsanalyse van de uitloogconstante is een verhoogde en een verlaagde  $\kappa$  toegepast om de invloed op de KEW te kunnen beoordelen. Hiervoor is de gemiddelde  $\kappa$  per stof berekend plus of min een standaarddeviatie om een realistische spreiding van deze  $\kappa$  te testen. Dit resulteerde in een verlaagde  $\kappa$  van 0,003 (minimum positieve waarde) en de verhoogde  $\kappa$  van 0,551 (maximumwaarde) voor iedere stof in de afleiding van de KEW.

#### *Grondwaterspiegel*

De diepte van de grondwaterspiegel is standaard gekozen op 1 meter onder maaiveld (m-mv) maar in Nederland zijn grote verschillen terug te vinden in grondwaterstanden. Zo is er voor Nederland gemiddeld een minder diepe grondwaterstand in West-Nederland en een diepere in Oost-Nederland. Hierdoor kan de KEW voor West-Nederland te ruim uitvallen en voor Oost-Nederland te streng. Gebaseerd op de dataset (52646 grondwaterstanden) van de Geologische Dienst Nederland, kunnen grondwaterstanden in Nederland worden afgeleid (Grondwatertools, 2024). Zowel het P25 als het P75 liggen met, respectievelijk, 0,34 en 0,92 m-mv minder diep dan de standaard gebruikte grondwaterspiegel van 1m-mv. Dit geeft aan dat de maximum concentratie naar verwachting gemiddeld sneller het grondwater zal bereiken dan waar nu rekening mee wordt gehouden. Het analyseren van een dieper grondwaterpeil is niet gedaan omdat dit gezien de data minder waarschijnlijk is. De impact van de grondwaterspiegel op de KEW is geanalyseerd middels het standaardscenario waarbij het grondwaterpeil is aangepast naar 0,34 (P25) en 0,59 (P50) m-mv.

#### *Neerslag en verdamping*

De in 2006 gebruikte effectieve neerslag van 300 mm jaar<sup>-1</sup> is afgeleid van het jaargemiddelde in 1985 dat 271 mm bedraagt. Dit is bepaald aan de hand van klimaatdata van het KNMI over de periode 1981-2000. In de effectieve neerslag is de

verdamping meegenomen. Vervolgens is deze klimaatdata in het model herhaald voor een tijdsperiode van 100 jaar waarover het uitlogingsgedrag van de bouwstof wordt gemodelleerd. Daarmee worden mogelijke afwijkingen in de effectieve neerslag ieder jaar opnieuw gebruikt. Recentelijk heeft het KNMI de KNMI'23-klimaatscenario's uitgebracht met verwachtingen voor het klimaat in 2100 (KNMI, 2023). Hierin zijn 4 verschillende scenario's uitgewerkt die zich baseren op toekomstige projecties met een hoge of lage CO<sub>2</sub> uitstoot en vernatting of verdroging van het klimaat. De scenario's worden onder andere gekenmerkt door een verandering in neerslag en verdamping die in het uitlogingsmodel kunnen worden aangepast. Voor de scenario's met een hoge uitstoot en droog scenario (Hd) wordt een verandering in neerslag verwacht van -3% en voor verdamping +17%. Dit resulteert in een effectieve neerslag van 169 mm jaar<sup>-1</sup>. Daarnaast wordt voor het hoge uitstoot en natte scenario (Hn) een verandering in neerslag verwacht van +8% en voor verdamping +11%. Dit resulteert in een effectieve neerslag van 306 mm jaar<sup>-1</sup>. Deze twee klimaatscenario's zijn gekozen op basis van de hoogste veranderingen in neerslag en verdamping (worst case). In de gevoeligheidsanalyse is de klimaat data aangepast naar deze toekomstige scenario's om de invloed van de neerslag en verdamping te kunnen berekenen op de KEW.

### **Beleidsmatige parameters en gekozen variatie**

#### *Tijdraam*

De cumulatieve emissie en het stoftransport wordt gemodelleerd over een periode van 100 jaar. Dit tijdraam is gekozen, omdat in de wetgeving is opgenomen dat een bouwstof binnen 100 jaar terugneembaar moet zijn. Deze verplichting kan als randvoorwaardelijk worden beschouwd. In de gevoeligheidsanalyse is de invloed van het tijdraam van 1000 jaar met dat van 100 jaar vergeleken. In deze analyse zijn geen tijdramen korter dan 100 jaar onderzocht.

#### *Milieucriterium*

Voor zowel bodem en grondwater is de Maximaal Toelaatbare Toevoeging<sup>2</sup> voor ecologie (MTT<sub>eco</sub>) als geaccepteerde risicogrenswaarde gekozen. De MTT<sub>eco</sub> zijn bepaald voor verschillende metalen en metalloïden door Verbruggen et al. (2001). De gemodelleerde concentratie mag het MTT<sub>eco</sub> voor bodem en grondwater niet overschrijden. Sinds 2006, het jaar waarin de KEW zijn berekend, is voor een aantal stoffen de MTT<sub>eco</sub> herzien voor het compartiment bodem of grondwater. Voor de gevoeligheidsanalyse wordt de invloed van deze herziende MTT<sub>eco</sub> waarden afgeleid. Stoffen waarvan de MTT<sub>eco</sub> is herzien, maar die niet het gevoeligste compartiment bepalen, zijn niet relevant voor deze kennisnotitie en daarmee dus niet opgenomen.

#### *Toepassingshoogte*

De laagdikte van een ophoog- of funderingstoepassing met een bouwstof is beleidsmatig bepaald op 0,5 m. Echter is in de wetgeving geen beperking gesteld op de daadwerkelijke toepassingshoogte. In de praktijk is vaker sprake van een dikkere toepassing. Uit de knelpuntenanalyse van Brand et al. (2024) blijkt ook dat juist bij toepassingen met een grotere laagdikte vaker ongewenste milieueffecten worden geconstateerd. Bij een dikkere toepassingshoogte neemt de berekende cumulatieve emissie toe. Daarom is 0,5 m als standaard een onderschatting van de toepassingshoogte die in de praktijk wordt gezien. In deze gevoeligheidsanalyse is de invloed van de toepassingshoogte op de KEW onderzocht binnen het bereik van 0,5 m en 15,0 m. Dit is gekozen omdat dunnere en dikkere toepassingen niet vaak voorkomen.

<sup>2</sup> Bij dit risiconiveau is 95% van de organismen en natuurlijke processen beschermd tegen ongewenste effecten.

### *Bouwstofdichtheid*

In Verschoor et al. (2006) is voor niet-vormgegeven bouwstoffen uitgegaan van een vaste dichtheid van  $1.550 \text{ kg m}^{-3}$ . Deze standaard is oorspronkelijk uit het voormalige Bouwstoffenbesluit overgenomen in het Besluit bodemkwaliteit. De dichtheid kan per bouwstof zeer uiteenlopen en daarmee leiden tot een significante onder- of overschrijding van de KEW. In deze gevoeligheidsanalyse is de invloed van de gekozen dichtheid op de KEW onderzocht binnen het bereik van 200 (schuimglas) en  $2200 \text{ kg m}^{-3}$  (staalslak). Deze dichtheden zijn gekozen, omdat zij zich bevinden op het uiterste bereik van bekende bouwstoffen.

### ***Voorgaande parameterevaluaties***

Binnen het kader van de uitloging uit grond en bouwstoffen in Nederland zijn voornamelijk de studies van Verschoor et al. 2006, Spijker et al. 2009, Comans et al. 2014 en Negash en Verschoor, (2022) relevant voor deze kennisnotitie, omdat deze studies een gedeeltelijke of directe overeenkomst hebben met de methodiek. Deze onderzoeken bestuderen de modellen voor uitloging uit grond of bouwstoffen en stoftransport door de bodem. Daarnaast wordt de gevoeligheid van de modellen met betrekking tot verschillende gekozen invoerparameters geëvalueerd. De voorgaande evaluaties laten zich moeilijk vangen in een kwantitatief totaaloverzicht. Reden hiervoor is dat de verschillende auteurs andere invoerparameters hebben geëvalueerd. Ook is het onderzochte effect niet altijd voor dezelfde uitkomst gemodelleerd. Verschoor et al. (2006) en Comans et al. (2014) hebben de gevoeligheid uitgedrukt als (geschatte) factor over- en onderschrijding op de berekende KEW. Terwijl Spijker et al. (2009) en Negash en Verschoor (2022) de gevoeligheid hebben uitgedrukt als het effect op de berekende stof concentraties in bodem en het grondwater. Dit hoofdstuk beschrijft daarom kort de eerdere bevindingen, omdat deze van belang zijn voor het beoordelen van de invloed van gemaakte keuzes ten aanzien van de modelinvoer. Omdat de KEW worden voorgelegd aan beleidsmakers is in deze kennisnotitie gekozen om de KEW als uitgangspunt te nemen en hierop de gevoeligheidsanalyse uit te voeren. Deze kennisnotitie vormt een aanvulling op de voorgaande studies.

### *Verschoor et al. (2006)*

Bij de afleiding van de KEW zijn door Verschoor et al. (2006) een aantal keuzes en aannames beoordeeld aan de hand van het transportmodel PEARL. De impact van de toetsdiepte, toetsperiode (ook wel tijdraam), toepassingshoogte, uitloogconstante en de bindingseigenschappen van stoffen aan de bodem zijn onderzocht. Allereerst wordt voor de toetsdiepte geconcludeerd dat hogere immisiewaarden worden afgeleid (factor 4) bij de gemiddelde concentratie in de bovenste meter bodem over 100 jaar vergeleken met maximale concentratie bodem in de bovenste 30 cm. Dit geldt voor stoffen waarvan de bodem het kritische compartiment is. Immisiewaarden op basis van het maximum voortschrijdend gemiddelde over 20 jaar kunnen ruimer uitvallen (factor 4,9) vergeleken met de maximumconcentratie in een jaar. Dit geldt voor stoffen waarvan het grondwater het kritische compartiment is. Ten tweede leidt een langere tijdsperiode bij de meeste stoffen tot strengere KEW. Ten derde wordt beschreven dat de invloed van de uitloogconstante (bereik: 0,1–1) en toepassingshoogte (bereik: 0,5–5 m) voor bodem zeer gering is. Daarnaast worden voor grondwater hogere concentraties berekend bij hogere uitloogconstanten en dunnere toepassingshoogtes. Tot slot wordt voor de bindingseigenschappen met een range aan adsorptiecoëfficiënten berekend waardoor de emissie enkele ordes van grootte kan variëren.

*Spijker et al. (2009)*

Het onderzoek van Spijker et al. (2009) geeft inzicht in gevoeligheden en onzekerheden van de modelvoorspellingen met ORCHESTRA naar de uitloging van stoffen uit en verspreiding door de bodem. Dit is een andere modelbenadering dan de in deze kennisnotitie gebruikte PEARL/HYDRUS-benadering, maar geeft voortsnog aanvullende inzichten in de gevoeligheid van de uitkomsten. In deze gevoelighedsanalyse zijn de parameters voornamelijk gekoppeld aan het onderzochte bodemtype. Geconcludeerd wordt dat de opbouw van lagen in het bodemprofiel zeer bepalend is voor de berekende concentraties. De variatie van de concentraties is 2 tot 4 ordegrottes tussen verschillende bodemtypen en ongeveer 1 ordegrootte door de parameters binnen een bodemtype. Hierbinnen is het effect van de pH en het opgeloste organische stofgehalte (DOC) groot en zijn de ijzeroxides- en kleigehaltes minder bepalend. De gevoeligheid van de KEW voor verandering in de pH en DOC-gehalten zijn in deze kennisnotitie niet getoetst.

*Comans et al. (2014)*

In deze modelmatige verkenning werd gewerkt met het model ORCHESTRA, dat in deze studie is gevalideerd voor een breed stoffenpakket op basis van laboratorium- en veldmetingen. Daarnaast is de gevoeligheid van de modeluitkomsten getoetst voor verschillende parameters en aannames. Voor het tijdraam van 100 vergeleken met 1000 jaar geldt tot een factor 50 overschrijding van het milieucriterium. Daarnaast kan het meenemen van de preferente stroming van het percolaat door de bodem in de modellering leiden tot een factor 13 overschrijding van het milieucriterium in het grondwater. De gevoeligheid van de KEW door preferente stroombanen is niet in deze kennisnotitie getoetst. Uit Comans et al. (2014) blijkt dat de KEW niet gevoelig is voor het wel of niet meenemen van dynamische waterstroming (dagelijkse neerslag/verdamping en variërend vochtgehalte). Tot slot kan de variatie in bodemeigenschappen (die bepalend zijn voor de mobiliteit van stoffen) leiden tot een bereik van concentraties op het toetspunt van een factor -50 lager tot een factor 80 hoger ten opzichte van het milieucriterium.

*Negash & Verschoor (2022)*

In dit onderzoek zijn de modellen PEARL en HYDRUS en hun uitkomsten met elkaar vergeleken. Ook is een gevoelighedsanalyse uitgevoerd naar modelparameters, zoals de toepassingshoogte, dichtheid en de uitloogconstante ( $\kappa$ ). Negash en Verschoor (2022) benadrukken het belang van een accurate partiticoëfficiënt, omdat dit, afhankelijk van de stof, bepalend kan zijn voor het uiteindelijke kritische compartiment. Daarnaast wordt ook het sterke effect van het tijdraam op de KEW toegelicht.

**Resultaten****Gevoeligheid inhoudelijke parameters***Partiticoëfficiënt*

De partiticoëfficiënt is sterk afhankelijk van locatie-specifieke omstandigheden zoals het aanwezige bodemtype en daarmee kan de binding tussen de stof en de bodem per locatie erg variëren. De grote spreiding van de partiticoëfficiënten vertaalt zich in onzekerheid voor de KEW. Naast dat de partiticoëfficiënt een grote invloed heeft op de bepaling van het meest gevoelige compartiment wordt ook verwacht dat deze in staat is de KEW met een factor 1,2 tot maximaal 400 te beïnvloeden (Verschoor et al. 2006). Deze factor wordt bepaald door bij de speling in de partiticoëfficiënt de kleinst mogelijke emissiewaarde met de grootste te vergelijken. Dit kan zowel een verstrengend als een verruimend effect zijn. Belangrijk is om te vermelden dat de mate van impact stofafhankelijk is.



### *Uitloogconstante ( $\kappa$ )*

De resultaten wijzen erop dat bij een hoge uitloogconstante de maximum concentratie eerder wordt bereikt. Voor een lage uitloogconstante geldt dit andersom. Een verlaging van de uitloogconstante leidt voor alle stoffen tot een verruiming van de KEW met een factor 2,6 tot 7,8. Een verhoging van de uitloogconstante leidt voor alle stoffen tot een verstrenging van de KEW met een factor -2,5 tot -5,9. Het effect op de KEW varieert per stof, maar is voor de stoffen waarvan het grondwatercompartiment het gevoeligste is, het sterkst.

### *Neerslag en verdamping*

De resultaten laten zien dat er een nagenoeg gelijke KEW wordt afgeleid voor veel stoffen (Tabel 1). Dit toont aan dat de invloed van de neerslag en verdamping op de KEW erg klein is. Echter is er een iets groter verruimend effect te zien voor vanadium van een factor 1,6 (klimaatscenario Hd) en 3,4 (klimaatscenario Hn). Voor antimoon is een kleine verstrenging te zien met een factor -1,7 (klimaatscenario Hd) en -1,4 (klimaatscenario Hn). Ook bij arseen wordt een verstrenging gezien van een factor -1,6 (klimaatscenario Hd). Voor deze stoffen is een afwijkende invloed op de KEW berekend omdat rond de 100 jaar nog een concentratieopbouw plaatsvindt, wat bij de andere stoffen geruime tijd ervoor of erna plaatsvindt. Hierdoor heeft dit voor die stoffen geen invloed op de KEW. De effecten kunnen in realiteit iets sterker uitvallen, omdat de klimaatprojecties van het KNMI zijn toegepast op de meteorologische data uit 1985 die ook gebruikt zijn door Verschoor et al. (2006). Vooral snog zal ook dit effect niet sterk zijn.

*Tabel 1 Invloed op de KEW van neerslag en verdamping per stof (uitgedrukt als factor), voor het KNMI'23-klimaatscenario hoge uitstoot CO<sub>2</sub> en droog klimaat (Hd) en hoge uitstoot CO<sub>2</sub> en nat klimaat (Hn), op de KEW. Grotere effecten zijn dikgedrukt.*

	<b>As</b>	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	<b>Sb</b>	Se	Sn	<b>V</b>	Zn
Hd	- <b>1,6</b>	1,0	1,0	- 1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1	- 1,0	- <b>1,7</b>	1,0	- 1,1	<b>1,6</b>	- 1,0
Hn	1,0	1,0	- 1,0	- 1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	- <b>1,4</b>	1,0	1,0	<b>3,4</b>	- 1,1

### *Grondwaterspiegel*

De berekeningen laten zien dat de KEW bijna exact gelijk zijn voor de meeste stoffen bij een grondwaterstand van 0,34 en 0,59 in vergelijking tot 1 m-mv. Een beperkt verstrengend effect op de KEW van ongeveer een factor -1,05 is gevonden voor de stoffen cadmium, kobalt, chroom, koper, nikkel, antimoon en zink, waarbij enkel voor de stof vanadium de KEW een factor -1,8 (P50) en -2,5 (P25) verstrengend uitvalt. Het is te verwachten dat de concentratie van vanadium na 100 jaar nog sterk stijgt, waardoor een verhoging van de maximale grondwaterconcentratie voor deze stof meer effect heeft dan voor andere stoffen (Figuur 2; bovenste grafiek).

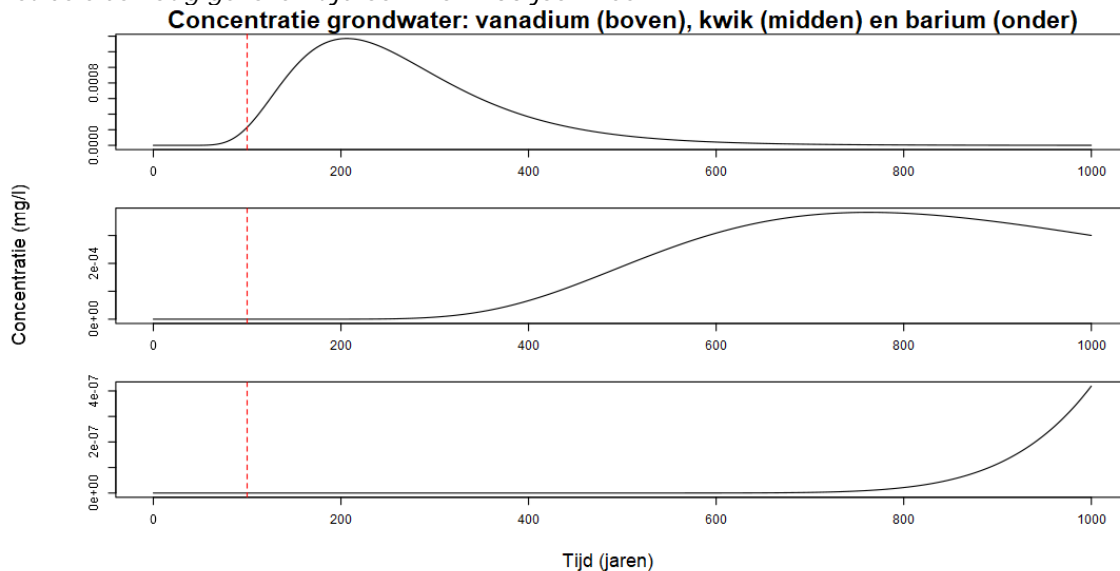
### **Gevoeligheid beleidsmatige parameters**

#### *Tijdraam*

Het gekozen tijdsraam is zeer bepalend voor de KEW. De concentraties van de uitloogende stoffen nemen toe binnen het tijdsraam vanaf het nulpunt van de toepassing. Echter is voor veel stoffen de maximale concentratie in het grondwater niet bereikt in het beleidsmatig gekozen tijdsraam van 100 jaar. De maximum concentratie vindt voor veel immobielere stoffen na de periode van 100 jaar plaats, zoals voor vanadium (Figuur 2; bovenste grafiek). Voor 10 van de 15 onderzochte metalen/metalloïden zal de KEW niet beschermend zijn voor het grondwater compartiment ná 100 jaar. Voor arseen, barium, chroom, kwik, molybdeen, nikkel, lood, seleen, tin en vanadium zullen de concentraties

in het grondwater verder toenemen na 100 jaar. Voor de stoffen cadmium, kobalt, koper, antimoon en zink zal de maximum concentratie in het grondwater binnen het tijdsraam van 100 jaar wel bereikt zijn. Wanneer een zwak bindende stof relatief snel uitspoelt zal de maximale concentratie in het grondwater worden bereikt binnen het gestelde tijdsraam. Wanneer de maximale concentratie van een relatief sterk bindende stof het grondwater nog niet heeft bereikt, zal de maximum concentratie op 100 jaar worden onderschat. Vanadium, kwik en barium zijn goede voorbeelden voor relatief sterk bindende stoffen waarbij te zien is dat het gekozen tijdsraam van 100 jaar niet toereikend is voor grondwater (Figuur 2). In Figuur 2 is te zien dat bij een verlengd tijdsraam van 1000 jaar de maximale concentratie wel zou worden meegenomen. In dat geval verstrengt de KEW voor vanadium met een factor -4,6 en kan dit voor kwik oplopen tot een factor -46. Deze factoren komen overeen met de schattingen uit Verschoor et al. (2006) voor kwik (e.g. 50) en vanadium (e.g. 7). Ook door Comans et al. (2014) wordt dit effect vastgesteld tot een factor 50. Naast vanadium en kwik laten ook andere stoffen de maximale concentratie na 100 jaar zien. Het sterke effect voor kwik is te verklaren doordat het kritische compartiment van bodem naar grondwater verschuift, waarbij een relatief lager milieucriterium hoort. Voor barium is de maximum concentratie binnen 1000 jaar nog steeds niet bereikt. Daarnaast geldt voor een korter tijdsraam dan 100 jaar, dat deze in sommige gevallen voor een verruiming van de KEW zorgt, omdat de maximumconcentratie daarmee mogelijk wordt uitgesloten. Dit kan in de praktijk leiden tot een ruimere KEW en daarmee een stimulering zijn voor meer afzet en hergebruik van secundaire bouwstoffen, maar kan op de langere termijn ook een verhoogd risico op milieuhygiënische problemen veroorzaken.

Figuur 2 Concentratieverloop van 1000 jaar voor het compartiment grondwater. De rode lijn geeft het beleidsmatig gekozen tijdsraam van 100 jaar weer.

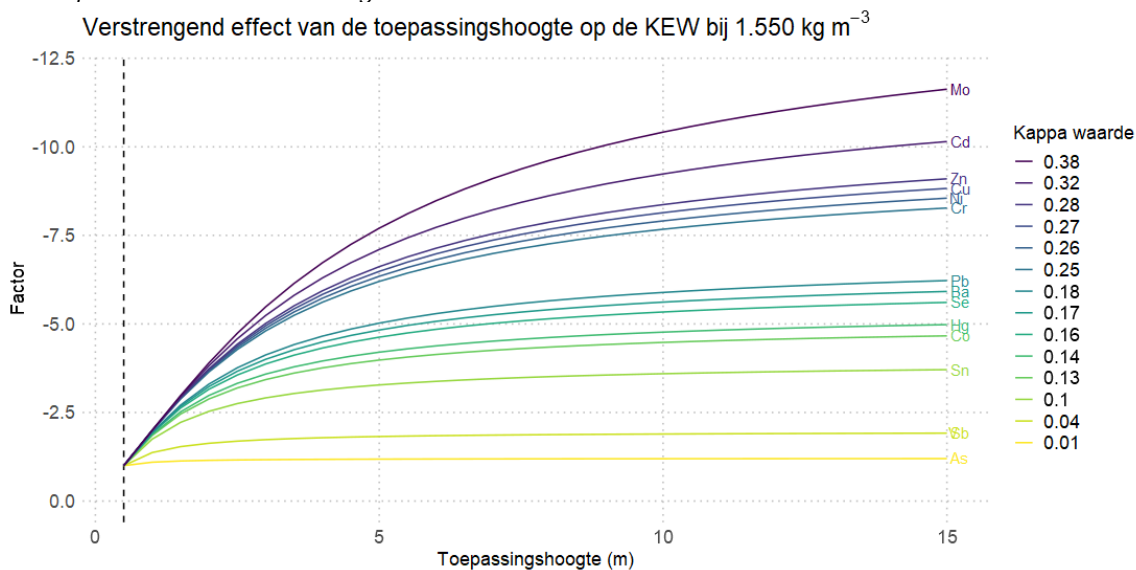


### Toepassingshoogte

Bij een toepassing van een bouwstof met een grotere laagdikte dan 0,5 m zal de KEW in de praktijk worden overschreden waardoor zich eerder milieueffecten kunnen voordoen (Figuur 3). Ook heeft de toepassingshoogte invloed op de timing waarop de maximale concentratie wordt bereikt. Zo zal bij een dunnere toepassing de maximale concentratie eerder bereikt worden dan bij een dikkere toepassing. De toepassingshoogte kan in de praktijk zeer uiteenlopen en daarmee leiden tot een significante onder- of overschrijding

van de KEW. Toepassingen die dikker zijn dan 0,5 m zullen resulteren in een verstrenging van de KEW met maximaal een factor -1,2 bij arseen tot de sterkste verstrenging bij molybdeen met een factor -11,6 bij een toepassingshoogte van 15 m. Deze impact is stofafhankelijk en de potentie is gebonden aan de uitloogconstante, waarbij een hogere kappa waarde leidt tot een sterker verstrengend effect.

Figuur 3 Het effect van de toepassingshoogte uitgedrukt in een factor waarmee de KEW verandert. De gestippelde lijn is de toepassingshoogte volgens het standaardscenario. De kleuren corresponderen met de uitloogconstante van de betreffende stof.



### Milieucriterium

Voor de stoffen arseen, barium, selenium en tin zijn er de afgelopen jaren nieuwe  $MTT_{eco}$  waarden afgeleid voor bodem (Tabel 2). Dit zorgt in alle gevallen voor een verstrengend effect van de KEW ten opzichte van de oude berekeningen met een factor -240, -22, -19 en -490, respectievelijk. Daarnaast zijn er voor antimoon en vanadium ook nieuwe  $MTT_{eco}$  voor het grondwater afgeleid. Waarbij voor antimoon een verruimend effect wordt waargenomen met een factor 16 en een verstrengend effect voor vanadium met bijna een factor -9 (Tabel 2).

Tabel 2 De invloed van de  $MTT_{eco}$ -waarden voor bodem ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) of grondwater ( $\text{mg l}^{-1}$ ), die sinds 2006 zijn herzien, op de KEW ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), uitgedrukt in een factor waarmee de KEW verandert.

	Metaal	$MTT_{eco}$ oud	$MTT_{eco}$ nieuw	KEW oud	KEW nieuw	Factorverschil
<b>Bodem</b> ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	arseen <sup>1</sup>	0,9	0,0012	0,5248	0,0007	-240
	barium <sup>2</sup>	180	8,2	281,21	12,81	-22
	selenium <sup>2</sup>	0,11	0,0058	0,168	0,008	-19
	tin <sup>2</sup>	34	0,068	42,154	0,0843	-490
<b>Grond- Water</b> ( $\text{mg l}^{-1}$ )	antimoon <sup>2</sup>	0,0062	0,1	0,0815	1,34	+16
	vanadium <sup>2</sup>	0,0035	0,0004	0,6420	0,0734	-8,8

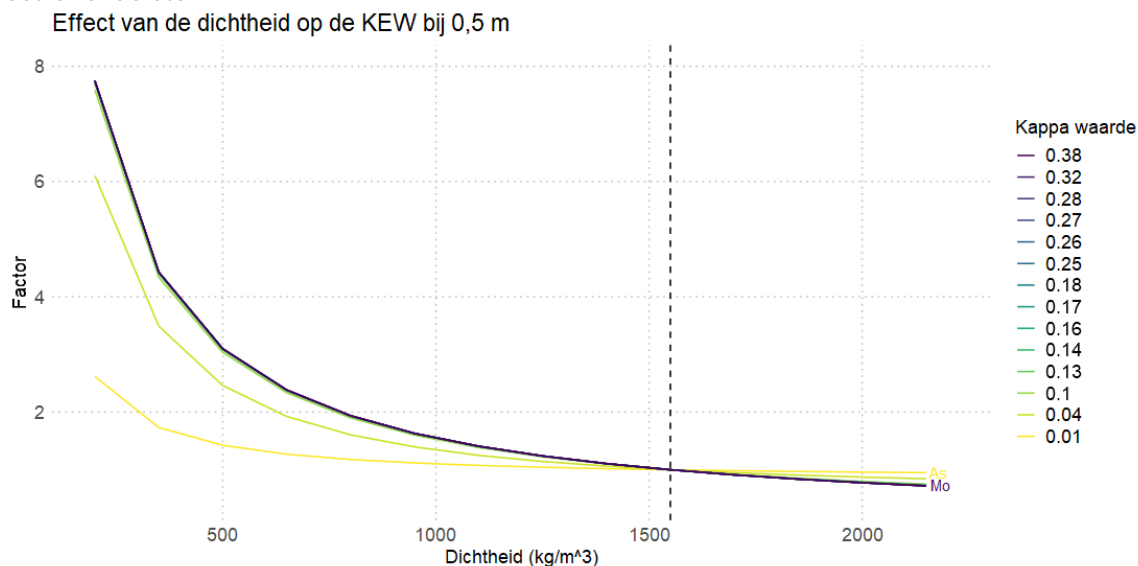
1) van Herwijnen et al. (2015)

2) Brand et al. (2012)

### Bouwstofdichtheid

Figuur 4 laat zien dat een verlaging van de dichtheid (schuimglas:  $200 \text{ kg m}^{-3}$ ) ten opzichte van het standaard scenario ( $1.550 \text{ kg m}^{-3}$ ) leidt tot een verruiming van de KEW tot een factor 7,7 voor molybdeen. Bij een verhoging van de dichtheid (staalslak:  $2.200 \text{ kg m}^{-3}$ ) treedt een verstrengend effect op bij de KEW tot een factor -1,4 voor molybdeen. Daartegenover is dit voor de stof arseen, respectievelijk 2,6 en -1,1. Ook deze impact is stofafhankelijk en de potentie is gebonden aan de uitloogconstante, waarbij een hogere kappa leidt tot een sterker verstrengend effect. Veel van de stoffen in de grafiek lopen gelijk aan die van molybdeen en zijn daarmee niet direct te zien.

Figuur 4 Het verstrengende en verruimende effect van dichtheid op de KEW. De gestippelde lijn is de dichtheid in het standaardscenario. De kleuren corresponderen met de uitloogconstante van de betreffende stof.



## Discussie

### Combinatie-effect parameters

Om de invloeden van de parameters te onderzoeken wordt telkens de invloed van één parameter op de KEW getoetst ten opzichte van de KEW volgens het standaardscenario. De effecten zijn los getoetst, maar kunnen in werkelijkheid een gecombineerd effect hebben. Dit gecombineerde effect van variabelen is niet onderzocht, maar kan in werkelijkheid een cumulatieve verandering in de KEW veroorzaken of mogelijk een verruimend of verstrengend effect opheffen. Gezien de variatie in parameters zijn er veel combinatie-effecten mogelijk en is het op voorhand lastig dit volledig in kaart te brengen. In een locatie-specifieke situatie of bij verschillende scenario's kan het nuttig zijn het combinatie-effect verder te onderzoeken. In de analyse van Comans et al. (2014) en ook van Negash & Verschoor (2022) wordt het effect van de gecombineerde verandering van een aantal parameters enigszins inzichtelijk gemaakt.

### Niet meegenomen parameters

Er zijn nog meer invoerparameters waarvan de invloed op de gemodelleerde KEW onderzocht kunnen worden. Sommige hiervan kunnen belangrijk zijn in de bepaling van de KEW, maar zijn in de modellering nog niet meegenomen. Een voorbeeld hiervan is de vaste uitloogconstante. In werkelijkheid kan de snelheid waarmee de stof uitloogt veranderen over tijd. De uitloging kan ook toenemen of afnemen, bijvoorbeeld wanneer

een bouwstof veroudert. Dit wordt gezien bij een pH verandering van alkalische bouwstoffen (Galvín et al. 2012; Zhang et al. 2016; Komonweeraket et al. 2015; Liu et al. 2022; Li et al. 2018; Dijkstra et al. 2019; Król et al. 2020; Dijkstra 2024). Om rekening te kunnen houden met een veranderende uitloogsnelheid is verder onderzoek nodig om te bepalen hoe en voor welke bouwstoffen dit kan worden gemodelleerd.

Een parameter die wel een plek heeft in de modellering maar niet is meegenomen in de analyse is het bodemprofiel. Het bodemprofiel bestaat uit verschillende lagen waarvan de diepte en de samenstelling de mate van uitloging bepalen. Bij deze bodemlagen horen veel bodemspecificaties (i.e. dichtheid, waterdoorlatendheid, poriewater fractie, dispersie, diffusie en chemische bodemeigenschappen) die van invloed zijn op de mobiliteit van een stof. Daarnaast heeft de pH en het DOC-gehalte van de bodem invloed op de mobiliteit van de stof en heeft de bulkdichtheid invloed op de waterdoorlatendheid van de bodem. Kortom is het gebruik van een representatief bodemprofiel van groot belang bij het berekenen van de KEW. Het effect van variatie van chemische bodemeigenschappen zoals pH en DOC op de KEW is met ORCHESTRA onderzocht in Comans et al. (2014) en is zeer bepalend gebleken. Dit wordt ook door Spijker et al. (2009) benadrukt als zeer invloedrijk en kan tot meerdere ordegroottes invloed hebben op de uitkomst. Door het gebruik van een gestandaardiseerd bodemprofiel kan er, afhankelijk van het lokale bodemprofiel, verschil zitten tussen de werkelijke uitloging en de gemodelleerde uitloging. Omdat Nederland veel verschillende bodemprofielen kent zijn er veel alternatieve scenario's in de modellering mogelijk. De selectie van een standaard bodemprofiel vraagt dan ook een zorgvuldige afweging.

De concentratie op het toetspunt in de bodem of het grondwater wordt gebruikt voor de berekening van de KEW. Bij een gevoeligheidsanalyse kunnen andere dieptes worden gebruikt, maar kan ook afgeweken worden van de gekozen statistische maat (i.e. gemiddelde en maximum concentratie). Dit zorgt ervoor dat er zeer veel uiteenlopende alternatieven mogelijk zijn voor de toetspunten in het standaardscenario voor bodem en grondwater. Verschoor et al. (2006) hebben dit voor een viertal opties gedaan, maar er zijn veel meer alternatieven denkbaar. Bij alternatieve keuzes voor de toetsdiepte en statistische maat kan zelfs ook het kritische compartiment verschuiven. De invloed van deze beleidsmatige keuze op de KEW is groot. Daarnaast zijn de alternatieven zeer uitgebreid en daarom binnen deze kennisnotitie niet beoordeeld.

### **Conclusie**

In Tabel 3 wordt een overzicht gegeven van de resultaten uit de gevoeligheidsanalyse. De inhoudelijke en de beleidsmatige parameters staan op volgorde van de invloed die deze hebben op de KEW. Uit het overzicht kan de conclusie worden getrokken dat de invloed van de inhoudelijke parameters op de KEW veelal kleiner is dan de invloed van de beleidsmatige parameters, met uitzondering van de partiticoëfficiënt. Het verminderen van de onzekerheid in inhoudelijke parameters vraagt veel onderzoek en tijd waarbij het onzeker is of een aanpassing van de modelinvoer ook daadwerkelijk tot andere uitkomsten en/of minder onzekerheden zal leiden in relatie tot in de praktijk ervaren knelpunten. De beleidsmatige invoerparameters hebben een veel groter effect op de gemodelleerde KEW en waren in het verleden bepalend voor de uiteindelijk vastgestelde MEW. Deels zijn de hierin gemaakte keuzes ook niet meer in lijn met de toepassing van bouwstoffen in de praktijk, zoals de toepassingshoogte. Bij een keuze tot het actualiseren van de normwaarden moet dan ook rekening worden gehouden met beleidsmatige aanpassingen uit het verleden, zoals de keuze voor een standaard scenario in de modellering en een beleidsmatig onderbouwde verruiming of aanscherping van de berekende emissiewaarden.

Een mogelijkheid is om naast het standaardscenario aanvullende modelscenario's te gebruiken die specifiek van toepassing zijn op in de praktijk ervaren knelpunten. Deze modelscenario's kunnen de basis zijn voor een meer locatie- of bouwstofs specifieke benadering. De beleidsmatige parameters, zoals dichtheid en toepassingshoogte, bieden de meeste potentie om de knelpunten in de praktijk te adresseren. Toch geldt ook hier dat het komen tot nieuwe (beleidsmatige) keuzes met betrekking tot de modelparameters en het doorrekenen van verschillende scenario's, een zorgvuldige afweging en aanzienlijke doorlooptijd vraagt. Mogelijk kunnen ervaren knelpunten in de praktijk ook middels andere aanpassingen worden geadresseerd.

Tabel 3 Een overzicht van de gevoeligheidsanalyse van de KEW op basis van de inhoudelijke en beleidsmatige parameters (gerangschikt op grootte).

	Parameter	Invulling Bbk	Testwaarde	Stof afhankelijk	Factor
Inhoudelijke parameters	Partiticoëfficiënt	Literatuurstudie	-	Ja	1,2 tot 400
	Uitloogconstante (kappa [ $\kappa$ ])	Data: Verschoor et al. (2006)	Kappa +/- std. (de Wilde et al., 1998)	Ja	-5,9 tot 3,2
	Neerslag en verdamping	300 mm/jaar	Klimaatscenario's 2100	Ja	-1,7 tot 3,4
	Grondwaterspiegel	1m-mv	0,34 en 0,59	Ja	-2,5 tot 0
Beleidsmatige parameters	Tijdraam	100 jaar	1000 jaar	Ja	-46
	Milieucriterium	MTT <sub>eco</sub>	Herziende MTT <sub>eco</sub>	Ja	-490 tot 16*
	Toepassingshoogte	0,5 m	0,5 tot 15 m	Nee	-11,6
	Dichtheid	1.550 kg m <sup>-3</sup>	200 tot 2.200 kg m <sup>-3</sup>	Nee	-1,1 tot 7,7

\*Enkel voor stoffen met een gewijzigde MTT-waarde in het kritische compartiment sinds 2006 (Arseen, Barium, Selenium, Tin, Antimoon en Vanadium). Bbk: Besluit bodemkwaliteit.

## Referenties

1. Baes, C.F., Sharp, R.D., Sjoeren, A.L. en Shor, R.W. (1984) A review and analysis of parameters for assessing transport and environmentally released radionuclides through agriculture, Oak Ridge National Laboratory, USA, report no. ORNL-5786.
2. Brand E., Bogte J., Baars B.J., Janssen P., Tiesjema G., van Herwijnen R., van Vlaardingen P., Verbruggen E. (2012). Proposal for Intervention Values soil and groundwater for the 2nd, 3rd and 4th series of compounds. RIVM report 607711006/2012.
3. Brand E., van Genuchten J.M., Vis R., Broekman M. (2024). Evaluatie normeringskader (her)gebruik secundaire bouwstoffen. RIVM Rapport 2024-0074.
4. Comans R.N.J., Dijkstra J.J., Meeussen J.C.L., Spijker J., Groenenberg J.E., (2014). Inventarisatie van bodemproceskennis in relatie tot gevoeligheden en onzekerheden in modellen voor uitloging en reactief transport van stoffen in de bodem. ECN, Petten.
5. Dijkstra J.J., Comans R.N.J., Schokker J., Van der Meulen M.J., (2019). The geological significance of novel anthropogenic materials: Deposits of industrial waste and by-products and supporting information. Anthropocene 28, 100229
6. Dijkstra J.J., (2024). Uitloogproeven: verantwoording, toepasbaarheid en aansluiting met de praktijk. Notitie. TNO, Geologische Dienst, Utrecht, Nederland.

7. Galvín A.P., Ayuso J., Jiménez J.R., Agrela F. (2012). Comparison of batch leaching tests and influence of pH on the release of metals from construction and demolition wastes. *Waste Management*. Volume 32, Issue 1. Pages 88-95.
8. Geologische Dienst Nederland, onderdeel van TNO. Grondwatertools Grondwaterstanden in beeld. <https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld/> (geraadpleegd 20-06-2024).
9. Groot, A.C. de, Peijnenburg, W.J.G.M., Hoop, M.A.G.T. van den en Veen, R.P.M. van (1998) Heavy metals in Dutch field soils: an experimental and theoretical study on equilibrium partitioning, National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, RIVM, rapport nr. 607220 001, 46 pages.
10. van Herwijnen R., Postma J., Keijzers R. Update of ecological risk limits for arsenic in soil. (2015). RIVM, rapport nr. 2015-0138.
11. Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). 2023: KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.
12. Król A., Mizerna K., Bożym M. (2020). An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 384. 121502.
13. Liu Q., Wang X., Gao M., Guan Y., Wu C., Wang Q., Rao Y., Liu S. (2022). Heavy metal leaching behaviour and long-term environmental risk assessment of cement-solidified municipal solid waste incineration fly ash in sanitary landfill. *Chemosphere*. Volume 300.
14. Negash A. en Verschoor A.J. (2022). Critical emission limit values for building materials: technical background, interpretation and reconstruction. A contribution to the knowledge base for environmental standards of building material standards. RIVM, Bilthoven, Nederland. Rapportnr. 2022-0112.
15. Sauvé, S., Hendershot, W. en Allen, H.E. (2000) Critical review. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden and organic matter, *Environmental Science and Technology*, 34, 1125-1131.
16. Spijker J. et al., (2009) Uitloging van grond – een modelmatige verkenning. Rapport 711701077, RIVM, Bilthoven.
17. TCB. (2006). Advies modellering uitloging bouwstoffen, Technische Commissie Bodembescherming, Den Haag, Nederland. Kenmerk TCB S21(2006)
18. Verbruggen E., Posthumus r., van Wezel A. (2001). Ecotoxicological Serious Risk Concentrations for soil, sediment and (ground) water: updated proposals for first series of compounds. RIVM, Bilthoven, Nederland. RIVM report 711701 023.
19. Verschoor A.J., Lijzen J.P.A., van den Broek H.H., Cleven R.F.M.J., Comans R.N.J., Dijkstra J.J., Vermij P.H.M., (2006). Kritische emissiewaarden voor bouwstoffen. Milieuhygiënische onderbouwing en consequenties voor bouwmaterialen. RIVM, Bilthoven, Nederland. Rapportnr. 711701043.
20. Wilde, P.G.M. de, Keijzer, J. , Janssen , G.L.J., Aalbers, Th. G. en Zevenbergen, C. (1992) Beoordeling van gereinigde grond; Uitloogkarakteristieken en chemische samenstelling van referentiegronden. rapport nr. 216402001, RIVM, Bilthoven.
21. Wilde, P.G.M. de (1998), Excell spreadsheet: DatakappatotaalE.xls.
22. Zhang Y., Cetin B., Likos W.J., Edil T.B. (2016). Impacts of pH on leaching potential of elements from MSW incineration fly ash. *Fuel*. Volume 184. Pages 815-825.