



Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu  
*Ministerie van Volksgezondheid,  
Welzijn en Sport*

# Hergebruik van **radioactieve restmaterialen**

Afwegingen bij hergebruik van cesium-137  
bevattende biomassa-assen



## **Hergebruik van radioactieve restmaterialen**

Afwegingen bij hergebruik van cesium-137 bevattende  
biomassa-assen

RIVM-rapport 2025-0088

## Colofon

© RIVM 2026

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2025-0088

F. Dekkers (auteur), RIVM  
M. van der Linden (auteur), RIVM  
G. de With (auteur), NRG PALLAS  
B. Mayer (auteur), NRG PALLAS

Contact:  
Fieke Dekkers  
Stralingsonderzoek, Kennis en Beleid  
[fieke.dekkers@rivm.nl](mailto:fieke.dekkers@rivm.nl)

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming.

Dit is een uitgave van:  
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**  
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
Nederland  
[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

## Publiekssamenvatting

### **Hergebruik van radioactieve restmaterialen**

Afwegingen bij hergebruik van cesium-137 bevattende biomassa-assen

De Nederlandse overheid wil dat dat er zo weinig mogelijk radioactief afval ontstaat. Bijvoorbeeld door reststoffen met kleine hoeveelheden radioactief materiaal te hergebruiken. Daardoor is het volgens de wet geen afval. Stralingsdeskundigen van het RIVM en NRG-PALLAS onderzochten wat hergebruik van deze reststoffen stimuleert of juist hindert. Ze bekeken aan hoeveel straling mensen blootstaan bij hergebruik. Ook was er aandacht voor technische, economische en maatschappelijke kanten.

De vraag is als voorbeeld uitgewerkt voor as die overblijft na de verbranding van biomassa. Daarin kan de radioactieve stof cesium-137 zitten. Deze radioactieve stof verspreidde zich door bovengrondse kernproeven en na het ongeluk met de kerncentrale Tsjernobyl in 1986 over een groot gebied. Via de bodem komt de stof in bomen terecht. Als dit hout als biomassa wordt verbrand, wordt de concentratie cesium-137 in de as hoger. En te hoog om te mogen worden hergebruikt, bijvoorbeeld in cement.

Het onderzoek laat zien dat de blootstelling aan straling bij hergebruik van as uit biomassa heel laag is. Het cesium-137 is dan geen probleem voor de gezondheid. Er zijn wel andere hindernissen om de as veilig te kunnen hergebruiken. Zo kunnen er andere gevaarlijke, niet-radioactieve stoffen in de assen zitten, zoals zware metalen. De regelgeving voor deze stoffen blijkt niet goed aan te sluiten op de regelgeving voor radioactieve stoffen. Ook hebben de mensen die met deze assen moeten werken, niet genoeg kennis over allebei de onderwerpen.

Verder kost het producenten geld om het materiaal geschikt te maken voor hergebruik. Zo is de eis voor bouwmaterialen dat de kwaliteit van het hergebruikte materiaal altijd in al het materiaal hetzelfde moet zijn. As uit biomassa moet soms worden voorbewerkt om dat te bereiken.

Ten slotte hebben de onderzoekers een systeem ontwikkeld om de stimulerende en hinderende factoren genuanceerd te kunnen afwegen. Expertise blijft nodig om deze afweging goed te kunnen maken.

In dit onderzoek was geen ruimte om de maatschappelijke beeldvorming voor hergebruik van materiaal met cesium-137 te onderzoeken. De auteurs geven wel advies hoe dit kan worden gedaan.

Kernwoorden: Cs-137, radioactieve stoffen, afval, circulair, biomassa, hergebruik, recycling



## Synopsis

### **Reuse of radioactive residual materials**

Considerations on the reuse of biomass ash containing cesium-137

The Dutch government aims to minimise how much radioactive waste is produced. One approach is to reuse residual materials that contain only small amounts of radioactive substances. These materials are then not classified as waste. Radiation experts from RIVM and NRG-PALLAS investigated what factors support the reuse of these residual materials and what gets in the way. They examined how much radiation people could be exposed to as a result of reuse. Technical, economic and social consideration were also taken into account.

The question was examined using ash left over from burning biomass as a case study.. This type of ash can contain the radioactive substance cesium-137. Above-ground nuclear tests and the 1986 accident at the Chernobyl nuclear power plant caused this radioactive substance to spread across a wide area. Cesium-137 is absorbed by trees from the soil. If the wood is later burned as biomass, the amount of cesium-137 in the ash becomes more concentrated – sometimes so much that the ash can no longer be reused, for example in cement.

The results indicate that radiation exposure from the reuse of biomass ash is minimal. Therefore, cesium-137 does not pose a health concern in this context. There are, however, barriers to the safe reuse of the ash. For instance, it may contain other harmful substances which are not radioactive, such as heavy metals. The regulations for these substances are poorly aligned with those for radioactive materials. In addition, professionals involved in reuse of the ash may lack sufficient understanding of both sets of rules.

Manufacturers may face added costs to process the material to a standard that allows for reuse. For example, building materials must meet the requirement that the reused material is the same quality throughout. To achieve this, biomass ash sometimes needs to be treated first.

Finally, the researchers created a system to weigh the factors that support or hinder reuse. Expert input remains essential for reliable assessments.

This study did not include an investigation into how the public views the reuse of material containing cesium-137. However, the authors do offer suggestions on how such research could be carried out.

Keywords: Cs-137, radioactive substances, radioactive materials, waste, circular, biomass, reuse, recycling



## Inhoudsopgave

### Samenvatting — 9

<b>1</b>	<b>Inleiding — 13</b>
1.1	Aanleiding — 13
1.2	Doelstelling en onderzoeksvragen — 13
1.3	Leeswijzer — 14
1.4	Begrippen — 14
1.5	Afbakening — 15
1.6	Gehanteerde bronnen — 16
<b>2</b>	<b>Biomassa-assen in Nederland: herkomst, samenstelling en toepassingsmogelijkheden — 17</b>
2.1	Van biomassa naar biomassa-as — 17
2.1.1	Herkomst en toepassing van biomassa in Nederland — 17
2.1.2	Biomassa-assen in Nederland — 19
2.2	Samenstelling van biomassa-assen — 21
2.2.1	Biomassa-assen en ioniserende straling — 21
2.3	Hergebruik van biomassa-assen — 23
2.3.1	Overwegingen bij de kwaliteit van biomassa-assen — 23
2.3.2	Toepassingsmogelijkheden van biomassa-assen — 24
<b>3</b>	<b>Stralingsbescherming — 27</b>
3.1	Wetgeving m.b.t. straling en biomassa-assen en toepassingsmogelijkheden — 27
3.1.1	Algemene eisen — 27
3.1.2	In de praktijk — 29
3.2	Internationale richtsnoeren — 30
3.3	Regelgeving in de ons omringende landen — 30
3.3.1	Regelgeving in Finland — 31
3.3.2	Regelgeving in Zweden — 32
3.4	Stralingsrisico's bij hergebruik van biomassa-assen — 33
3.4.1	Eisen aan blootstellingsberekeningen — 33
3.4.2	Blootstellingsscenario's en resultaten van blootstellingsberekeningen — 34
3.4.3	Discussie — 35
3.5	Stimulansen en belemmeringen — 36
<b>4</b>	<b>Beleid, wet- en regelgeving voor niet-radioactief afval — 39</b>
4.1	Het Circulair Materialenplan (CMP) en het landelijk afvalbeheerplan (LAP3) — 39
4.1.1	CMP Afvalplan assen van energiewinning uit biomassa — 40
4.1.2	CMP Afvalplan reststoffen van kolencentrales — 40
4.1.3	Aanwezigheid van zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) — 40
4.2	Relatie stralingsbeleid en overig beleid — 41
4.3	Normen en certificering — 41
4.4	Stimulansen en belemmeringen — 42
<b>5</b>	<b>Gezondheid en circulariteit — 43</b>
5.1	Uitloging van gevaarlijke stoffen — 43
5.2	Blootstelling via hand- mondcontact — 44

5.3	Circulariteit en CO <sub>2</sub> -emissie — 45
5.4	Stimulansen en belemmeringen — 46
<b>6</b>	<b>Technische kenmerken — 47</b>
6.1	Grondstof specificaties — 47
6.1.1	Chemische eigenschappen — 47
6.1.2	Fysische eigenschappen — 47
6.2	Productspecificaties — 47
6.3	Productieproces — 47
6.4	Stabiliteit en beschikbaarheid — 48
6.5	Stimulansen en belemmeringen — 48
<b>7</b>	<b>Financieel-economische haalbaarheid — 51</b>
7.1	Kostenstructuur en besparingsmogelijkheden — 51
7.2	Markttoegang en afzet zekerheid — 52
7.3	Subsidies, belastingen en milieubeleid — 52
7.4	Certificering en kwaliteitsborging — 53
7.5	Schaalgrootte en investeringsbereidheid — 53
7.6	Stimulansen en belemmeringen — 54
<b>8</b>	<b>Sociale stimulansen en belemmeringen — 57</b>
8.1	Belang van sociaalwetenschappelijk onderzoek — 57
8.2	Bestaand onderzoek naar hergebruik van radioactieve reststoffen in bouwmaterialen — 57
8.3	Sociaalwetenschappelijk onderzoek in Nederland — 57
8.4	Mogelijke opzet van onderzoek naar stimulansen en belemmeringen in Nederland — 58
8.5	Stimulansen en belemmeringen — 59
<b>9</b>	<b>Methodiek voor integrale beoordeling van hergebruik — 61</b>
9.1	Methodologie — 61
9.1.1	Beoordelingssysteem — 61
9.1.2	Eindbeoordeling — 61
9.2	Casus: biomassa-assen als cement additief — 62
9.2.1	Toepassingskader — 62
9.2.2	Beoordelingsresultaten — 62
9.2.3	Eindbeoordeling — 63
9.2.4	Vervolgstappen en risicobeoordeling — 63
9.2.5	Validatie van de stralingsbeschermingsevaluatie door experts — 63
9.3	Beschouwing van de methodologie — 63
9.3.1	Rol van stralingsbescherming — 64
9.3.2	Suggesties voor gebruik en/of verfijning van de methodiek — 64
9.3.3	Workshop voor praktijktoetsing en verdieping — 64
<b>10</b>	<b>Conclusies — 65</b>
	<b>Referenties — 67</b>
	<b>Bijlage 1 Blootstellingsscenario's — 75</b>
B1.1	Verdunning bij recycling van biomassa-vliegas — 75
B1.2	Blootstellingsscenario's voor hergebruik van vliegas met Cs-137 — 77
B1.3	Resultaat van blootstellingsberekeningen — 77
	<b>Bijlage 2 Beoordeling stralingsbeschermingsaspecten — 79</b>

## Samenvatting

Reststoffen met kleine hoeveelheden radioactief materiaal kunnen soms worden hergebruikt of gerecycled. Dit draagt bij aan het minimaliseren van radioactief afval, en dat is een doel van de Nederlandse overheid. In dit rapport beschrijven we de resultaten van een onderzoek dat RIVM en NRG PALLAS in opdracht van de ANVS hebben uitgevoerd om stimulerende en belemmerende factoren voor hergebruik van licht radioactieve restmaterialen te identificeren. Ook hebben we een systematiek opgezet om deze factoren tegen elkaar af te wegen. Om tot een integrale afweging te kunnen komen, hebben we naast factoren die betrekking hebben op de stralingsbescherming ook technische, financieel-economische, maatschappelijke en beleidsmatige aspecten meegewogen, net als factoren die betrekking hebben op veiligheid, gezondheid, klimaat en circulariteit. Zo'n geïntegreerd overzicht van factoren die op dit moment, in de Nederlandse situatie, stimulerend of belemmerend zijn bij het hergebruik van radioactieve reststoffen, is noodzakelijk om te beoordelen welke stappen het effectiefst zijn om recycling van dergelijke materialen te bevorderen, en wat de rol van stralingsbescherming daarbij is.

### **Biomassa-assen en Cs-137**

Dit rapport beoogt bij te dragen aan de ontwikkeling van een integrale systematiek voor de afweging van belemmerende en stimulerende factoren voor hergebruik van radioactieve restmaterialen. Daartoe beschouwen we stimulansen en belemmeringen voor een specifieke reststroom. Het voor deze reststroom ontwikkelde afwegingskader kan worden gegeneraliseerd naar andere reststromen. In dit rapport zijn biomassa-assen als illustratieve casus gekozen. Biomassa kan worden gebruikt als energiebron door verbranding of vergassing. Biomassa-assen zijn reststoffen die hierbij overblijven. Deze assen worden in Nederlandse energiecentrales in grote volumes geproduceerd als reststof. Hergebruik van deze assen, bijvoorbeeld in bouwmaterialen draagt bij aan de overgang naar een circulaire economie. De assen kunnen echter verontreinigingen bevatten, zoals de radioactieve stof cesium-137 (Cs-137). Cs-137 is aanwezig in het leefmilieu als gevolg van bovengrondse kernproeven en het ongeval in Tsjernobyl, en kan worden opgenomen uit de bodem door bomen en planten. De concentratie van Cs-137 in biomassa-assen varieert sterk, afhankelijk van de regio van herkomst en het type biomassa. In sommige biomassa-assen is de activiteitsconcentratie hoger dan de vrijgavegrenswaarde voor Cs-137 (0,1 Bq/g). Deze assen kunnen daarom niet zonder meer worden hergebruikt. Naast factoren uit de stralingsbescherming spelen ook andere factoren een rol. In deze samenvatting geven we een overzicht van de belangrijkste stimulansen en belemmeringen voor hergebruik van Cs-137 bevattende biomassa-assen. We benoemen ook de opvallendste bevindingen.

### **Stralingsbescherming**

Hergebruik van Cs-137 bevattende biomassa-assen draagt bij aan het beleidsdoel de in Nederland geproduceerde hoeveelheid radioactief afval

te minimaliseren. Dit is een stimulerende factor voor hergebruik van Cs-137 bevattende biomassa-assen. Blootstelling aan straling van werknemers, de bevolking en het milieu bij hergebruik is mogelijk een belemmerende factor. Conservatieve blootstellingsschattingen in dit rapport laten zien dat voor concentraties Cs-137 die in de praktijk in biomassa-assen gevonden worden, de doses voor mensen bij hergebruik in cement zeer laag blijven. Blootstelling van mensen aan straling hoeft geen belemmerende factor te zijn bij hergebruik van biomassa-assen.

De Nederlandse wet- en regelgeving maakt onderscheid tussen materiaal dat van nature voorkomende radionucliden bevat, en materiaal dat kunstmatige radionucliden bevat. Dit onderscheid heeft implicaties voor stimulansen voor hergebruik. Materiaal dat kunstmatige radionucliden als Cs-137 bevat boven de vrijgavegrens kan na specifieke vrijgave worden hergebruikt. Als zulk materiaal niet specifiek wordt vrijgegeven, moet het worden afgevoerd naar COVRA. Omdat afvoer naar COVRA kostbaar is, werkt dit stimulerend voor hergebruik van Cs-137 bevattende biomassa-assen. Voor reststromen die uitsluitend van nature voorkomende radionucliden bevatten, is deze stimulans mogelijk afwezig, omdat voor deze reststromen storten op een deponie toegestaan kan zijn. Het onderscheid tussen kunstmatige en van nature voorkomende radionucliden in voor recycling relevante regelgeving werkt gelijktijdig belemmerend, omdat het lastig uitlegbaar is en daarmee bijdraagt aan onzekerheid over mogelijkheden voor hergebruik, zo bleek uit interviews met deskundigen uit het veld. Sommige Europese landen behandelen Cs-137 in hun regelgeving op een wijze die vergelijkbaar is met die voor van nature voorkomende radionucliden. Hierdoor is vrijgave mogelijk bij hogere concentraties dan nu in Nederland is toegestaan. Een vergelijkbare aanpak zou hergebruik kunnen stimuleren.

Daarnaast is in de praktijk gebleken dat de regelgeving uit de stralingsbescherming minder bekend is bij betrokkenen. Een meer integrale aanpak, met een betere aansluiting van regelgeving voor radioactieve op die voor niet-radioactieve reststoffen zou hergebruik van radioactieve reststoffen vergemakkelijken.

In Nederland is tot nu toe één vergunningaanvraag ingediend voor (verwerking met het oog op) hergebruik van biomassa-assen. Het aanvraagtraject voor deze vergunning liep lang. Betrokkenen geven aan dat dat zeer waarschijnlijk samenhangt met het feit dat het proces voor het eerst doorlopen werd, en verwachten niet dat dit in de toekomst beperkend zal zijn. Wel geldt in het algemeen dat het instrument specifieke vrijgave dermate complex is, dat het beperkend werkt.

Opvallend bij dit traject van vergunningverlening is dat in de vergunning is aangegeven dat gebruik van de assen in woningbouw niet is toegestaan, hoewel de concentratie Cs-137 na de vergunde bewerking onder de generieke vrijgavegrens komt. Deze vrijgavegrens is onder meer gebaseerd op scenario's waarin materiaal wordt toegepast in woningbouw. Zo'n conservatieve benadering maakt het proces dat leidt tot hergebruik onvoorspelbaar en kan belemmerend werken.

Internationale richtsnoeren laten ruimte voor hergebruik van reststromen als Cs-137 bevattende assen, maar zijn weinig specifiek, en zijn daarmee beperkt stimulerend.

### **Belemmeringen en stimulansen niet gerelateerd aan straling**

Biomassa-assen kunnen naast Cs-137 andere, niet-radioactieve verontreinigingen bevatten. Bij hergebruik is daarom ook andere wet- en regelgeving relevant dan die uit de stralingsbescherming. Het Circulair materialenplan (CMP) specificeert minimumstandaarden voor afvalverwerking. Voor biomassa-assen is de minimumstandaard 'storten'. Het beleid rond radioactieve stoffen en stralingsbescherming is niet geïntegreerd met het algemene afvalbeleid, wat tot onduidelijkheid en belemmeringen leidt. Normen en certificering (zoals EN 450 voor vliegas in beton) zijn belangrijk voor markttoegang, maar specifieke normen voor biomassa-assen ontbreken. Ook dit werkt belemmerend.

Een belangrijk aandachtspunt bij hergebruik van biomassa-assen is mogelijke uitloging van gevaarlijke stoffen uit het materiaal waarin de assen worden verwerkt. Uitloging van zware metalen na verwerking van biomassa-assen in beton of granulaat blijkt in bestaand onderzoek vergelijkbaar met die uit beton zonder biomassa-assen. Werknemers die biomassa verwerken kunnen, vooral tijdens werkzaamheden, in contact komen met gevaarlijke stoffen. In de praktijk blijkt de mogelijke aanwezigheid van zware metalen hierbij niet beperkend.

Het hergebruik van biomassa-assen draagt bij aan de circulaire economie en vermindert de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Dit sterk stimulerende effect is vooral van belang als biomassa-assen primaire grondstoffen in cement vervangen. Cementproductie is wereldwijd verantwoordelijk voor 5-10% van de CO<sub>2</sub>-emissie. Studies laten zien dat het gebruik van biomassa-assen in cement de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van beton met 11 tot 26% kan verlagen. Hoogwaardige recycling (zoals toepassing in cement) heeft meer milieuvoordeel dan laagwaardig gebruik (zoals opvulling in mijnen).

Technisch gezien zijn biomassa-assen kansrijke vervangers voor primaire grondstoffen in cement, mits ze voldoen aan eisen aan chemische en fysische eigenschappen. De grote variatie in samenstelling en kwaliteit van onbewerkte assen bemoeilijkt echter het hergebruik van biomassa-assen. Dit is een zwaarwegende belemmerende factor voor hergebruik van biomassa-assen in bouwmaterialen.

De economische haalbaarheid van hergebruik hangt af van kosten, markttoegang en schaalgrootte. Hergebruik van biomassa-assen in bouwmaterialen kan financieel aantrekkelijk zijn, vooral als bewerking beperkt blijft. Behandeling (zoals wassen of malen) verhoogt de kosten. Markttoegang wordt gestimuleerd door een tekort aan primaire bouwstoffen, maar onzekerheid over de kwaliteit van cement dat biomassa-assen bevat en onbekendheid bij afnemers werken remmend, evenals het ontbreken van duidelijke normen. Subsidies en beleidsmaatregelen kunnen stimulerend werken. Alleen bij grote, stabiele volumes is hergebruik financieel aantrekkelijk.

In deze opdracht is niet onderzocht in hoeverre publieke acceptatie en perceptie belemmerend werken. Wel is aangegeven hoe een dergelijk onderzoek zou kunnen worden opgezet.

### **Naar een systematiek voor afweging van stimulansen en belemmeringen**

In dit rapport is een groot aantal factoren geïdentificeerd die stimulerend dan wel belemmerend kunnen werken voor hergebruik van biomassa-assen die Cs-137 bevatten. Om deze factoren tegen elkaar af te wegen, is een systematiek voorgesteld waarbij elke factor door experts op een vijfpuntsschaal beoordeeld wordt. Deze aanpak geeft snel inzicht in welke factoren het meest belemmerend zijn, en daarom prioriteit zouden hebben bij het stimuleren van hergebruik. Het beoordelen van de afzonderlijke criteria is eenvoudig, terwijl een vijfpuntsschaal voldoende nuance biedt om onderscheid te maken tussen aspecten die mild of sterk stimulerend dan wel belemmerend werken.

Voor zes categorieën is een beoordeling van factoren uitgevoerd: stralingsbescherming, wet- en regelgeving niet-radioactief afval, gezondheid en circulariteit, technische kenmerken, financieel-economische haalbaarheid, en maatschappelijke acceptatie. Toepassing van de systematiek voor afweging van belemmeringen en stimulansen laat zien dat de radiologische risico's bij hergebruik van Cs-137 bevattende biomassa-assen laag en beheersbaar zijn, maar dat wet- en regelgeving met betrekking tot straling belemmerend kunnen werken. Voor de afweging van belemmerende en stimulerende factoren gerelateerd aan stralingsbescherming bij hergebruik van Cs-137 bevattende assen is de systematiek voor afweging van stimulerende en belemmerende factoren getest onder zes stralingsbeschermingsexperts. Dit leverde over het algemeen consistente resultaten op.

De categorieën die als meest beperkend zijn geïdentificeerd, zijn technische kenmerken, gezondheid en circulariteit en sociale stimulansen en belemmeringen. Voor die laatste categorie merken we op dat de lage score vooral het gevolg is van een gebrek aan informatie.

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In het Nationaal Programma Radioactief Afval is minimaliseren van radioactief afval een belangrijk onderwerp. Een mogelijkheid om het ontstaan van radioactief afval te beperken, is hergebruik of recycling van reststoffen, zodat deze opnieuw als grondstoffen kunnen worden gebruikt (zie paragraaf 1.4 voor toelichting op de begrippen hergebruik en recycling). Het RIVM-rapport '*Radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland. Een inventarisatie*' (RIVM-rapport 2022-0073) [1] beschrijft dat voor een aantal afvalstromen de technische mogelijkheden voor hergebruik al bestaan, maar dat implementatie wordt belemmerd door bijvoorbeeld juridische of beleidsmatige uitdagingen, de soms lagere kosten van alternatieve beheerroutes zoals stort en verbranding, en de moeizame maatschappelijke acceptatie. Op dit moment bestaat er geen overzicht van welke factoren het meest belemmerend of stimulerend zijn hierin. In het bijzonder is niet duidelijk hoe groot de rol van stralingsbeschermingsfactoren hierin is, in vergelijking tot andere aspecten.

Meer algemeen is duurzaam gebruik van materialen een belangrijke maatschappelijke uitdaging bij het komen tot een circulaire economie. Daarbij is het essentieel materialen, afkomstig uit bijvoorbeeld energieproductie of industrie, die nu nog als afval geclassificeerd worden, waar mogelijk te recyclen als grondstof. Hiertoe kunnen ook reststoffen behoren die van nature voorkomende radionucliden bevatten, of kunstmatige nucliden als Cs-137. Om te beoordelen welke stappen het effectiefst zijn om recycling van dergelijke materialen te bevorderen, en wat de rol van stralingsbescherming daarbij is, is een geïntegreerd overzicht van factoren die op dit moment, in de Nederlandse situatie, stimulerend of belemmerend zijn bij het hergebruik van radioactieve reststoffen, noodzakelijk.

## 1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

De ANVS heeft het RIVM opdracht gegeven uit te zoeken welke factoren hergebruik van radioactieve restmaterialen belemmeren of juist stimuleren. Hierbij wordt Cs-137 dat overblijft in as na verbranding van houtige biomassa als illustratieve casus bekeken. Technische, radiologische, financiële, maatschappelijke en beleidsmatige aspecten worden meegenomen om te komen tot een integratieve aanpak. Voor deze factoren wordt uitgezocht in hoeverre ze een belemmering dan wel een stimulans voor hergebruik van dit specifieke radioactieve restmateriaal vormen, en wat de verwachte betekenis ervan is voor de algemene Nederlandse situatie waar het radioactieve restmaterialen betreft. Het RIVM werkte hierbij samen met NRG PALLAS.

De opdracht is ingericht als een pilot: het doel van de opdracht is inzichten te krijgen die kunnen bijdragen aan het opzetten van een generieke, integratieve systematiek voor het beoordelen van hergebruik van radioactieve restmaterialen.

De onderzoeksvragen die dit rapport beoogt te beantwoorden, zijn:

- Welke factoren stimuleren dan wel belemmeren hergebruik van radioactieve reststoffen?
- Hoe kunnen deze factoren systematisch worden beoordeeld?

De antwoorden op deze vragen geven inzicht in de factoren die het beperkendst zijn, en ondersteunen daarmee het stellen van prioriteiten bij het opstellen van maatregelen om hergebruik te stimuleren. In het bijzonder biedt dit inzicht in de rol die factoren uit de stralingsbescherming spelen.

### 1.3 Leeswijzer

Bovenstaande onderzoeksvragen beantwoorden we aan de hand van de casus Cs-137 in assen van houtige biomassa. Dit rapport begint met een algemene beschrijving van deze reststroom. Vervolgens geven we in een zestal hoofdstukken een overzicht van stimulerende en belemmerende factoren vanuit het perspectief van de stralingsbeschermingswetgeving, overige wetgeving, gezondheid en circulariteit, techniek, financieel-economische afwegingen en sociale factoren. Elk hoofdstuk bevat een tabel met daarin een overzicht van geïdentificeerde stimulansen en belemmering. Het zwaartepunt ligt bij het hoofdstuk over stralingsbescherming, het werkveld van de ANVS. We hebben ervoor gekozen alle factoren die raken aan stralingsbescherming op nemen in één hoofdstuk. In het bijzonder betekent dat dat informatie over mogelijke gezondheidseffecten door blootstelling aan straling zijn te vinden in het hoofdstuk over stralingsbescherming. We eindigen met een afweging van de gepresenteerde belemmeringen en stimulansen.

### 1.4 Begrippen

In deze paragraaf worden enkele begrippen toegelicht.

In het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) [2] is een **radioactieve afvalstof** gedefinieerd als *radioactief materiaal in gasvormige, vloeibare of vaste staat die krachtens artikel 10.7 als radioactieve afvalstof wordt aangemerkt*, waarbij artikel 10.7 stelt dat een radioactieve afvalstof zodanig wordt aangemerkt indien geen gebruik of product- of materiaalhergebruik is voorzien, en geen sprake is van een lozing. Daarnaast moet de activiteitsconcentratie boven de vrijgavegrenswaarde liggen. Een stof is dus alleen een radioactieve afvalstof indien i) deze niet voor een ander doel kan worden gebruikt en ii) deze radioactief is.

De definitie van afvalstof is breder dan die van 'radioactieve afvalstof'. In de Wet milieubeheer (Wm) [3] zijn **afvalstoffen** gedefinieerd als *alle stoffen, mengsels of voorwerpen, waarvan de houder zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen of zich moet ontdoen*. Een stof is dus een afvalstof wanneer de ondernemer zich daarvan wil ontdoen, ongeacht of de stof nog voor een ander doel kan worden gebruikt.

In RIVM-rapport 2022-0073 [1] is daarom de term **radioactieve reststof** geïntroduceerd. Hiermee wordt bedoeld: *radioactieve stoffen die ontstaan bij een proces en die (nog) niet als radioactieve afvalstof zijn aangemerkt, en waarvan een ondernemer zich ontdoet voor hergebruik, al dan niet voorafgaand door bewerking*. Deze term wordt

ook in dit rapport gebruikt voor radioactieve stoffen waarvoor hergebruik of recycling mogelijk is.

De begrippen 'hergebruik' en 'recycling' zijn ook gedefinieerd in de Wm [3]. Bij **hergebruik** wordt een product of component (dat wil zeggen: geen afvalstof volgens de Wm) opnieuw gebruikt voor hetzelfde doel als dat waarvoor het was bedoeld. Bij **recycling** wordt een afvalstof nuttig toegepast door het te bewerken tot een product, materiaal of stof, mogelijk voor een ander doel. Energieterugwinning en gebruik als brandstof of opvulmateriaal vallen niet onder recycling. Het onderscheid tussen hergebruik en recycling lijkt in het Bbs [2] minder scherp, mogelijk omdat in beide gevallen geen sprake is van een radioactieve afvalstof volgens de definitie in het Bbs.

Het specifieke voorbeeld dat in dit rapport wordt besproken (biomassa-assen met Cs-137) gaat strikt genomen over recycling volgens de definitie uit de Wm, maar het afwegingskader kan ook worden toegepast op hergebruik. In dit rapport gebruiken we de term hergebruik ook in de betekenis van recycling.

**Biomassa** is organisch materiaal van plantaardige of dierlijke oorsprong dat kan worden ingezet als energiebron of als grondstof voor industriële toepassingen. Een belangrijke deelstroom hiervan is **houtige biomassa**, die bestaat uit materiaal afkomstig van bomen, struiken en andere houtige planten en die veelal wordt toegepast in verbrandings- en vergassingsinstallaties. Bij de thermische omzetting van biomassa ontstaan **biomassa-assen**: vaste restproducten die achterblijven na verbranding of vergassing. Deze as-stromen worden doorgaans onderverdeeld in bodemas en vlieggas. **Bodemas** betreft de grovere fractie die na de verbranding op de bodem van de installatie achterblijft. **Vlieggas** bestaat uit zeer fijne deeltjes die met de rookgassen worden meegevoerd en via filters of andere rookgasreinigingssystemen worden afgevangen. **Cesium-137** is een radioactief isotoop van cesium die vrijkomt bij kernsplijting en een halfwaardetijd van ongeveer 30 jaar heeft, die bij aanwezigheid in houtige biomassa zich ophoopt in de biomassa-assen.

Een **biomassacentrale** is een installatie waarin biomassa wordt verbrand of vergast om energie op te wekken. Dit proces kan warmte en/of elektriciteit produceren, afhankelijk van de inrichting van de installatie. Een **energiecentrale** is in dit document een installatie die met biomassa of met bij- of meestook van biomassa zowel elektriciteit als warmte produceert of uitsluitend elektriciteit produceert. Bij bijstook wordt biomassa apart van de reguliere brandstof vergast of gepyrolyseerd. De biomassa-assen komen hierbij apart vrij. Bij meestook wordt de biomassa met de primaire brandstof verbrand.

## 1.5 Afbakening

Radioactief cesium in biomassa-assen is gekozen als illustratieve casus voor de ontwikkeling van een systematiek voor afweging van stimulerende en belemmerende factoren voor hergebruik van reststoffen die radioactief materiaal bevatten. Dit rapport heeft niet als doel

hergebruik voor deze specifieke reststroom mogelijk te maken, of de opties voor hergebruik te beoordelen.

In dit rapport beschouwen we uitsluitend Cs-137 in biomassa-assen: filtermateriaal dat Cs-137 afkomstig uit biomassa bevat is bijvoorbeeld geen onderdeel van dit rapport.

Voor dit rapport is geen volledige analyse uitgevoerd van sociaal-wetenschappelijke stimulansen en belemmeringen voor hergebruik van radioactieve restmaterialen: we beperken ons tot aanbevelingen over hoe deze factoren zouden kunnen worden onderzocht (zie hoofdstuk 8).

## **1.6 Gehanteerde bronnen**

De informatie in dit rapport is gebaseerd op publiek toegankelijke bronnen en op interviews met Nederlandse experts [4-6].

## 2 Biomassa-assen in Nederland: herkomst, samenstelling en toepassingsmogelijkheden

In dit hoofdstuk geven we achtergrondinformatie over biomassa-assen. Deze informatie vormt de basis voor de inventarisatie van stimulansen en belemmeringen voor hergebruik in de volgende hoofdstukken.

### 2.1 Van biomassa naar biomassa-as

Biomassa is organisch materiaal van plantaardige of dierlijke herkomst dat kan worden gebruikt als grondstof of als energiebron. Volgens de meest recente gegevens van World Bioenergy Association (WBA) leverde bio-energie in 2023 globaal ongeveer  $5,6 \times 10^{19}$  J ( $5,6 \times 10^4$  PJ) per jaar, goed voor circa 9% van de totale mondiale energievoorziening [7]. De bijdrage aan de wereldwijde productie van elektriciteit was 2024 ca.  $7,11 \times 10^{14}$  Wh ( $7,11 \times 10^2$  TWh), wat goed is voor ongeveer 2–3% van de totale elektriciteitsproductie, en circa 7% van alle hernieuwbare elektriciteit [7].

Het gebruik van biomassa voor energieproductie leidt tot de productie van een omvangrijke hoeveelheid biomassa-as. Deze as is de anorganische vaste reststof die overblijft na de thermische verwerking van biomassa, zoals verbranding of vergassing. Tijdens deze processen verbrandt het organische materiaal en blijven de minerale componenten achter in de vorm van as.

Een rapport uit 2018 van het International Energy Agency (IEA) [8] schat dat wereldwijd per jaar ongeveer 10 miljoen ton biomassa-as wordt geproduceerd. Deze berekening is gebaseerd op een wereldwijde elektriciteitsproductie uit biomassa van  $4,83 \times 10^{14}$  Wh. Voor installaties die uitsluitend warmte leveren, komen daar nog extra hoeveelheden biomassa-as bij. Wanneer wordt uitgegaan van de in 2024 opgewekte hoeveelheid elektriciteit uit biomassa van  $7,11 \times 10^{14}$  Wh, betekent dit een toename van circa 50% ten opzichte van de genoemde 10 miljoen ton biomassa-as.

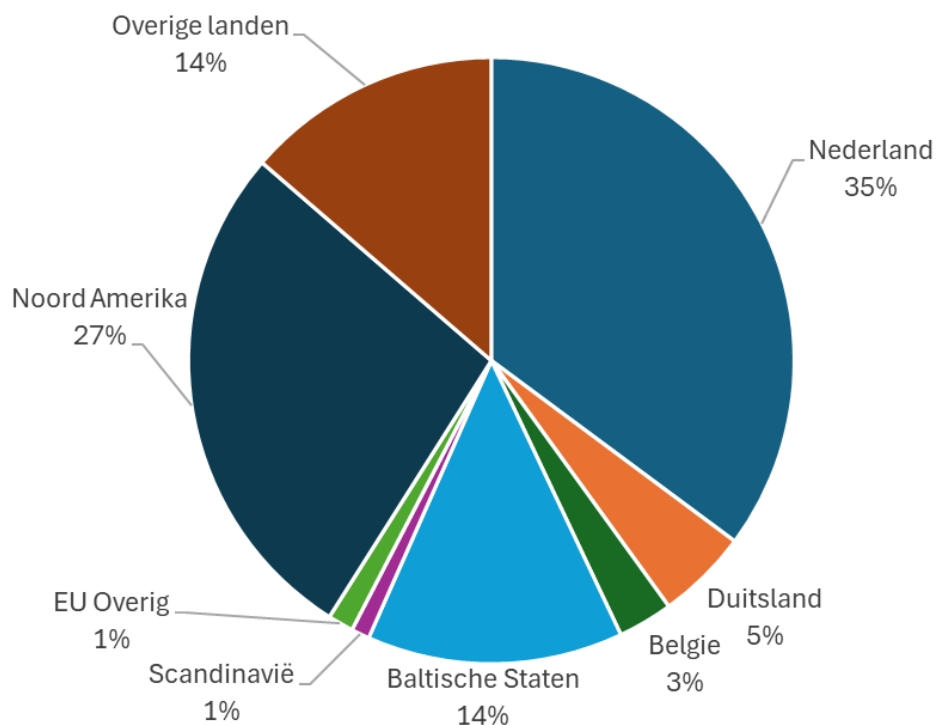
#### 2.1.1 *Herkomst en toepassing van biomassa in Nederland*

Een rapport van het Platform Bio-Economie [9] geeft een gedetailleerde beschrijving van de herkomst en toepassing van houtige biomassa in Nederland in 2021. Dit betreft de reststromen uit de agro-, food- en houtindustrie, reststromen uit bos-, natuur- en landschapsbeheer en afvalhout. Andere vormen van biomassa laten we hier buiten beschouwing, gegeven onze specifieke focus op Cs-137 in houtige biomassa.

Het rapport stelt dat het grootste aandeel, 1.869 kton (35%) van de gebruikte houtige biomassa uit Nederland kwam. 22% werd geïmporteerd uit Europese landen: 14% uit de Baltische Staten (705 kton), onze buurlanden (Duitsland en België) leverden 394 kton (8%) en Scandinavië en de overige EU-landen samen waren verantwoordelijk voor 2% van de houtige biomassa, terwijl 705 kton (14%) afkomstig was uit landen zoals Rusland en Wit-Rusland ("overige landen"). Ruim

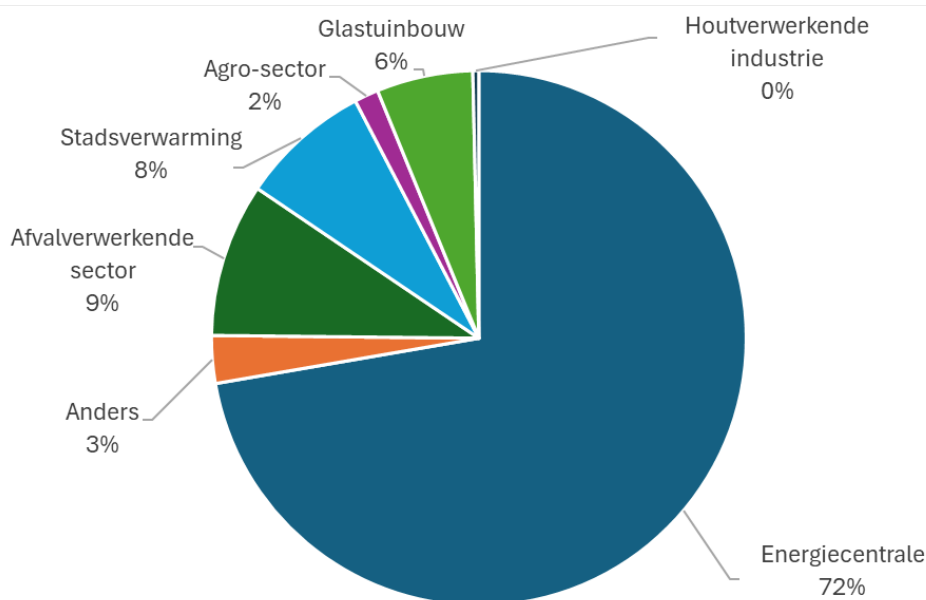
een kwart (27%) kwam uit Noord-Amerika (1.444 kton). De percentages van houtige biomassa naar herkomst zijn weergegeven in Figuur 1.

*Figuur 1 Herkomst van de houtige biomassa. Totaal 5,2 miljoen ton houtige biomassa [9].*



Een overzicht van het gebruik van de biomassa in 2021 in de verschillende installaties en sectoren is weergegeven in Figuur 2. Het grootste deel van de houtige biomassa (72%) werd ingezet in energiecentrales. Het gaat hierbij om centrales die zowel elektriciteit als warmte produceren en centrales die alleen elektriciteit produceren; 25% van de houtige biomassa werd gebruikt voor warmteproductie waarvan 9% in de afvalverwerkende sector, ongeveer 8% voor stadsverwarming en 8% in de agrosector en glastuinbouw. De overige 3% was voor installaties die elektriciteit en warmte aan industriële activiteiten leveren bijv. in de cementsector (categorie "anders").

Figuur 2 Toepassing van de houtige biomassa. Totaal 5,2 miljoen ton houtige biomassa [9].



### 2.1.2 Biomassa-assen in Nederland

Uitgaande van de genoemde 5,2 miljoen ton biomassa per jaar voor heel Nederland [9], zal de hoeveelheid as uit houtige biomassa ongeveer 25 tot 100 kton per jaar bedragen bij een asfractie van respectievelijk 0,5 en 2% [10]. Deze hoeveelheid correspondeert ruwweg met de 43 kton aan biomassa assen afkomstig van sloop- en schoonhout zoals gerapporteerd in het rapport van de IEA uit 2018 [8] over het gebruik van biomassa-assen.

Uitgaande van de in Figuur 2 genoemde 72% van de totale 5,2 miljoen ton biomassa die in energiecentrales wordt ingezet, wordt de hoeveelheid biomassa-as afkomstig uit energiecentrales geschat op circa 20 tot 75 kton per jaar. Hierbij moet worden opgemerkt dat het grotendeels gaat om biomassa die wordt bij- of meegestookt in kolencentrales. Wanneer ook de totale hoeveelheid as uit kolencentrales met bij- of meestook wordt meegerekend, komt de hoeveelheid biomassa-houdende as uit op ongeveer 100 tot 400 kton per jaar. Deze schatting is gebaseerd op een jaarlijks kolenverbruik van circa 2,2 miljoen ton voor elektriciteitsopwekking [11], in combinatie met een gemiddelde asfractie van 5 tot 15%.

Deze hoeveelheid ligt lager dan de raming van het IEA, dat in het eerder genoemde rapport uit 2018 de totale productie van gecombineerde kolen- en biomassa-assen in Nederlandse energiecentrales inschatte op 500 kton [8]. Daarbij moet echter worden meegenomen dat het kolenverbruik in Nederland tussen 2018 en 2022 ongeveer is gehalveerd. Omdat de asfractie van steenkool (5 – 15%) groter is dan die voor biomassa, betekent dit ook bij benadering een halvering van de totale hoeveelheid as. Wanneer met deze daling rekening wordt gehouden, kan worden geconcludeerd dat de genoemde schatting van

100-400 kton per jaar biomassa-houdende assen uit energiecentrales consistent is met de eerdere raming van het IEA.

De voornaamste productielocaties van deze biomassa-assen uit energiecentrales zijn:

- Amercentrale (Noord-Brabant) – Deze centrale draait sinds 2025 volledig op biomassa en produceert daardoor continu aanzienlijke hoeveelheden as van hoge kwaliteit.
- Eemshavencentrale (Groningen) – Een deel van de energieopwekking is afkomstig uit biomassa. De centrale draagt bij aan de productie van biomassa-assen door bijstook van biomassa naast steenkool.
- Maasvlakte Centrale en Centrale Rotterdam (Zuid-Holland) – Vergelijkbaar in opzet met de Eemshavencentrale, met een deel van de energieopwekking afkomstig uit biomassa.

De hoeveelheid as uit de afvalverwerkende sector, stadsverwarming, de agrosector en de glastuinbouw is aanzienlijk kleiner dan die uit energiecentrales. Bovendien gaat het veelal om kleinschaligere installaties die biomassa verwerken die grotendeels uit Nederland afkomstig is [12]. Het gebruik van lokaal beschikbare reststromen draagt weliswaar bij aan een duurzamere energievoorziening, maar stelt tegelijkertijd hogere eisen aan eventueel hergebruik vanwege de variabiliteit en mogelijke verontreinigingen in de aangeleverde biomassa.

De genoemde hoeveelheden biomassa-assen omvatten zowel bodemas als vliegas. Ter achtergrond, bij verbranding van biomassa ontstaan ruwweg twee asfracties: de grove "bodemas" en de fijnere "vliegas". De verdeling tussen deze twee hangt sterk af van het type verbrandingsinstallatie en verbrandingsmethode waarbij de vliegas fractie ruwweg kan variëren van 80 tot 20% [13]. Bij een hogere verbrandingstemperatuur zal de fractie vliegas hoger zijn, wel dient hierbij te worden opgemerkt dat de totale asopbrengst bij hogere temperatuur lager is.

De biomassa-assen in Nederland zijn voor het overgrote deel afkomstig van binnenlandse installaties. Geïnterviewde deskundigen [4] geven aan dat er mogelijkheden bestaan om biomassa-assen uit het buitenland (bijvoorbeeld België en Duitsland) in Nederland toe te passen. Dit is uiteraard alleen toegestaan wanneer het materiaal voldoet aan de EVOA-richtlijn (Europese Verordening Overbrenging Afvalstoffen) voor grensoverschrijdend transport van afvalstromen, én wanneer het voldoet aan alle Nederlandse toepassings-, markt- en productspecificaties.

Als laatste dient te worden opgemerkt dat genoemde hoeveelheden biomassa-assen zijn gebaseerd op informatie van enkele jaren geleden. Recente ontwikkelingen in het gebruik van biomassa kunnen invloed hebben op huidige stand van zaken, omtrent hoeveelheid en kwaliteit van de assen.

## 2.2 Samenstelling van biomassa-assen

Biomassa-assen bevatten over het algemeen hoge gehalten aan calcium (Ca), magnesium (Mg), kalium (K) en fosfor (P). Verder geldt dat biomassa-assen afkomstig uit hoge temperatuurverbranding veel fijner van korrelgrootte zijn, terwijl assen die voortkomen uit afvalverbranding doorgaans grover van structuur zijn. De chemische samenstelling van biomassa-assen uit biomassacentrales kan aanzienlijk variëren, afhankelijk van het type biomassa en de verbrandingsomstandigheden. Echter, over het algemeen bevatten de assen de volgende bestanddelen:

- Oxiden: siliciumdioxide ( $\text{SiO}_2$ ), calciumoxide ( $\text{CaO}$ ), kaliumoxide ( $\text{K}_2\text{O}$ ), fosforpentoxide ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), aluminiumoxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), magnesiumoxide ( $\text{MgO}$ ), ijzeroxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), zwaveltrioxide ( $\text{SO}_3$ ), natriumoxide ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), mangaanoxide ( $\text{MnO}$ ) en titaandioxide ( $\text{TiO}_2$ ).
- Zware metalen zoals lood (Pb), cadmium (Cd), chroom (Cr), koper (Cu), arseen (As), kwik (Hg), nikkel (Ni) en zink (Zn).
- Residuele organische verontreinigingen, waaronder persistente organische verontreinigende stoffen (POP's), zoals polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's).

In Tabel 2.1 is een beknopt overzicht van de chemische samenstelling van biomassa-assen weergegeven.

Verontreinigingen in de biomassa-assen kunnen afkomstig zijn van bijvoorbeeld verf- en lijmresten, maar is ook van nature aanwezig in de biomassa als gevolg van opname van zware metalen en organische verontreinigingen uit bodem, lucht en water [14].

Tabel 2.1 Chemische samenstelling van biomassa-assen. Bronnen: [10, 15].

Component	Gemiddelde waarde (% of mg/kg)
$\text{SiO}_2$	10–30%
$\text{CaO}$	15–40%
$\text{K}_2\text{O}$	5–15%
$\text{P}_2\text{O}_5$	1–10%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2–10%
$\text{MgO}$	1–8%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1–6%
Zware metalen	Tot enkele honderden mg/kg
POP's (PAK's)	Varieert sterk per bron

Bij de vergelijking van biomassa-as met kolen-as moet worden opgemerkt dat de samenstelling van deze assen verschilt. Kolen(vlieg)as bestaat voornamelijk uit siliciumdioxide ( $\text{SiO}_2$ ), aluminiumoxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ijzeroxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en calciumoxide ( $\text{CaO}$ ). Biomassa-assen bevatten vaak meer calciumoxide. Dit kan de mogelijkheden voor hergebruik beperken.

### 2.2.1 Biomassa-assen en ioniserende straling

Naast bovengenoemde hoofdbestanddelen en eventuele verontreinigingen kunnen de assen ook radioactief Cs-137 bevatten. Dit radionuclide hangt niet samen met de aanwezigheid van zware metalen

zoals vermeld in Tabel 2.1, maar is voornamelijk in het milieu terechtgekomen door nucleaire incidenten, zoals de kernramp in Tsjernobyl in 1986, en door atmosferische kernproeven. Het Cs-137 dat tijdens deze gebeurtenissen vrijkwam, heeft zich langdurig afgezet op bodems en vegetatie en wordt vervolgens door planten opgenomen, wat leidt tot de aanwezigheid ervan in biomassa. Bij verbranding accumuleert het in de as.

Met de aanwezigheid van Cs-137 onderscheidt biomassa-assen zich qua radiologische samenstelling van de meeste andere assen, zoals kolen(vlieg)as, die (vrijwel) uitsluitend radionucliden van natuurlijke oorsprong bevatten. Deze materialen worden ook wel aangeduid als Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). De hoeveelheid Cs-137 in biomassa-assen is sterk variabel. Twee belangrijke oorzaken hiervoor zijn:

- De opname vanuit de bodem naar de plant. Deze wordt beschreven met een zogenoemde *transferfactor* (TF). De TF is een maat voor de efficiëntie waarmee radionucliden van de bodem naar planten worden overgebracht. Voor Cs-137 varieert de TF sterk, afhankelijk van plantensoort, bodemtype, chemische eigenschappen van de bodem en de beschikbaarheid van nutriënten zoals kalium. Kalium en cesium zijn chemisch vergelijkbaar, waardoor een lage kaliumconcentratie in de bodem kan leiden tot een verhoogde opname van Cs-137 door planten [16]. Studies hebben aangetoond dat TF-waarden voor Cs-137 in bomen variëren van  $10^{-3}$  tot  $10^{-1}$  [17].
- Bij de verbranding van biomassa wordt het organische materiaal omgezet in as, waarbij Cs-137 geconcentreerd aanwezig is in de as. De concentratie van Cs-137 in de as wordt beïnvloed door de oorspronkelijke concentratie in de biomassa en de asopbrengst. Een studie rapporteerde dat de verhouding van de Cs-137-concentratie in as tot die in de oorspronkelijke biomassa, kan variëren van ongeveer 70 tot meer dan 200, afhankelijk van het type verbrandingsinstallatie en de gebruikte biomassa [18].

Onderzoek naar de concentraties van Cs-137 in biomassa-assen toont aanzienlijke variaties, afhankelijk van de herkomst van de biomassa en de regio van verzameling. In Zweden werden bijvoorbeeld in de jaren '90 van de vorige eeuw Cs-137-activiteitsconcentraties gemeten in houtchips en asproducten van 13 stadsverwarmingscentrales, waarbij de concentraties sterk varieerden per locatie en gebruikte biomassa [19]. Een andere studie in Griekenland rapporteerde Cs-137-concentraties tot 0,5 Bq/g in asmonsters afkomstig van huishoudelijke houtverbranding [18].

Een studie van Radulovic *et al.* [20] beschrijft de resultaten van een lopende meetcampagne naar de activiteitsconcentraties van zowel Cs-137 als natuurlijke radionucliden in grondstoffen en residuen van enkele Belgische biomassacentrales. De gemeten Cs-137-concentraties in vlieggas varieerden tussen 0,1 en 0,5 Bq/g, terwijl de concentraties in bodemas lagen tussen de 0,005 en 0,05 Bq/g. Resultaten afkomstig van huishoudelijk brandhout dat in België is geïmporteerd, lieten een activiteitsconcentratie zien tot 0,7 Bq/g. Daarbij moet worden

opgemerkt dat dit houtpellets betrof afkomstig uit Wit-Rusland; pellets uit andere landen, bleven in deze studie ruim onder de 0,1 Bq/g.

De aanwezigheid van Cs-137 in biomassa-assen heeft belangrijke implicaties voor het hergebruik van as. In de Europese Unie is een generieke vrijgavewaarde vastgesteld van 0,1 Bq/g voor Cs-137. As met concentraties boven deze grenswaarde kan niet vrij worden toegepast.

Op basis van het voorgaande kan worden gesteld dat twee factoren belangrijk zijn voor de mogelijke aanwezigheid van verhoogde Cs-137-concentraties: de herkomst van de biomassa en de asopbrengst welke met name wordt beïnvloed door de verbrandingstemperatuur. Het gaat hierbij onder andere — maar niet uitsluitend — om biomassa afkomstig uit het Tsjernobyl-vrijzettingsgebied, zoals de Baltische staten, Rusland en Wit-Rusland. Hoge verbrandingstemperaturen leiden tot een lagere asopbrengst, waardoor de Cs-137 concentratie in de as hoger is. Concreet betreft dit de as uit energiecentrales, inclusief de as die ontstaat bij bijstook van biomassa in kolencentrales.

## **2.3 Hergebruik van biomassa-assen**

### **2.3.1**

#### *Overwegingen bij de kwaliteit van biomassa-assen*

Biomassa-assen hebben een aantal eigenschappen die ze geschikt maken als industriële grondstof, zoals de aanwezigheid van waardevolle elementen als calcium, kalium en fosfor. Tegelijkertijd kunnen biomassa-assen ook verontreinigingen bevatten, zoals zware metalen of radioactieve stoffen zoals Cs-137. Deze eigenschappen maken biomassa-assen tot een uitdagende reststof binnen de circulaire economie. Voor een goed begrip van de hergebruiksmogelijkheden van biomassa-assen is het van belang onderscheid te maken tussen verschillende typen assen, op basis van hun kwaliteit, consistentie en de aanwezigheid van toxische bestanddelen.

#### Hoogwaardige biomassa-assen

Deze assen worden verkregen uit de verbranding van houtige biomassa bij hoge temperaturen en zijn het meest geschikt voor hergebruik bv. als cementtoevoeging [21]. Dit betreft onder andere assen afkomstig uit de bijstook van biomassa in kolencentrales. Wel kan er als gevolg van de hoge verbrandingstemperatuur sprake zijn van naar verhouding hoge Cs-137 concentraties.

#### Laagwaardige biomassa-assen

Dit betreft onder andere biomassa-assen afkomstig van de verbranding van afvalhout in biomassacentrales. Hierbij wordt laagwaardig snoei- en afvalhout, waaronder verlijmd, gelakt of geverfd hout en geïmpregneerd of verduurzaamd hout verbrand, maar ook de groente-, fruit- en tuinafval (GFT). Dit gebeurt in aparte biomassa-installaties. Deze biomassa-centrales hanteren, in vergelijking met energiecentrales, lagere verbrandingstemperaturen om een snellere verwerking van afval te realiseren. Dit resulteert in assen van mindere kwaliteit. Daarnaast kunnen ze als gevolg van bijvoorbeeld sloophout hogere toxische stoffen bevatten, waardoor ze als milieufval moeten worden geclassificeerd. Voor hergebruik van deze assen kan een voorbereiding zoals reinigen of vermalen vereist zijn.

### 2.3.2 *Toepassingsmogelijkheden van biomassa-assen*

Biomassa-assen kunnen op verschillende manieren worden toegepast. Traditionele toepassingen zijn onder andere de verbetering van bodem- en plantgroeiomstandigheden, het verwerken in cement en beton, het gebruik als vulstof in asfalt voor de wegenbouw, en het opvullen van ondergrondse mijnholtes.

Een hoogwaardige toepassing van biomassa-assen is het gebruik in cement. Dit betreft hoofdzakelijk de biomassa-vliegassen afkomstig uit energiecentrales die toepassing vinden als toeslagmateriaal in zg. Portlandvliegascement.

Beton is een composietmateriaal dat voornamelijk bestaat uit de bestanddelen cement, water en aggregaten zoals zand en grind. Het bindmiddel, meestal Portlandcement, reageert met water in een chemisch proces dat hydratatie wordt genoemd en vormt een harde matrix die het beton zijn sterkte geeft. Naast de standaardbestanddelen kan ook vlieggas worden toegevoegd, afkomstig van kolenverbranding of deels vervangen door biomassa-vlieggas, wat leidt tot Portlandvliegascement (PFA-cement). Vlieggas verbetert de verwerkbaarheid en duurzaamheid van beton. Vulstoffen zijn materialen die zelf niet bindend zijn, maar het volume en de dichtheid verhogen en de cementmatrix ondersteunen; zand en grind functioneren hierbij als vulstof.

De toepassing van biomassa-vlieggas draagt bij aan CO<sub>2</sub>-reductie en een vermindering van de hoeveelheid afval die gestort moet worden [13] (NB: biomassa-as waarin de concentratie Cs-137 de vrijgavegrens overschrijdt, mag niet gestort worden, zie paragraaf 3.1). Door het gericht samenstellen van brandstofmengsels kan de chemische samenstelling van de resulterende as worden geoptimaliseerd voor toepassing in cement.

Hoogwaardige biomassa-assen kunnen direct worden ingezet ter vervanging van kolenvlieggas in Portlandvliegascement. Dit leidt tot een verhoogde kwaliteit van het beton waarin het cement wordt toegepast. Er is hier dus sprake van een waardevolle grondstof, niet van een verdunningsmiddel dat wordt toegevoegd om binnen normgrenzen te blijven. De huidige Europese norm EN 450 maakt het mogelijk om een deel van de kolenvlieggas in cement te vervangen door calciumrijke biomassa-assen. Op basis van de chemische samenstellingseisen zoals vastgelegd in EN 450-1 kan tot ongeveer 20% van de toegestane vliegasfractie door biomassa-assen worden vervangen [4].

Het is belangrijk om op te merken dat cement waarin biomassa-assen worden verwerkt momenteel alleen wordt gebruikt voor **niet-constructief beton** [22]. Voorbeelden van dergelijke toepassingen zijn: tegels, straatstenen, trottoirbanden, vloerplaten en rioolbuizen. De regelgeving voor constructief en niet-constructief beton verschilt, en er zijn voornamelijk geen significante toepassingen van biomassa-assen in de woningbouw. Op termijn zal waarschijnlijk ook gerecycled beton, bijvoorbeeld als betongranulaat, zijn weg vinden naar de woningbouw.

Verwacht wordt dat deze overgang een tijdschaal kent van 20 tot 30 jaar — vergelijkbaar met de halveringstijd van Cs-137.

Inzet van biomassa-assen als **vulstof in beton** is daarentegen lastiger te bewerkstelligen, omdat de assen reactief zijn [23]. Andere toepassingen van biomassa-assen binnen Nederland zijn het gebruik als **vulstof in de asfaltindustrie** en bij **grondstabilisatie** [22], waarvoor veelal assen worden gebruikt die laagwaardiger van kwaliteit zijn.

In Scandinavische landen worden biomassa-assen soms ook ingezet als **kunstmest**, met name in de bosbouw. Dit komt doordat biomassa-assen doorgaans onvoldoende nutriënten bevatten voor toepassing in de landbouw [24]. In een studie uit 2019 concluderen Silva *et al.* [25] dat biomassa-assen onderbenut zijn als meststof omdat een EU-kader hiervoor ontbreekt en slechts enkele landen eigen regelgeving en richtlijnen hiervoor hebben ontwikkeld. In de studie wordt niet ingegaan op de potentiële aanwezigheid van Cs-137. Ook in Nederland is onderzoek gedaan naar de hergebruiksmogelijkheden van as uit biomassa als meststof [26]. Echter, dit heeft niet geleid tot brede toepassing in Nederland.



## 3 Stralingsbescherming

Hergebruik van Cs-137 bevattende biomassa-assen kan leiden tot blootstelling van werknemers en/of leden van de bevolking. In dit hoofdstuk beschrijven we bestaande Nederlandse wet- en regelgeving voor stralingsbescherming die beperkingen oplegt aan hergebruik dan wel hergebruik stimuleert. Daarnaast geven we een overzicht van Europese regelgeving en kaders in Europese landen die voor de Nederlandse situatie relevant kunnen zijn. We besluiten dit hoofdstuk met een schatting van de doses voor werknemers en voor leden van de bevolking die het gevolg kunnen zijn van hergebruik van Cs-137 bevattende vliegassen.

### 3.1 Wetgeving m.b.t. straling en biomassa-assen en toepassingsmogelijkheden

In dit hoofdstuk geven we beknopte informatie over regelgeving voor kunstmatige en van nature voorkomende nucliden. De reden hiervoor is tweeledig: om de resultaten van dit rapport breder toepasbaar te maken dan de casus Cs-137 bevattende biomassa-assen, is het zinvol ook van nature voorkomende radionucliden te beschouwen. Andere restmaterialen die mogelijk in aanmerking zouden komen voor hergebruik kunnen namelijk ook natuurlijke radionucliden bevatten. Dit geldt ook voor biomassa-assen. De tweede reden is, dat in sommige landen voor Cs-137 (deels) de regelgeving voor van nature voorkomende radionucliden geldt (paragraaf 3.3). Door ook regelgeving voor van nature voorkomende nucliden te beschrijven, maken we de consequenties van dergelijk beleid voor de casus Cs-137 in biomassa-assen inzichtelijk.

Relevante Nederlandse wet- en regelgeving zijn o.a. het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (hierna: Bbs) [2] en de ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (hierna: Verordening) [27].

#### 3.1.1 Algemene eisen

Voor het zich ontdoen van radioactieve restmaterialen is in principe een vergunning vereist. Onder voorwaarden kan restmateriaal **generiek** vrijgegeven (art. 3.20 van het Bbs) worden: deze voorwaarden betreffen de activiteitsconcentraties in vast restmateriaal. Voor een groot aantal radionucliden zijn grenswaarden voor de activiteitsconcentraties, zogenaamde vrijgavewaarden, opgenomen in het Bbs [2], zie ook Tabel 3.1. Voor Cs-137 is de grenswaarde 0,1 Bq/g.

De vrijgavewaarden voor **kunstmatige** radionucliden zijn gebaseerd op scenarioberekeningen uit IAEA SRS-44 [28], waarbij een dosiscriterium van 10 microSv/jaar is gebruikt. Voor generiek vrijgegeven materiaal is er vanuit de stralingsbeschermingsregelgeving geen beperking aan de toepassingen waarvoor het kan worden gebruikt.

De vrijgavewaarden voor **van nature voorkomende** radionucliden zijn niet gebaseerd op scenario's en dosiscriteria, maar op

activiteitsconcentraties van deze radionucliden in het milieu (zie IAEA SRS-44 [28], de oorspronkelijke waarden zijn afkomstig van UNSCEAR [29]). Hierbij geldt echter een uitzondering voor "recycling van restmateriaal in bouwmaterialen (...)". Hiervoor moet worden aangetoond dat is voldaan aan het referentieniveau voor door bouwmaterialen uitgezonden gammastraling (1 mSv/jaar bovenop de externe blootstelling buitenshuis, Bbs art. 9.10, 8<sup>e</sup> lid), zoals beschreven in art. 6.21 van het Bbs [2]. Dit kan bijvoorbeeld met de indexmethode beschreven in Tabel 3.1.

Het Bbs staat toe dat voor specifieke materialen of specifieke routes afwijkende (hogere) vrijgavewaarden worden vastgesteld (art. 3.21, en bijlage 3, onderdeel A, onderdeel 2, onder c). Om deze **specifieke** vrijgavewaarden af te leiden zijn blootstellingsscenario's nodig. Deze scenario's kunnen anders zijn dan de scenario's die ten grondslag liggen aan de generieke vrijgavewaarden. Bij specifieke vrijgave is het effectieve specifieke-dosis criterium voor leden van de bevolking 10 microSv/jaar voor **kunstmatige** radionucliden (Bbs, Bijlage 3 onderdeel A, 3e lid) en 300 microSv/jaar voor **van nature voorkomende** radionucliden (Verordening, art. 3.20, 4e lid). Toestemming voor het verdunnen van het radioactieve restmateriaal kan onderdeel zijn van de beschikking voor specifieke vrijgave (Bbs art. 3.23).

Het Besluit stortplaatsen en stortverboden afvalstoffen (art. 11k) [30] staat toe dat materiaal dat **van nature voorkomende** radionucliden bevat, waarbij de activiteitsconcentratie meer dan 1x, maar maximaal 10x de generieke vrijgavewaarde is, wordt gestort op een daarvoor aangewezen deponie. Radioactieve stoffen met **kunstmatige** radionucliden die niet specifiek kunnen worden vrijgegeven, kunnen alleen als 'radioactief afval' worden afgevoerd naar de COVRA voor opslag. Voor Cs-137 bevattende biomassa-assen is afvoer naar COVRA een buitengewoon kostbare optie, omdat het volume van de assen dat zou moeten worden afgevoerd, groot is.

In principe kunnen materialen na specifieke vrijgave worden gerecycled. Het instrument specifieke vrijgave kan daarom worden ingezet om de hoeveelheid radioactief afval te minimaliseren. Minimalisatie is één van de uitgangspunten in het nationale programma voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen (NPRA) uit 2016 [31]. Dit is ook onderdeel van de zorgplicht van de ondernemer (Bbs art. 10.2).

In een recent gepubliceerd RIVM-rapport [32] concluderen de auteurs dat toepassing van het instrument specifieke vrijgave in de praktijk dermate complex is, dat dit waarschijnlijk belemmerend werkt. Het rapport bevat de aanbeveling om het instrument specifieke vrijgave toegankelijker te maken voor recycling van radioactieve materialen, door:

- generieke rechtvaardiging voor recycling in de Regeling op te nemen, en;
- voorbeelden van blootstellingsscenario's voor recycling beschikbaar te stellen.

Voor meer informatie over het instrument specifieke vrijgave verwijzen we naar het rapport.

Tot slot merken we op dat de generieke vrijgavewaarden zijn afgeleid voor generieke blootstellingsscenario's. Volgens het IAEA zijn deze mogelijk niet geschikt voor grote hoeveelheden materiaal, bijvoorbeeld afgegraven grond, omdat in deze gevallen de in de scenario's gebruikte verdunningsfactoren niet altijd realistisch zijn [33]. Het kan in dat geval nodig zijn, modellen te gebruiken die aangepast zijn aan de specifieke situatie. Dit kan relevant zijn bij hergebruik van grote hoeveelheden restmaterialen. In de blootstellingsscenario's in paragraaf 3.4 is daarom met aangepaste verdunningsfactoren gerekend.

Tabel 3.1 Overzicht van vrijstellings- en vrijgavewaarden, en referentieniveau uit de regelgeving.

<b>Uittreksel uit Bbs [2] en de Verordening [27]</b>			
<b>Vrijstelling- en vrijgavewaarde (Bbs bijlage 3 Tabel A)</b>	NORM	U-238 reeks en Th-232 reeks: 1 Bq/g  K-40: 10 Bq/g	(niet gebaseerd op dosiscriterium)
	Kunstmatig	Cs-137: 0,1 Bq/g	10 microSv per jaar (effectieve dosis, lid van de bevolking)
<b>Referentieniveau (Bbs art. 9.10)</b>		1 mSv per jaar ( $\gamma$ -straling bovenop blootstelling buitenshuis)	
<b>Index voor activiteitsconcentratie* (Verordening, bijlage 11)</b>		$I = C_{Ra-226}/0,3 + C_{Th-232}/0,2 + C_{K-40}/3$ (Bq/g)	

Opmerking bij de tabel:

\*: Screeninginstrument om bouwmaterialen te identificeren die mogelijk leiden tot overschrijding van het referentieniveau van 1 mSv/jaar (als  $I > 1$ ). In dat geval moet een specifieke dosisbeoordeling worden uitgevoerd, rekening houdend met de specifieke eigenschappen en het gebruik van het bouw materiaal.

### 3.1.2

#### *In de praktijk*

Begin 2025 heeft de ANVS toestemming gegeven aan RWE in Geertruidenberg voor het verwerken (verdunnen) van biomassa-as met Cs-137, zodat de as kan worden hergebruikt in bouwstoffen [34, 35]. Een vergunning voor het hergebruik van radioactieve restmaterialen met kunstmatige radionucliden is voor zover bekend bij de auteurs slechts één keer eerder afgegeven. Het betrof toen ontmantelingsmateriaal met kunstmatige radionucliden (zie [32] voor meer informatie). Omdat Cs-137 een kunstmatig nuclide is, kunnen als geen beschikking voor specifieke vrijgave wordt afgegeven deze assen alleen worden afgevoerd naar COVRA.

Enkele belangrijke punten uit de vergunning van RWE, en de aanvraag daarvan, zijn hieronder genoemd:

- Het verwerken bestaat uit het mengen van de niet-vrijgegeven biomassa-assen met vrijgegeven biomassa-assen (beide geproduceerd door RWE), zodat de resulterende activiteitsconcentratie Cs-137 onder de generieke vrijgavegrens ligt. (We merken hierbij op dat het mengen van radioactieve stoffen om de activiteitsconcentratie te verlagen met het oog op

hergebruik of recycling bij beschikking of verordening van de ANVS kan worden toegestaan, Bbs artikel 3.23.)

- Ondanks dat de uiteindelijke biomassa-assen generiek vrijgegeven zijn, stelt de ANVS eisen aan de mogelijke hergebruikroutes [36]. De biomassa-assen mogen enkel worden gebruikt in secundaire bouwstoffen (dat wil zeggen: in weg-, water- en mijnbouw, en niet voor kantoor- en woningbouw). Deze opvallende terughoudendheid werkt in de praktijk belemmerend bij hergebruik.
- Het betreft een tijdelijke vergunning. RWE heeft aangegeven de binnenkomende biomassa te bemonsteren en analyseren, om zo te voorkomen dat nieuwe partijen radioactieve biomassa-assen ontstaan. RWE moet voor 15 juni 2026 de opgeslagen biomassa-assen verwerken.
- Het traject van de vergunningaanvraag voor het verwerken van vlieggas heeft ongeveer twee jaar geduurd (datum vergunning 23 april 2025 [35], eerste aanvraag 13 april 2023 [37], hiervoor was al een vergunning afgegeven voor de tijdelijke opslag van het vlieggas). Een langdurige procedure is niet onverwacht voor dergelijke nieuwe situaties, maar kan wel een belemmering zijn voor ondernemers om restmaterialen te hergebruiken.

Tijdens interviews [5, 6] werd benoemd dat verschillen in wet- en regelgeving voor kunstmatige en van nature voorkomende radionucliden in het traject van vergunningverlening voor hergebruik belemmerend werken. Dit is niet beperkt tot cesiumhoudende biomassa-assen. Zoals in paragraaf 3.1.1 beschreven, gelden voor vrijgave van de van nature voorkomende radionucliden en radionucliden van kunstmatige oorsprong andere vrijgavewaarden, die ook op verschillende manieren worden afgeleid. Bij restmaterialen die een mengsel van natuurlijke en kunstmatige radionucliden bevatten, kan het voorkomen dat de regelgeving beperkend is voor de hoeveelheid kunstmatige radionucliden, terwijl de natuurlijke radionucliden een hogere dosis geven. Tijdens interviews is benoemd dat dit lastig is uit te leggen, en daarmee enigszins belemmerend werkt [4, 6].

### 3.2 Internationale richtsnoeren

Internationale richtlijnen laten hergebruik en recycling van radioactieve reststoffen toe, maar zijn weinig specifiek.

In richtlijn 2013/59/Euratom [38] zijn criteria gegeven voor het vaststellen van vrijgavegrenswaarden voor specifieke vrijgave. Het IAEA stelt dat het instrument specifieke vrijgave past binnen de graduele aanpak [33]. Het kan worden ingezet voor hergebruik en recycling van radioactieve reststoffen, om zo de hoeveelheid radioactief afval te minimaliseren. Het IAEA geeft in GSG-18 [33] algemene aanbevelingen voor specifieke vrijgave, onder andere voor het afleiden van vrijgavegrenswaarden. Specifieke aanbevelingen over recycling van biomassa-assen met Cs-137 zijn niet gegeven.

### 3.3 Regelgeving in de ons omringende landen

Blootstelling aan Cs-137 in biomassa(assen) wordt in sommige landen beschouwd als een bestaande blootstellingssituatie, waarvoor referentieniveaus gelden in plaats van vrijgavegrenswaarden [39]. Een

argument hiervoor is dat richtlijn 2013/59/Euratom als voorbeeld van bestaande blootstellingssituaties geeft "blootstelling aan grondstoffen met uitsluiting van voedsel, diervoeder en drinkwater" voor "activiteiten in het verleden die nooit aan een officiële controle onderworpen werden" (waaronder dus ongevallen). Andere landen, zoals Finland, beschouwen blootstelling aan Cs-137 in biomassa-assen als een geplande blootstellingssituatie. Argumenten hiervoor zijn dat het Cs-137 in de assen wordt geconcentreerd en dat hoge activiteitsconcentraties Cs-137 zijn te voorkomen door biomassa uit bepaalde regio's niet te gebruiken.

Finland en België zijn voorbeelden van landen waar Cs-137 in biomassa wordt beschouwd als een bestaande blootstellingssituatie [39]. In Finland zijn ook referentieniveaus vastgesteld voor biomassa-assen in bouwmaterialen, terwijl in België het referentieniveau tot nu toe enkel geldt voor biomassa (brandhout) voor privégebruik.

De regelgeving in Finland en Zweden wordt in de rest van deze paragraaf in meer detail besproken. Dit zijn beide landen met een grote bosbouwsector en relatief veel depositie Cs-137 als gevolg van het ongeval in Tsjernobyl.

Opvallend is dat in een IEA-rapport over hergebruik van vliegassen in verschillende Europese landen en Canada stralingsbeschermingsaspecten niet aan de orde komen [8].

### 3.3.1 Regelgeving in Finland

De Finse regelgeving over blootstelling aan natuurlijke straling (STUK S/6/2022) bevat ook voorschriften over Cs-137 [40, 41]. Cs-137 wordt in zekere zin behandeld als een van nature voorkomend radionuclide.

Voor bouwmaterialen geldt dat de dosis voor leden van de bevolking moet worden bepaald uit de activiteitsconcentraties van Ra-226, Th-232, K-40 en aanwezige kunstmatige radionucliden die gammastraling uitzenden (zoals Cs-137). Indien de activiteitsconcentratie Cs-137 in beton voor woningbouw hoger is dan 0,05 Bq/g, zijn hier aparte dosisbepalingen voor nodig<sup>1</sup>. Deze activiteitsconcentratie komt, in een conservatief scenario (betonnen muren, vloeren en dak) overeen met een effectieve externe dosis van ongeveer 0,1 mSv per jaar, dat wil zeggen, 10% van het referentieniveau voor gammastraling van bouwmaterialen [42]. Voor bouwmaterialen gebruikt in wegenbouw of grondwerk zijn index-methoden beschikbaar, waarin ook Cs-137 is meegenomen.

Biomassa-assen met Cs-137 mogen in Finland ook worden gebruikt als meststof in de bosbouw (maximaal 10 ton/ha over een periode van 20 jaar) als activiteitsconcentraties Cs-137 en van nature voorkomende radionucliden voldoen aan een index-berekening.

Voor handelingen met materialen met van nature voorkomende radionucliden en Cs-137 geldt dat dosisbepalingen voor werknemers en leden van de bevolking niet nodig zijn indien:

<sup>1</sup> Het biomassa-vliegas dat (eventueel) in het beton is verwerkt kan dus een hogere activiteitsconcentratie hebben.

- De activiteitsconcentraties van de van nature voorkomende radionucliden lager zijn dan de vrijgavegrenswaarde, en
- De activiteitsconcentratie Cs-137 lager is dan 5 Bq/g (voor werknemers) of 1 Bq/g (voor leden van de bevolking).

Een samenvatting van de Finse voorschriften over Cs-137 is gegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Index-methoden gebruikt in Finland voor van nature voorkomende radionucliden en Cs-137.

Toepassing	Voorschrift
Generieke vrijgavegrens	0,1 Bq/g
Cs-137 in beton	Geen aparte dosisberekening nodig voor Cs-137 indien <0,05 Bq/g
As als meststof (bosbouw), tot max. 10 ton/ha over een periode van 20 jaar.	$I = C_{Th-x}/4 + C_{U-x}/5 + C_{K-40}/100 + C_{Cs-137}/8$ (Bq/g) (zie opm.)
Bouwmaterialen (woningen)	$I = C_{Th-232}/0,2 + C_{Ra-226}/0,3 + C_{K-40}/0,1$ (Bq/g)
Bouwmaterialen (wegenbouw)	$I = C_{Th-232}/0,5 + C_{Ra-226}/0,7 + C_{K-40}/8 + C_{Cs-137}/2$ (Bq/g)
Bouwmaterialen (overig grondwerk)	$I = C_{Th-232}/1,5 + C_{Ra-226}/2 + C_{K-40}/20 + C_{Cs-137}/5$ (Bq/g)
Handelingen met materialen	Geen dosisbepaling nodig indien $C_{Cs-137} < 5$ Bq/g (voor werknemers) of $C_{Cs-137} < 1$ Bq/g (voor leden van de bevolking)

Opmerkingen bij de tabel:

Th-x: hoogste activiteitsconcentratie van Th-232, Ra-228, Th-228

U-x: hoogste activiteitsconcentratie van U-238, Ra-226 en Pb-210

### 3.3.2

#### Regelgeving in Zweden

Zweedse regelgeving over Cs-137 in biomassa-assen is te vinden in SSMFS 2012:3 [43]. De voorschriften gelden voor energiecentrales die meer dan 100 ton as per jaar produceren<sup>2</sup>. De afvoerroute van de assen hangt af van de activiteitsconcentratie Cs-137 en de uitkomst van een indexberekening (voor van nature voorkomende radionucliden):

- >10 Bq/g Cs-137 of index >1: afvoer naar een geschikte deponie;
- <10 Bq/g Cs-137 en index <1: hergebruik mogelijk, onder voorwaarden;
- <1 Bq/g Cs-137 en index <1: de assen worden niet aangemerkt als besmet. Daarmee lijken er geen restricties voor hergebruik. Merk op: deze limiet is specifiek voor as en is hoger dan de generieke vrijgavewaarde voor Cs-137 in Zweden van 0,1 Bq/g [44].

De hergebruikopties genoemd in de Zweedse regelgeving SSMFS 2012:3 [43] zijn: gebruik in de wegenbouw of als opvulmateriaal en gebruik als meststof of bodemverbeteraar in de bosbouw (met uitzondering van

<sup>2</sup> 100 ton as komt overeen met een kleine biomassa-centrale (voor Nederlandse begrippen) [9].

gebieden waar een groot deel van de bodem is bedekt met korstmossen en rendieren grazen). Voor gebruik in de bosbouw raadt het Zweedse bestuursorgaan voor bosbeheer aan om maximaal 3 ton as per hectare te gebruiken per rotatieperiode (dat wil zeggen: er wordt gemest wanneer het hout wordt gekapt) [25]. Er wordt bemest om verzuring tegen te gaan en om de nutriënten die door het kappen worden onttrokken weer aan te vullen [45]. Het Zweedse bestuursorgaan voor bosbeheer geeft ook aanbevelingen over de samenstelling van de assen (zoals maximale concentraties zware metalen) en stelt dat as uit bepaalde regio's<sup>3</sup> moet worden getest op Cs-137 zodat deze de eerder genoemde grens van 10 Bq/g niet overschrijdt [46]. Voor toepassingen in de wegebouw of als opvulmateriaal geldt dat het dosistempo 1 meter boven het wegdek maximaal 0,5 microSv/uur boven de achtergrond mag zijn. Eventueel kan een afdekmateriaal worden toegepast. Tot slot geldt voor stort op een deponie, gebruik in de wegebouw, en gebruik als opvulmateriaal een dosiscriterium van 10 microSv/jaar voor blootstelling van leden van de bevolking (door uitloging naar oppervlakte- of grondwater).

### 3.4 Stralingsrisico's bij hergebruik van biomassa-assen

In deze paragraaf worden enkele eenvoudige scenarioanalyses en blootstellingsberekeningen gepresenteerd om te illustreren welke stralingsrisico's te verwachten zijn bij hergebruik van biomassa-assen met Cs-137. Het gaat om eenvoudige berekeningen, op basis van bestaande scenario's (met name IAEA SRS-44 [28]) en (zeer) conservatief geschatte invoerparameters. In de praktijk zijn mogelijk gedetailleerdere berekeningen nodig.

In deze paragraaf worden alleen de belangrijkste resultaten van de blootstellingsberekeningen gegeven. Details over de blootstellingsscenario's en gebruikte invoerparameters zijn gegeven in Bijlage 1.

#### 3.4.1 *Eisen aan blootstellingsberekeningen*

Voordat radioactieve restmaterialen specifiek kunnen worden vrijgegeven, moet worden aangetoond dat het materiaal voldoet aan de vrijgavecriteria. Dit betekent in de praktijk dat de vergunninghouder blootstellingsberekeningen moet doen. In de Verordening (art. 3.20, 2<sup>e</sup> lid, onder c) staan een aantal rekenmethodieken die hiervoor geschikt zijn.

Welke blootstellingsscenario's relevant zijn zal sterk afhangen van het restmateriaal en het beoogde gebruik hiervan. Hierbij moet niet alleen worden gedacht aan blootstelling door het uiteindelijke gebruik van het restmateriaal (bijvoorbeeld: een weg bestaande uit bouw materiaal waarin het restmateriaal is verwerkt), maar ook aan blootstelling tijdens de verwerking van het restmateriaal. Voor langlevende radionucliden kan ook het toekomstige hergebruik van het materiaal waarin reststoffen zijn gerecycled relevant zijn. Voor biomassa-assen kan dit bijvoorbeeld zijn het hergebruik in constructief beton van cement waaraan vlieg-as is toegevoegd. (In dit geval vindt dus twee keer hergebruik of recycling plaats.) Het is dus te verwachten dat er

<sup>3</sup> Het gaat om regio's in Zweden met hoge depositie Cs-137 na het ongeval in Tsjernobyl.

meerdere verwerkings- en gebruiksstappen zijn, waarbij verschillende personen kunnen blootstaan.

In veel verwerkingsstappen zal enige mate van verdunning plaatsvinden, waardoor de activiteitsconcentratie tijdens het proces van recycling afneemt. De effectieve dosis die een persoon ontvangt hangt daarnaast af van de blootstellingsweg (externe blootstelling, inhalatie, ingestie) en overige blootstellingsparameters, zoals blootstellingstijd (bij externe blootstelling) of de mate van resuspensie (bij inhalatie).

Voor sommige restmaterialen kan er sprake zijn van heterogeniteit (hotspots), waar rekening mee moet worden gehouden in de blootstellingsberekeningen.

### 3.4.2

#### *Blootstellingsscenario's en resultaten van blootstellingsberekeningen*

Voor de blootstellingsberekeningen zijn scenario's uit IAEA SRS-44 [28] en uit RIVM-rapport 2022-0184 gebruikt [47]. De berekeningen zijn gedaan voor vliegias met een oorspronkelijke activiteitsconcentratie van 1 Bq/g Cs-137 (tien keer de vrijgavegrenswaarde uit het Bbs). Vervolgens wordt voor elke verwerkingsstap i) een verdunningsfactor geschat en ii) bepaald wie blootstaat aan de assen (werknemers of leden van de bevolking). Zo wordt bepaald welke scenario's uit IAEA SRS-44 en RIVM-rapport 2022-0184 van toepassing zijn. Met uitzondering van de verdunningsfactoren zijn de scenario's niet aangepast.

Tabel 3.3 geeft de resultaten van de blootstellingsscenario's met de hoogste dosis voor werknemers en leden van de bevolking. Resultaten van blootstellingsberekeningen van andere verwerkingsstappen in het hergebruik van vliegias zijn gegeven in Bijlage 1.

*Tabel 3.3 Geschatte maximale blootstelling van werknemers en leden van de bevolking bij hergebruik van vliegias met Cs-137.*

Stap	Persoon	Omschrijving	Blootstellingsweg	Effectieve dosis (microSv/jaar per Bq/g in onverdund vliegias)
I	Werknemer	Komt overeen met scenario WL uit IAEA SRS-44: werknemer die 450 uur/jaar werkt met (onverdund) vliegias.	Ingestie Inhalatie Externe blootstelling	$4,5 \cdot 10^1$
VI	Lid van de bevolking	Komt overeen met scenario RH uit IAEA SRS-44: persoon die 4500 uur/jaar gebruik maakt van betonnen constructie (woning), gemaakt van gerecycled beton.	Externe blootstelling	$9,5 \cdot 10^0$

Voor leden van de bevolking is de effectieve dosis dus maximaal 9,5 microSv/jaar per Bq/g Cs-137 in de oorspronkelijke, onverdunde vliegias. Het blootstellingsscenario beschrijft gebruik als gerecycled beton in de woningbouw. Het betreft hier dus een tweede keer dat recycling plaatsvindt. Recycling van cement dat as bevat is typisch te

verwachten enkele tientallen jaren na de productie van het cement. In de tussenliggende periode zal een deel van het Cs-137 vervallen zijn.

Werknemers ontvangen een hogere dosis (45 microSv/jaar per Bq/g Cs-137, ongeveer een factor 5 hoger), omdat zij in contact komen met materiaal dat minder is verdund.

Hierbij wordt nogmaals benadrukt dat de gebruikte verdunningsfactoren conservatief zijn. Ter vergelijking: de effectieve dosis van werknemers die handelingen uitvoeren met vliegas wordt door RWE in de RI&E bij de vergunningaanvraag [48] geschat op maximaal 7,9 microSv/jaar per Bq/g Cs-137 in het vliegas. De blootstellingsweg is inhalatie, en in de berekeningen wordt (zeer) conservatief aangenomen dat de stofconcentratie in de lucht 3,6 g/m<sup>3</sup> is. Voor externe blootstelling is het dosistempo berekend in de cabine van een vrachtwagen met vliegas en buiten een opslagsilo voor vliegas: dit was 0,035 respectievelijk 0,078 microSv/uur per Bq/g Cs-137 in het vliegas. Deze dosistemporen zijn lager dan die gebruikt in IAEA SRS-44 voor blootstellingsscenario's WL voor een werknemer en RH voor een lid van de bevolking (0,102 respectievelijk 0,191 microSv/uur per Bq/g Cs-137).

De berekeningen zijn gedaan voor biomassa-as met 1 Bq/g Cs-137, en moeten dus nog worden geschaald met de werkelijke activiteitsconcentratie. Mogelijke activiteitsconcentraties zijn besproken in paragraaf 3.1.1. Hieruit blijkt dat biomassa-as in Nederland naar alle waarschijnlijkheid minder dan 1 Bq/g Cs-137 zal bevatten.

### 3.4.3 *Discussie*

De effectieve dosis voor leden van de bevolking is ongeveer 10 microSv/jaar per Bq/g Cs-137 in vliegas, en naar verwachting <10 microSv/jaar voor biomassa-as in Nederland. Deze dosis is daarmee vergelijkbaar met de dosislimiet voor vrijgave van Cs-137. Vanuit stralingshygiënisch oogpunt zou er daarom geen bezwaar zijn tegen deze vorm van hergebruik, ondanks dat het oorspronkelijke vliegas niet generiek kan worden vrijgegeven. De dosis die leden van de bevolking ontvangen, is onder de hier gebruikte aannames lineair afhankelijk van de concentratie Cs-137 in de onbewerkte vliegassen.

Voor werknemers geldt dat zij blootstaan indien het materiaal wordt hergebruikt maar ook indien het materiaal wordt afgevoerd als afval. In dit rapport is geen vergelijking gemaakt van de dosis voor werknemers bij hergebruik en die bij afvoer als afval. Dit kan wel relevante informatie zijn voor een besluit over hergebruik.

Zoals besproken in paragraaf 3.3 wordt Cs-137 in sommige landen beheerd als een bestaande blootstellingssituatie. Een vergelijking van de blootstelling aan NORM in bouwmaterialen en Cs-137 in bouwmaterialen kan daarom nuttig zijn.

Typische activiteitsconcentraties in beton voor Nederlandse woningbouw zijn gegeven in Tabel 3.4. De concentratie Cs-137 in constructief beton voor woningbouw (gerecycled beton) zal naar verwachting maximaal 0,01 Bq/g zijn per Bq/g Cs-137 in vliegas (zie Bijlage 1, voor meer informatie over de verdunningsfactoren).

Tabel 3.4 Gemiddelde activiteitsconcentraties in beton voor Nederlandse woningbouw [49]. In andere materialen, zoals baksteen, liggen de concentraties een factor 4-5 hoger.

Nuclide	Activiteitsconcentratie (Bq/g)
K-40	0,160
Ra-226	0,024
Th-232	0,018

In RIVM-rapport 2021-0032 [50] wordt de effectieve dosis door gammastraling uit bouwmaterialen in Nederlandse woningen geschat op basis van metingen en modelberekeningen. Deze is 0,20 mSv/jaar voor een verblijfsduur binnenshuis van 4500 uur/jaar (dezelfde verblijfsduur als in scenario RH uit IAEA SRS-44)<sup>4</sup>. Dit is een factor 20 hoger dan de berekende effectieve dosis als gevolg van blootstelling aan Cs-137 in constructief beton (scenario VI, bij 1 Bq/g Cs-137 in vliegias). De bijdrage van Cs-137 aan de totale stralingsbelasting door bouwmaterialen zal dus beperkt zijn, bij hergebruik van vliegias dat 1 Bq/g Cs-137 bevat.

### 3.5 Stimulansen en belemmeringen

In onderstaande tabel geven we scores voor verschillende aspecten, waarbij 1 sterk belemmerend is en 5 sterk stimulerend. Zie hoofdstuk 9 voor meer informatie.

Aspect	Score	Toelichting
<i>1. Wetgeving m.b.t straling</i>		
Minimalisatie	5	Minimalisatie radioactief afval is een beleidsdoel
Instrument specifieke vrijgave bestaat	5	Er is een bestaand juridisch kader voor hergebruik
Beschikbaarheid afvoerroutes	3	Voor biomassa-assen is het ontbreken van afvoerroutes een stimulans voor hergebruik. Voor NORM is stort op een deponie mogelijk, wat een belemmering kan zijn voor het ontwikkelen van hergebruiksmogelijkheden.
Toepassing van specifieke vrijgave	2	Het instrument is complex, zie RIVM-rapport 2024-0073 [32]

<sup>4</sup> De bijdrage van kosmische en terrestrische straling binnenshuis, en de afschermdende werking van de woning, zijn hierin niet verdisconteerd. Wordt dit wel meegenomen, is de effectieve dosis binnenshuis 0,05 mSv/jaar hoger dan de effectieve dosis bij 100% verblijftijd buitenshuis.

<b>Aspect</b>	<b>Score</b>	<b>Toelichting</b>
Onderscheid tussen kunstmatige en natuurlijke radionucliden	2	Genoemd als belemmering (lastig uit te leggen), maar streng dosiscriterium voor kunstmatige radionucliden kan stimulerend werken i.v.m. afwezigheid van geschikte afvoerroutes.
Complexiteit vergunningsproces	2	Proces vergunningaanvraag kan tijdrovend zijn. Als meer praktijkervaring wordt opgedaan, is versnelling mogelijk. Eisen in de vergunning kunnen strenger zijn dan de wetgeving
<i>2. Internationale richtsnoeren</i>		
Kaders voor hergebruik	3	Kaders bestaan, BSS laat hergebruik toe, maar specifieke kaders ontbreken
Beschikbaarheid scenario's	4	O.a. IAEA SRS-44 en RP 122 beschrijven blootstellingsscenario's (mogelijk zijn aanvullende scenario's nodig voor grote hoeveelheden)
Graduele aanpak	4	IAEA geeft aan dat specifieke vrijgave voor hergebruik past binnen de graduele aanpak
<i>3. Regelgeving omliggende landen</i>		
Aanwezigheid regelgeving in andere landen	3	Sommige landen hebben regelgeving voor biomassa-assen met Cs-137. Een aandachtspunt bij overname van deze regelgeving in NL is de classificatie als bestaande of geplande blootstellingsituatie (in landen met veel bosbouw en veel Cs-137 depositie ligt classificatie als bestaande blootstellingsituatie voor de hand).
Harmonisatie regelgeving	2	Ontbreekt. Internationale handel/transport kan hierdoor worden bemoeilijkt. Harmonisatie is niet te verwachten.

<b>Aspect</b>	<b>Score</b>	<b>Toelichting</b>
<i>4. Stralingsrisico's bij hergebruik</i>		
Daadwerkelijke blootstelling (microSv/jaar)	4	De dosis bij hergebruik van biomassa-assen is beperkt (<10 microSv/jaar voor een lid van de bevolking per Bq/g Cs-137 in het as)

## 4 Beleid, wet- en regelgeving voor niet-radioactief afval

In dit hoofdstuk wordt het beleid op het gebied van afval, hergebruik en recycling besproken.

### 4.1 **Het Circulair Materialenplan (CMP) en het landelijk afvalbeheerplan (LAP3)**

Het door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat opgestelde Circulair Materialenplan (CMP) [51] is erop gericht de transitie naar een circulaire economie te ondersteunen. Het bevat een overzicht van het afvalstoffenbeleid en stelt toetsingskaders voor de vergunningverlening en toezicht. Het CMP geeft invulling aan Europese verplichtingen. Het verwerken van radioactief afval valt buiten het CMP. Het CMP is sinds eind 2025 de opvolger van het derde Landelijk Afvalbeheerplan (LAP3) [52]. Het CMP richt zich op de hele keten, van ontwerp tot afvalverwerking, waar LAP3 gericht was op afvalbeheer.

LAP3 bestond uit een algemeen beleidskader en 85 sectorplannen waarin het beleid voor verschillende afvalstromen was uitgewerkt en verduidelijkt. Het CMP bevat naast het algemene beleidskader ketenplannen en afvalplannen voor 60 materialen [53]. Deze plannen geven onder meer toetsingskaders en toelichtingen voor afvalverwerking. Een belangrijk uitgangspunt van het beleidskader in zowel LAP3 als CMP is de afvalhiërarchie, die de voorkeursvolgorde geeft van verwerkingsmogelijkheden. Een nuttige toepassing zoals hergebruik, recycling of verbranding voor energiewinning heeft de voorkeur boven verbranding als vorm van verwijdering of stort [54, 55]. De afval- en ketenplannen van het CMP geven de minimumstandaard voor verwerking voor elke soort afvalstof [53]. In LAP3 waren deze minimumstandaarden te vinden in de sectorplannen [56]. Een vergunning voor de verwerking wordt in principe alleen verleend indien de aangevraagde vorm van verwerking minstens even hoogwaardig is als de minimumstandaard. De vastgestelde minimumstandaard hangt af van o.a. milieueffecten, haalbaarheid en kosten.

In het CMP is een afvalplan opgenomen voor assen van energiewinning uit biomassa [57], een afvalplan voor reststoffen van kolencentrales [58] en een ketenplan voor hout [59]. Dit ketenplan gaat niet in op hergebruik van assen.

In LAP3 waren twee voor dit rapport relevante sectorplannen opgenomen. Sectorplan 24 van LAP3 beschrijft reststoffen (vliegas, bodemas, ketel-as) van energiewinning uit biomassa [60]. Dit omvat zowel biomassaenergiecentrales als de bijstook van biomassa in overige energiecentrales waarbij de reststoffen van de biomassaverwerking apart vrijkomen van de overige reststromen. Reststoffen uit kolengestookte energiecentrales met bijstook van biomassa waarbij de reststoffen gezamenlijk vrijkomen, vallen onder sectorplan 23 [61].

#### 4.1.1 *CMP Afvalplan assen van energiewinning uit biomassa*

Zowel in het CMP als in sectorplan 24 van LAP3 is de minimumstandaard voor assen van energiewinning uit biomassa 'storten op een daarvoor geschikte stortplaats' [57]. In de toelichting op de minimumstandaard is genoemd dat 'gelet op aard en eigenschappen van de assen' een nuttige toepassing niet altijd mogelijk is. Gebruik als bouwstof (volgens de eisen van het Besluit activiteiten leefomgeving en het Besluit bodemkwaliteit), als meststof (volgens de eisen uit de Meststoffenwet of de Meststoffenverordening) of als opvulmateriaal in zoutcavernes, mijnen en groeven is niet uitgesloten. Mengen van afvalstoffen is in het Besluit activiteiten leefomgeving aangewezen als een milieubelastende activiteit waarvoor een vergunning nodig kan zijn. Voor het mengen van assen van energiewinning uit biomassa gelden geen specifieke bepalingen anders dan de algemene toetsingskaders.

Assen van bijstook in energiecentrales vallen onder het afvalplan voor assen van energiewinning uit biomassa. Bij bijstook wordt biomassa apart van de reguliere brandstof vergast of gepyrolyseerd. Assen van meestook, waarbij de biomassa met de primaire brandstof wordt verbrand, vallen buiten dit afvalplan.

Het Nutriënten Management Instituut (NMI) heeft stimulansen en belemmeringen voor hergebruik van biomassa-assen onderzocht [26]. Belangrijke conclusies zijn i) hergebruik van houtassen als meststof of in compost is gunstig voor het sluiten van nutriëntenkringlopen, ii) de houtassen bevatten over het algemeen te hoge concentraties zware metalen om te mogen worden gebruikt als meststof, iii) gebruik in cement of als afvalvulstof is alternatief, omdat voor deze toepassing de aanwezigheid van verontreinigingen minder bezwaarlijk is. Opvallend is dat de mogelijke aanwezigheid van radionucliden in dit rapport geen aandachtspunt is.

#### 4.1.2 *CMP Afvalplan reststoffen van kolencentrales*

Het afvalplan voor reststoffen van kolencentrales [58] is de vervanging van Sectorplan 23 uit LAP3. Dit plan is ook van toepassing op assen die ontstaan bij meestook van biomassa in kolencentrales. Beide plannen kennen een minimumstandaard die hoger staat in de afvalhiërarchie dan die voor biomassa-assen, namelijk recycling. Het afvalplan beschrijft het (relatief hoogwaardig) hergebruik van de reststoffen in bouwstoffen zoals mortel en beton, waarvoor gebruik kan worden gemaakt van beoordelingsrichtlijn BRL 2505 [62]. Vormen van verwerking die laagwaardiger zijn dan de minimumstandaard zijn niet toegestaan. Zo is er een stortverbod en is toepassing als bouwstof in noodzakelijke voorzieningen op stortplaatsen alleen toegestaan wanneer het realiseren van deze voorzieningen niet mogelijk is met overige afvalstoffen die ter verwijdering worden aangeboden.

#### 4.1.3 *Aanwezigheid van zeer zorgwekkende stoffen (ZZS)*

Biomassa-assen bevatten mogelijk zeer zorgwekkende stoffen (ZZS). Deze stoffen zijn aandachtspunt in de vergunningverlening. Het beleid rond ZZS is uitgewerkt in hoofdstuk B14 van het algemene beleidskader van LAP3 [66] en in het Onderwerp ZZS en overige zorgstoffen in het CMP. Hergebruik van afvalstoffen van ZZS is mogelijk indien de blootstelling bij de beoogde vorm van hergebruik aanvaardbaar is. Relevante aspecten die bij de beoordeling een rol spelen zijn

bijvoorbeeld de grenswaarden van de ZZS, de mate waarin de ZZS kunnen vrijkomen bij gebruik van de nieuwe materialen, en wat in een later stadium met deze materialen gebeurt. In hoofdstuk 5 besteden we aandacht aan de aanwezigheid van zware metalen in biomassa-assen.

## 4.2 Relatie stralingsbeleid en overig beleid

In het CMP is net als in LAP3 geen beleid opgenomen over radioactieve afvalstoffen [67]. Het Nederlandse stralingsbeleid (zie paragraaf 3.1) gaat ook niet in op de kaders van CMP of LAP3. Wet- en regelgeving over stralingsbescherming staat los van het algemene Nederlandse beleid over afvalverwerking en circulaire economie. Een integrale aanpak ontbreekt. Uit een interview blijkt dat ondernemers dit ook zo ervaren [5]. Er zijn wel overeenkomsten aan te wijzen in de uitgangspunten voor beide vormen van beleid. De in paragraaf 4.1.3 genoemde aspecten die moeten worden beschouwd bij de beoordeling van herbruikbaarheid van een afvalstof, worden ook in de stralingsbescherming toegepast (paragraaf 3.4).

## 4.3 Normen en certificering

Voor draagvlak voor de inzet van biomassa-assen als cementvervanger is naleving van regelgeving en normering een belangrijke voorwaarde. In Europa gelden normen zoals EN 197-1 (voor cement), EN 450-1 (voor vliegias in beton) en EN 15167 (voor hoogovenslak), die richtlijnen geven voor chemische samenstelling, fysische eigenschappen en prestaties. Voor biomassa-assen is er echter nog geen internationaal geaccepteerde norm of richtlijn die de minimale eisen definieert voor chemische samenstelling, fysische eigenschappen (zoals fijnheid) of gedrag in beton. Er wordt gebruik gemaakt van meer algemene normen, waarin indirect het gebruik van biomassa-assen wordt toegestaan [68, 69]. Wel bestaan er op nationaal niveau mogelijkheden om industriële assen, waaronder biomassa-assen, via nationale certificeringssystemen (CUR<sup>5</sup> aanbeveling of BRL<sup>6</sup>) toe te laten als vulstof in beton, mits deze voldoen aan aanvullende prestatie eisen [4].

Een ander belangrijk punt is hoe de as juridisch wordt ingedeeld. De regels hiervoor komen voort uit de Europese Kaderrichtlijn Afvalstoffen [70]. Deze geeft zogenaamde end-of-waste criteria, die specificeren wanneer materiaal niet langer afval is, maar een product of secundaire grondstof. De implementatie van deze criteria is niet in alle lidstaten hetzelfde [71]. Als biomassa-assen als afval worden aangemerkt, gelden strengere voorschriften voor transport [8], opslag en verwerking. Dit maakt hergebruik in de praktijk lastiger en vaak ook duurder.

Tot slot kan CE-markering of een vergelijkbaar keurmerk noodzakelijk zijn om toegang te krijgen tot de markt voor bouwmaterialen. Deze markering toont aan dat het product voldoet aan alle relevante eisen op het gebied van veiligheid, gezondheid en milieu [72] – een belangrijke stap richting bredere toepassing van biomassa-assen.

<sup>5</sup> **BRL** staat voor Beoordelingsrichtlijn. Een BRL is een normatief document binnen het Nederlandse stelsel van certificatie. Het beschrijft aan welke eisen een product, proces, persoon of dienst moet voldoen om een certificaat te krijgen dat aangeeft dat het voldoet aan vastgestelde kwaliteitsnormen.

<sup>6</sup> **CUR** staat voor Centrum voor Uitvoering, Research en Regelgeving in de Grond-, Water- en Bouwkunde (vroeger ook: *Commissie Uitzetting en Research*). In de praktijk verwijst "CUR" naar CUR-aanbevelingen, oftewel technische richtlijnen en aanbevelingen die zijn ontwikkeld door experts uit de Nederlandse bouwsector.

#### 4.4 Stimulansen en belemmeringen

In onderstaande tabel geven we scores voor verschillende aspecten, waarbij 1 sterk belemmerend is en 5 sterk stimulerend. Zie hoofdstuk 9 voor meer informatie.

Aspect	Score	Toelichting
<i>1. Landelijk afvalbeheerplan</i>		
Beleid gericht op hergebruik en recycling	5	Het beleid is gedetailleerd. De wens hergebruik is vastgelegd in beleidskaders van het Circulair Materialenplan. Er zijn afvalplannen voor assen van biomassa en kolencentrales met bijstook van biomassa.
Gehanteerde minimumstandaard	2	De minimumstandaard voor biomassa-assen is 'stort', vanwege de aanwezigheid van verontreinigingen. Deze minimumstandaard is lager dan die voor vliegassen van kolencentrales (met bijstook van biomassa).
Toepassingsgebied volgens sectorplan	2	Het afvalplan over assen afkomstig van energiewinning uit biomassa bespreekt met name recycling als meststof (of terugwinning van fosfaat). Gebruik als bouwstof wordt in mindere mate besproken, terwijl dit in de praktijk een belangrijke recyclebaarheid lijkt.
<i>2. Relatie stralingsbeleid en overig beleid</i>		
Integrale aanpak	2	Stralingsbeleid staat los van de beleidskaders over recycling en hergebruik.
<i>3. Normen en Certificering</i>		
Ontbreken van specifieke normen voor biomassa-as	2	Vertraagt markttoegang en acceptatie.
Beschikbare normen voor verwante stoffen (bijv. EN 450)	3-4	Kunnen als referentie dienen voor toetsing en toelating.
Vereiste CE-markering en milieutoetsing	2	Vraagt om langdurige en kostbare procedures.

## 5 Gezondheid en circulariteit

In dit hoofdstuk wordt de invloed van hergebruik en recycling op de gezondheid besproken en het effect op het klimaat. We beperken ons hier tot de gezondheidseffecten van de aanwezigheid van niet-radioactieve gevaarlijke stoffen in assen: stralingsbeschermingsaspecten zijn besproken in hoofdstuk 3.

Een beoordeling van de wettelijke limieten of de wijze waarop deze zijn vastgesteld valt buiten scope van dit rapport.

### 5.1 Uitloging van gevaarlijke stoffen

Materialen voor hergebruik of recycling kunnen gevaarlijke stoffen bevatten. Voor biomassa-assen gaat het om stoffen als zware metalen en PAK's (zie paragraaf 2.2). Voor potentiële toepassingen is milieuhygiënische veiligheid een essentiële voorwaarde. Mensen kunnen worden blootgesteld aan gevaarlijke stoffen wanneer deze uitlogen en via het milieu in voedsel of drinkwater terecht komen.

Stoffen kunnen vrijkomen door uitloging, het oplossen van stoffen in water vanuit een vaste matrix (bijvoorbeeld beton). De uitloogbaarheid van deze stoffen moet laag zijn om negatieve milieueffecten te voorkomen en te voldoen aan wet- en regelgeving. Bijlage A van de Regeling bodemkwaliteit 2022 [73] geeft kwaliteitseisen voor bouwstoffen (maximale emissies uitgedrukt in mg/m<sup>2</sup>, voor verschillende anorganische stoffen).

Biomassa-assen laten op dit vlak een wisselend beeld zien. Houtassen bevatten doorgaans relatief lage concentraties zware metalen, maar assen uit bijvoorbeeld verbranding van sloophout kunnen juist aanzienlijke hoeveelheden toxische stoffen bevatten [74]. In zulke gevallen is voorbehandeling noodzakelijk, zoals wassen, sorteren of immobilisatie met andere bindmiddelen.

Verschillende studies laten zien dat de uitloging van zware metalen uit biomassa-assen afneemt wanneer de assen zijn verwerkt in beton [75, 76]. Het beton zorgt dus voor immobilisatie van zware metalen. Tosti *et al.* (2018) [76] onderzochten de mate waarin zware metalen uitlogen uit beton met biomassa-assen. De assen waren afkomstig uit verschillende biomassa-stromen, waaronder houtpellets, afvalhout en sludge afkomstig van recycling van papier. De uitloging lag voor de beschouwde monsters ruim onder de wettelijke limiet. De uitloging varieerde tussen monsters. De uitloging was ook sterk afhankelijk van de pH. Na vermaling van het beton (voor hergebruik als granulaat in bijvoorbeeld wegebouw) nam de uitloging toe. Voor sommige monsters was de uitloging van barium en chroom hoger dan de wettelijke limiet. Daarbij werd wel opgemerkt dat de uitloging vergelijkbaar was met die van beton en granulaat op basis van commercieel verkrijgbaar cement (dat wil zeggen: zonder biomassa-assen).

In een andere studie uit 2020 voerden Tosti *et al.* [77] een levenscyclusanalyse uit voor het gebruik van dezelfde

biomassavliegassen (houtpellets, afvalhout en sludge afkomstig van recycling van papier) in cement (inclusief hergebruik van het beton als granulaat in wegenbouw). In deze analyse werden de effecten op indicatoren voor onder andere klimaat, luchtvervuiling, humane gezondheid en ecotoxiciteit beschouwd. (Radioactiviteit werd hierbij buiten beschouwing gelaten.) Deze effecten werden vergeleken met een referentiescenario: stort van de assen op een deponie (in Nederland) in combinatie met productie en gebruik van cement zonder biomassa-assen. Hierbij wordt opgemerkt dat uitloging ook plaatsvindt bij stort op een deponie. De auteurs van de studie concludeerden dat recycling van biomassa-assen in cement een betere optie is dan stort (NB voor Cs-137 bevattend biomassa-assen is storten op een deponie niet toegestaan) voor de meeste beschouwde indicatoren, en dat de mate van uitloging acceptabel is.

Voor gebruik als meststof of bodemverbeteraar geldt andere regelgeving; het Uitvoeringsbesluit meststoffenwet [78] specificeert minimale hoeveelheden nutriënten en maximale hoeveelheden van zware metalen en andere verontreinigingen zoals PAK's. Niet alle biomassa-assen voldoen aan deze limieten [26, 75, 79]. In een studie uit 2019 beargumenteren Tosti *et al.* [79] dat het risico in de praktijk mee kan vallen omdat uitloging van zware metalen uit het as relatief beperkt is bij toevoeging aan grond. Bij de pH van grond (4 tot 8) blijft uitloging beperkt.

Samengevat kan de uitloging van gevaarlijke stoffen dus een beperking vormen voor het hergebruik van biomassa-assen. Op basis van het uitgevoerde literatuuronderzoek lijken de risico's mee te vallen. De huidige wet- en regelgeving kan worden gebruikt om te toetsen of biomassa-assen (en andere materialen) kunnen worden hergebruikt of gerecycled met betrekking tot gevaarlijke stoffen. De variabiliteit in de samenstelling van biomassa-assen betekent wel dat het toetsen van verschillende partijen nodig is.

## 5.2 Blootstelling via hand- mondcontact

Een andere manier waarop mensen kunnen blootstaan aan gevaarlijke stoffen in as is door inhalatie en ingestie als gevolg van hand-mondcontact. Zware metalen in as kunnen gedeeltelijk oplossen in lichaamsvocht en zo worden opgenomen in het lichaam [80].

Dit is relevant voor werknemers die met assen of ashoudende materialen zoals cement werken, en dan met name bij werkzaamheden waarbij veel stof vrijkomt. Dit zijn bijvoorbeeld de reparatie van beton en het gieten van vloeren, maar ook bij onder andere schoonmaakwerkzaamheden in een cementfabriek [81]. Bijlage XIII van de Arbeidsomstandighedenregeling [82] geeft de limieten (maximale luchtconcentratie) voor onder andere verschillende zware metalen en respirabel calciumoxide (een belangrijk bestanddeel van zowel cement als biomassa-assen). Het is dus mogelijk om te toetsen of (cement op basis van) biomassa-assen voldoet aan deze limieten. Hetzelfde geldt voor andere materialen die interessant kunnen zijn voor hergebruik.

Op basis van de concentraties calciumoxide en zware metalen in biomassa-assen [76], is de verwachting dat de limiet voor calciumoxide eerder wordt bereikt dan die voor de zware metalen, en dat de zware metalen daarmee geen belemmering vormen.

### 5.3 Circulariteit en CO<sub>2</sub>-emissie

Zeer sterk stimulerende factoren voor hergebruik van biomassa-assen liggen op het gebied van circulariteit en CO<sub>2</sub>-emissies. Het hergebruiken of recyclen van restmaterialen zoals biomassa-assen kan bijdragen aan de Nederlandse doelstelling om in 2050 een volledig circulaire economie te hebben, zoals beschreven in het Nationale Programma Circulaire Economie [83, 84]. Naast de substitutie van primaire grondstoffen door restproducten, zal het gebruik van biomassa-assen in cement ook leiden tot een verlaging van CO<sub>2</sub>-emissies.

De wereldwijde productie van cement lag in 2020 op 4,1 miljard ton [85]. De productie van cement is verantwoordelijk voor ongeveer 5-10% van de wereldwijde emissie van CO<sub>2</sub> (zie bijv. [86, 87]). De productie van cement kost veel energie, en daarnaast komt CO<sub>2</sub> vrij bij de omzetting van calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>) in calciumoxide (CaO), één van de stappen in de productie van cement [88]. De *Global Cement and Concrete Association* heeft als doelstelling om de uitstoot van broeikasgassen in 2050 te reduceren tot *net zero* [89].

Cement kan gedeeltelijk worden vervangen door biomassa-assen (zie paragraaf 3.4). Volgens een levenscyclusanalyse zou dit de CO<sub>2</sub>-eq-voetafdruk van beton met tot 11 tot 26% kunnen verlagen, vergeleken met referentiescenario waarbij het as wordt afgevoerd voor stort [77]. Hier is CO<sub>2</sub>-eq of koolstofdioxide-equivalent een maat voor de bijdrage van verschillende broeikasgassen aan opwarming van de aarde.

De wereldwijde productie van cement is in de periode 2002-2018 harder gestegen dan de productie van toeslagmaterialen zoals (kolen)vliegashoudend materiaal [90]. Er is dus naar verwachting een markt voor nieuwe toeslagmaterialen zie ook hoofdstuk 7.

Restmaterialen kunnen hoogwaardig of laagwaardig worden gerecycled, waarbij hoogwaardige recycling in het Ontwerp Circulair Materialenplan is gedefinieerd als "de vorm van recycling waarbij het materiaal zoveel mogelijk en met een zo hoog mogelijke kwaliteit over zoveel mogelijk cycli in een materiaal of productketen wordt gehouden" [91]. Recycling van biomassa-assen als toeslagmateriaal in cement is daarom een hoogwaardigere vorm van recycling dan het gebruik als opvulmiddel in ondergrondse mijnen.

## 5.4 Stimulansen en belemmeringen

In onderstaande tabel geven we scores voor verschillende aspecten, waarbij 1 sterk belemmerend is en 5 sterk stimulerend. Zie hoofdstuk 9 voor meer informatie.

Aspect	Score	Toelichting
Aanwezigheid van gevaarlijke stoffen	2	Biomassa-assen bevatten variabele hoeveelheden gevaarlijke stoffen (zware metalen, PAK's, POP's)
<i>1. Uitloging van gevaarlijke stoffen</i>		
Wettelijke limieten	4	Er zijn wettelijke limieten voor de uitloging van bouwstoffen (Regeling bodemkwaliteit 2022) en samenstelling van meststoffen (Uitvoeringsbesluit meststoffenwet), dit geeft voorspelbaarheid voor betrokken ondernemers.
Variabiliteit in uitloging/samenstelling	2	De concentratie gevaarlijke stoffen en mate van uitloging van gevaarlijke stoffen is variabel. Homogenisatie en/of veelvuldig testen is noodzakelijk.
Mate van uitloging	2-3	Voor biomassa-assen in beton is de uitloging in veel gevallen acceptabel. Voorbehandeling kan nodig zijn.
<i>2. Overige blootstellingsroutes</i>		
Wettelijke limieten	4	Er zijn wettelijke limieten (luchtconcentratie) voor blootstelling van werknemers door inhalatie. Dit geeft voorspelbaarheid voor betrokken ondernemers.
<i>3. CO<sub>2</sub>-emissie en circulariteit</i>		
CO <sub>2</sub> -besparing bij hergebruik	5	Het gebruik van biomassa-assen in cement verlaagt de grote CO <sub>2</sub> -voetafdruk van de cementsector.
Bijdrage aan circulariteit	5	Het hergebruik van biomassa-assen draagt bij aan de overgang naar een circulaire economie.

## 6 Technische kenmerken

In dit hoofdstuk worden de technische aspecten behandeld die van belang zijn voor het creëren van mogelijkheden voor hergebruik.

### 6.1 Grondstof specificaties

#### 6.1.1 *Chemische eigenschappen*

Biomassa-assen worden beschouwd als veelbelovende secundaire cementvervangers, maar hun bruikbaarheid wordt sterk bepaald door de chemische samenstelling en reactiviteit. Voor informatie over de samenstelling van biomassa-assen, zie paragraaf 2.2. Enerzijds bevatten de assen reactieve oxiden [68, 92] welke voor toepassingen in cement zeer waardevol kunnen zijn. Anderzijds, kunnen de assen ook stoffen bevatten welke vanuit het oogpunt van de toepassing in cement ongewenst zijn, en kan ook de chemische variatie tussen biomassa-assen het hergebruik bemoeilijken [15].

#### 6.1.2 *Fysische eigenschappen*

De fysische kenmerken van biomassa-assen zijn cruciaal voor hun inzet in cementtoepassingen. Een geschikte cementvervanger moet fijn zijn ( $< 45 \mu\text{m}$ ), met een hoog specifiek oppervlak ( $> 300\text{--}400 \text{ m}^2/\text{kg}$ ), zodat voldoende reactieve oppervlakken beschikbaar zijn voor goede uitharding en hoge betonsterkte [93]. Ook de dichtheid moet vergelijkbaar zijn met die van cement ( $2,2\text{--}3,1 \text{ g/cm}^3$ ) om segregatie in betonmengsels te voorkomen. Tevens speelt de vorm en verdeling van de deeltjes een rol in de verwerkbaarheid. Onregelmatig gevormde of grove deeltjes verhogen de waterbehoefte en verminderen de verwerkbaarheid van het beton. Veel biomassa-assen voldoen niet vanzelfsprekend aan deze fysische eisen en vereisen daarom behandeling zoals fijnmalen of zeven.

### 6.2 Productspecificaties

Beton met biomassa-assen kan op lange termijn minder duurzaam zijn als de assen niet correct worden behandeld en gedoseerd [94]. Daarnaast kunnen toxische stoffen in de as de milieuprestaties negatief beïnvloeden door mogelijke uitloging (zie paragraaf 5.1). Deze factoren benadrukken het belang van zorgvuldige karakterisering en voorbehandeling van biomassa-assen om de duurzaamheid en veiligheid van beton te waarborgen [95]. Correct gebruik is essentieel voor het succesvol hergebruik van biomassa-assen in cementgebonden materialen.

### 6.3 Productieproces

Voor het hergebruik van biomassa-assen is de benodigde bewerking een doorslaggevende factor. Idealiter vereist de as minimale bewerking, zoals fijnmalen, thermische behandeling of chemische aanpassing. In de praktijk is dit sterk wisselend, vooral voor de laagwaardige biomassa-assen: veel biomassa-assen hebben een heterogene structuur, onregelmatige deeltjesgrootte en bevatten verontreinigingen die behandeling noodzakelijk maken (zie bijvoorbeeld de milieuhygiënische kwaliteitseisen besproken in paragraaf 5.1). Deze bewerkingen verhogen

de verwerkingskosten aanzienlijk, wat ten koste gaat van de economische aantrekkelijkheid.

#### 6.4 Stabiliteit en beschikbaarheid

Voor het grootschalig hergebruik van biomassa-assen in cement is stabiliteit en beschikbaarheid van essentieel belang. Dit houdt in dat de samenstelling van de aangeleverde as consistent moet zijn, met minimale variatie tussen verschillende batches. Cementfabrikanten stellen hoge eisen aan de voorspelbaarheid van grondstoffen, omdat schommelingen in chemische of fysische eigenschappen directe invloed kunnen hebben op de verwerkbaarheid en prestaties van beton. Naast kwaliteit is ook de beschikbaarheid in voldoende volumes cruciaal. Voor structurele toepassingen moeten aanzienlijke hoeveelheden as beschikbaar zijn om continuïteit in productie te garanderen. In Nederland worden jaarlijks tienduizenden tonnen biomassa-assen geproduceerd, vooral uit biomassacentrales. Toch is niet alle as direct bruikbaar vanwege uiteenlopende samenstelling of logistieke beperkingen.

#### 6.5 Stimulansen en belemmeringen

In onderstaande tabel geven we scores voor verschillende aspecten, waarbij 1 sterk belemmerend is en 5 sterk stimulerend. Zie hoofdstuk 9 voor meer informatie.

Aspect	Score	Toelichting
<i>1. Grondstofsificaties</i>		
Aanwezigheid van reactieve oxiden	4	Geschikt voor cementvervanging; draagt bij aan binding.
Variabele samenstelling	2	Sterke schommelingen tussen batches bemoeilijken standaardisatie.
<i>2. Productsificaties</i>		
Fijne korrelstructuur	4	Vergemakkelijkt verwerking in cementmengsels.
Lage dichtheid / bulkvolume	2	Negatief effect op mechanische eigenschappen en logistiek.
Hoog gehalte onverbrande koolstof	2	Kan binding verstoren en leidt tot variabele prestaties.
<i>3. Productieproces</i>		
Eisen aan voorbereiding afhankelijk van toepassing	3	Lage verwerkingsvereisten voor sommige toepassingen.
Noodzaak voor voorbereiding (zeven, malen, wassen)	2	Technische drempels en vorming van secundaire afvalstromen.

<b>Aspect</b>	<b>Score</b>	<b>Toelichting</b>
Mogelijkheid tot mengen met andere reststoffen	4	Verbetert toepasbaarheid en eindproducteigenschappen.
<i>4. Stabiliteit en beschikbaarheid</i>		
Beschikbaarheid bij grote biomassacentrales	4	Maakt continue toepassing mogelijk.
Sterke fluctuatie in kwaliteit en volume	2	Beperkt grootschalige toepassing en continuïteit.
Verspreide, kleinschalige bronnen	2	Logistiek inefficiënt en kostenverhogend.



## 7 Financiële-economische haalbaarheid

Bij hergebruik van biomassa-assen moeten deze concurreren met traditionele primaire grondstoffen, en met materialen die al langer hergebruikt worden, zoals vliegassen van kolencentrales en hoogovenslak, die vaak al voldoen aan strikte normen en goed verwerkbaar zijn. Alleen als de kostprijs per ton verwerkte as opweegt tegen de baten—zoals grondstofvervanging, lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot en vermeden stortkosten—kan grootschalige toepassing financieel-economisch aantrekkelijk zijn. In dit hoofdstuk gaan we in op financieel-economische factoren die een rol spelen bij hergebruik van biomassa-assen.

### 7.1 Kostenstructuur en besparingsmogelijkheden

Bij het opstellen van een kostenstructuur voor biomassa-assen als cementadditief of vulstof moeten zowel directe als indirecte kostenposten in kaart worden gebracht. Wanneer biomassa-assen niet worden hergebruikt, ontstaan afvoerkosten, onder meer voor transport, tijdelijke opslag en eindverwerking in de afvalketen. Deze kosten kunnen oplopen door de classificatie van bepaalde asstromen als afval, waardoor additionele heffingen of milieuvergoedingen van toepassing zijn [92]. Dit is in het bijzonder het geval voor radioactief afval. In het geval van hergebruik in cement, verschuift de kostenstructuur: de noodzaak tot nabehandeling (zoals drogen, malen, zeven en homogeniseren) en kwaliteitsborging wordt belangrijk. Er zijn kosten verbonden aan chemische en fysische karakterisering om te voldoen aan normen zoals NEN-EN 197-1 en aan interne kwaliteitscontrole op parameters als fijnheid en gehalte aan chloriden en sulfaten. Daarnaast kunnen er verwerkingskosten ontstaan door de verwijdering van secundaire residuen die niet geschikt zijn voor cementtoepassing.

De publicatie van Doudart de la Grée uit 2016 [92] presenteert een kosten-batenanalyse voor het hergebruik van biomassa-assen in de Nederlandse situatie. Deze is beschreven in onderstaand tekstkader. Belangrijk om te noemen is dat de hier beschreven analyse betrekking heeft op laagwaardige biomassa-assen afkomstig van een biomassacentrale in beheer van een AVI. Ondanks dat genoemde verwerkingsstappen alsmede de genoemde bedragen afhankelijk zijn van de gekozen toepassing en herkomst van de biomassa-assen geeft de publicatie inzicht in de aspecten welke in de kosten-batenanalyse meegenomen moeten worden.

Kosten-batenanalyse uit de studie van Doudart de la Grée *et al.*, 2016 [92]

Voor niet-gevaarlijke biomassa-assen die voldoet aan het stortverbod (Besluit stortplaatsen en stortverboden afvalstoffen), bedragen de stortkosten circa €40/ton, exclusief belasting (€13/ton). Daarmee komt de totale kostprijs uit op ongeveer €53/ton. Dit vormt een financieel uitgangspunt voor vergelijking met hergebruik.

Een alternatief is toepassing van vlieggas in de betonindustrie. De mate van bewerking van de assen die hiervoor benodigd is, is bepalend voor de financiële haalbaarheid. Typische bewerkingen zijn hierbij wassen (+€20/ton) en droging (+€1/ton per % vocht). Zonder verdere bewerking bedragen de verwerkingskosten typisch circa €31/ton, met een potentiële opbrengst van €1–4/ton (netto kosten: €27–30/ton). Als aanvullend ook nog malen (€10–15/ton) vereist is, stijgen de bruto kosten naar €41–46/ton. Daarmee blijven de totale kosten ook in dit scenario lager dan storten, vooral wanneer ook bespaard wordt op belasting en verwerkingsheffing.

Bijkomende kosten voor analyses en opslag bedragen circa €3/ton, en het slibresidu (15–20% van het oorspronkelijke volume) moet worden afgevoerd tegen ongeveer €8/ton. Ondanks deze extra kosten blijkt dat hergebruik economisch gunstiger is dan storten, waarbij we hier opmerken dat storten van assen met een Cs-137 concentratie boven de vrijgavewaarde niet toegestaan is. De kosten van afvoer naar COVRA zijn aanzienlijk hoger dan die van storten op een deponie.

## 7.2 Markttoegang en afzetzekerheid

De beschikbaarheid en afzetmogelijkheden van biomassa-assen in Nederland worden sterk bepaald door zowel externe kansen als interne beperkingen. Een belangrijke kans ontstaat door het verwachte tekort aan natuurlijke bouwstoffen, zoals zand, grind en primaire vulstoffen, als gevolg van strengere ontginningseisen en de toenemende vraag in de bouwsector [96]. Daarnaast neemt de druk op de grondstoffenvoorziening voor cementproductie toe [97]. Dit creëert ruimte voor het gebruik van alternatieve grondstoffen, waaronder biomassa-assen.

Langdurige afzetcontracten met bouwbedrijven of betonproducenten bieden een kans om de markttoegang structureel te verbeteren. Zulke afspraken kunnen stabiliteit bieden voor producenten van biomassa-assen, wat investeringen in bewerking en kwaliteitsborging aantrekkelijker maakt [98]. Ook sluit dit aan bij het overheidsbeleid gericht op circulair bouwen en duurzaam materiaalgebruik [83].

Toch zijn er ook belemmeringen. Veel afnemers zijn terughoudend in het gebruik van onbekende of niet-genormaliseerde grondstoffen. Deze beperkte bereidheid komt voort uit zorgen over productkwaliteit, verwerkbaarheid en aansprakelijkheid. Zonder erkende kwaliteitsstandaarden of keurmerken blijven alternatieven, zoals biomassa-assen, voor veel marktpartijen een risicovolle keuze [99].

## 7.3 Subsidies, belastingen en milieubeleid

Op het gebied van subsidies, belastingen en milieubeleid zijn er zowel stimulerende als belemmerende maatregelen. Aan de stimulerende kant zijn er beleidsmaatregelen gericht op de circulaire economie en duurzaam grondstoffengebruik, die hergebruik van reststromen zoals biomassa-assen aanmoedigen. Initiatieven zoals het Rijksbrede Programma Circulaire Economie [100] en financieringsregelingen via RVO (zoals de MIA/Vamil-regelingen [101]) kunnen financiële ruimte bieden voor

innovatieve toepassingen van deze assen, bijvoorbeeld als secundaire grondstof in de bouwsector.

Tegelijkertijd bestaan er belemmeringen. Biomassa-assen kunnen als afvalstof geclassificeerd zijn, waardoor strengere voorschriften voor transport, opslag en verwerking gelden als ook hogere verwerkingskosten. Dit beperkt hun inzet als grondstof zonder uitgebreide bewerking of vergunningen. Ook is er onzekerheid over langetermijnbeleid en het ontbreken van eenduidige kwaliteitsnormen, wat investeringen kan ontmoedigen [4].

Belastingen, zoals afvalstoffenbelasting, kunnen het financieel onaantrekkelijk maken om biomassa-assen als afval af te voeren voor stort, en bieden tegelijkertijd een prikkel voor nuttige toepassing.

#### **7.4 Certificering en kwaliteitsborging**

Een consistente kwaliteit en kwantiteit zijn essentieel voor de technische en economische haalbaarheid van hergebruik en recycling van biomassa-assen. Dit houdt in dat de eigenschappen van de assen voorspelbaar moeten zijn binnen een bepaalde bandbreedte en dat er een constante toevoer van materiaal moet zijn.

Indien ook laagwaardige biomassa-assen worden beschouwd dan kan onder de huidige omstandigheden hier veelal niet aan worden voldaan, met als gevolg dat veel assen geen toepassing krijgen als grondstof in cement [97]. Het is met name voor de kleine asstromen afkomstig uit kleinschalige installaties (zie paragraaf 2.1.2) niet realistisch om recycling of hergebruik na te streven. Het ontwikkelen van nieuwe toepassingen is bijna onmogelijk omdat het investeringen vraagt die redelijkerwijs niet terug te verdienen zijn, uitgaande van de geringe omvang van de individuele asstromen. Het gevolg is dat de nodige laagwaardige biomassa-assen worden gestort en dit zal in de nabije toekomst niet gaan veranderen<sup>7</sup>. Een stortverbod of een zeer sterke verhoging van de storkosten zijn waarschijnlijk de enige manier waarop alternatieve verwerkingsroutes tot ontwikkeling kunnen komen [102].

#### **7.5 Schaalgrootte en investeringsbereidheid**

Het hergebruik van biomassa-assen in Nederland wordt sterk beïnvloed door schaalgrootte en het investeringsklimaat. Biomassa-assen afkomstig van grote productielocaties, zoals genoemd in paragraaf 2.1.1, hebben een voldoende schaalgrootte waardoor hergebruik beter te organiseren is. Bij kleinschalige biomassacentrales daarentegen zijn de asstromen vaak beperkt van omvang en sterk variabel in kwaliteit en chemische samenstelling, wat de toepassing in hoogwaardige producten bemoeilijkt. Deze variatie, in combinatie met het ontbreken van infrastructuur voor gescheiden inzameling, analyse en verwerking, maakt het logistiek en economisch uitdagend om uniforme en opschaalbare toepassingen te realiseren [4].

Het investeringsklimaat vormt een kritische factor. Innovatieve toepassingen van biomassa-assen, bijvoorbeeld als vulstof of cementvervanger, vergen technologische ontwikkeling en marktopbouw.

<sup>7</sup> Voor biomassa-assen met concentraties Cs-137 boven de vrijgavegrens geldt op dit moment altijd een stortverbod. De enige toegestane afvoerroute is de COVRA.

Voor bedrijven is het investeringsrisico vaak hoog. Tegelijkertijd zijn er kansen: het overheidsbeleid rond circulaire economie en duurzaam bouwen stimuleert innovatie en samenwerking [83].

Dit laat echter onverlet dat op dit moment voor veel kleinere partijen het financieel onaantrekkelijk blijft om te investeren zonder duidelijke marktzekerheid of lange termijnbeleid. Daarmee is het hergebruik van biomassa-assen technisch haalbaar, maar het gebrek aan schaalgrootte en de beperkte bereidheid tot investeren een structurele belemmering voor verdere opschaling in Nederland [4].

De oprichting of ondersteuning van een onafhankelijke organisatie met bevoegdheid voor de validatie van nieuwe hergebruikstechnologieën voor biomassa-assen als industriële grondstof, kan een belangrijke rol spelen in het waarborgen van veiligheid, kwaliteit en consistentie. Een dergelijke instantie kan bijdragen aan een structurele en grootschalige inzet van biomassa-assen in de markt. Daarnaast is het essentieel dat binnen de sector meer acceptatie en vertrouwen ontstaat in innovatieve technologieën voor hergebruik van biomassa-assen als circulaire minerale grondstoffen, zodat de transitie naar een hoogwaardiger en duurzamer hergebruik van deze materiaalstromen in de bouwmaterialensector daadwerkelijk wordt gerealiseerd [4].

## 7.6 Stimulansen en belemmeringen

In onderstaande tabel geven we scores voor verschillende aspecten, waarbij 1 sterk belemmerend is en 5 sterk stimulerend. Zie hoofdstuk 9 voor meer informatie.

Aspect	Score	Toelichting
<i>1. Kostenstructuur en besparingsmogelijkheden</i>		
Vermijden van afvoerkosten	5	Hergebruik voorkomt hoge kosten voor afvoer naar COVRA.
Vervanging van primaire grondstoffen (cement, vulstoffen)	4	Bespaart kosten bij stijgende prijzen voor primaire materialen.
Behandelings- en verwerkingskosten (malen, zeven, testen)	2	Noodzakelijke technische bewerkingen maken het hergebruik duurder.
<i>2. Markttoegang en afzetzekerheid</i>		
Toekomstig tekort aan natuurlijke bouwstoffen	4	Door overheidsbeleid zal de winning van natuurlijke grondstoffen in de toekomst worden beperkt.
Mogelijkheid tot langdurige afzetcontracten met afnemers	4	Verhoogt voorspelbaarheid en maakt investeringen rendabeler.

<b>Aspect</b>	<b>Score</b>	<b>Toelichting</b>
Bepaalde bereidheid van afnemers om onbekende grondstoffen te accepteren	2	Onzekerheid over prestaties beperkt marktacceptatie.
<i>3. Subsidies, belastingen en milieubeleid</i>		
Fiscale voordelen of subsidies voor circulaire materialen	3-4	Financiële steun maakt toepassing aantrekkelijker.
Vermijden van CO <sub>2</sub> -heffingen door cementvervanging	3-4	Aantrekkelijk bij gebruik in CO <sub>2</sub> -intensieve sectoren.
Gebrek aan specifieke beleidsinstrumenten gericht op ashergebruik	2	Weinig gerichte stimulansen op nationaal of regionaal niveau.
<i>4. Certificering en kwaliteitsborging</i>		
Kosten voor testen, kwaliteitsborging en certificering (CE, BRL)	2	Verhogen drempel voor commerciële toepassing.
Toepassing in nichemarkten met lagere eisen (fundering, GWW)	4	Maakt gebruik mogelijk zonder volledige certificering, tegen lagere kosten.
Juridische aansprakelijkheid of verzekeringsbezwaren	2	Risico's voor bouwpartijen kunnen financiële consequenties hebben.
<i>5. Schaalgrootte en investeringsbereidheid</i>		
Grote volumes bij enkele biomassacentrales	4	Maakt schaalvoordelen mogelijk en verlaagt kostprijs per ton.
Bepaalde investeringsbereidheid vanwege onbekendheid of risico's	2	Innovatieve toepassingen worden vaak als financieel risicovol gezien.
Hoge initiële kosten zonder korte-termijn rendement	1	Bemoeilijkt financiering door marktpartijen of overheden.



## 8 Sociale stimulansen en belemmeringen

### 8.1 Belang van sociaalwetenschappelijk onderzoek

Sociaalwetenschappelijk onderzoek is van belang voor de maatschappelijke opgave rond hergebruik en recycling. Acceptatie van het hergebruik en de recycling is namelijk een voorwaarde om radioactieve reststromen in de praktijk te kunnen gebruiken, juist ook vanwege de potentiële zorgen over radioactiviteit. Dergelijk onderzoek valt buiten de scope van dit rapport. We geven hier een indicatie van hoe onderzoek naar sociale stimulansen en belemmeringen zou kunnen worden opgezet, en hoe zich dat verhoudt tot recent uitgevoerd onderzoek. Deze opzet is gebaseerd op kennis van sociaal wetenschappers binnen het RIVM over optimale opzet van dergelijk onderzoek.

### 8.2 Bestaand onderzoek naar hergebruik van radioactieve reststoffen in bouwmaterialen

Binnen het EU-project RADONORM is onderzoek gedaan naar acceptatie van het gebruik van alternatieve vormen van cement voor huizenbouw, waarin restproducten met van nature aanwezig radioactief materiaal zijn verwerkt [103]. Dit onderzoek laat zien dat zorgen over de (lange termijn) gezondheidsgevolgen, vertrouwen in de veiligheid van de constructie en financiële overwegingen factoren zijn die een belangrijke rol spelen in de perceptie van burgers en industriële vertegenwoordigers. Het onderzoek is uitgevoerd in België, Slovenië en Tsjechië, en toont eveneens aan hoe bepalend de context is voor het belang van deze factoren, welke onderliggende (deel)factoren relevant zijn en welke stimulerende factoren een rol kunnen spelen in acceptatie van het gebruik van alternatieve vormen van cement. In de Nederlandse context kunnen mogelijk andere factoren een rol spelen dan in de landen waar het RADONORM-onderzoek is uitgevoerd.

### 8.3 Sociaalwetenschappelijk onderzoek in Nederland

Middels sociaalwetenschappelijk onderzoek kan worden onderzocht hoe burgers en (mogelijke) verwerkers van biomassa-assen in Nederland hergebruik percipiëren en welke stimulerende en belemmerende factoren een rol spelen bij het accepteren van het hergebruik en de recycling van radioactieve grondstoffen en reststromen en de mogelijke risico's die daar bij komen kijken. Daarbij kan worden gekeken naar verschillende mogelijke toepassingen, zoals in huizen en in openbare projecten zoals dijken en wegen. Het specifieke voorbeeld van Cs-137 in biomassa-assen kan als casus worden gekozen.

Inzicht in de percepties (zorgen, vragen, eventuele misvattingen etc.) die mensen hebben, geeft handvatten voor communicatie waarin deze vragen en zorgen kunnen worden geadresseerd. Inzicht in de verschillende stimulerende en belemmerende factoren die een rol spelen en het kwalitatieve belang daartussen, draagt bij aan de opzet van een geïntegreerd kader en een brede afweging bij de rechtvaardiging rond het hergebruik van grondstoffen en reststromen. Belemmerende en

stimulerende factoren kunnen als kwalitatieve indicatoren meegenomen worden in het afwegingskader, naast indicatoren gebaseerd op bijvoorbeeld technische mogelijkheden en juridische kaders.

#### **8.4 Mogelijke opzet van onderzoek naar stimulansen en belemmeringen in Nederland**

Literatuuronderzoek kan een startpunt zijn bij de inventarisatie van factoren die een rol zouden kunnen spelen bij de perceptie en acceptatie van hergebruik van restmaterialen. Daarnaast kan empirisch onderzoek onderdeel zijn van een sociaalwetenschappelijke studie van stimulerende en belemmerende factoren.

Empirisch onderzoek kan gericht zijn op twee verschillende groepen betrokkenen. Als cesiumhoudende biomassa-assen als casus wordt gekozen, bestaat de eerste groep uit vertegenwoordigers van branches van organisaties die as in hun producten (woningen, andere gebouwen, infrastructuur) verwerken en deze producten verkopen. Hoe denken zij over het hergebruik? Welke vragen en zorgen hebben zij? En onder welke voorwaarden zouden zij biomassa-assen met Cs-137 willen verwerken? Daarbij is ook van belang welke rol de door verwerkers verwachte perceptie van burgers (bijv. in de rol van huizenkoper) ten opzichte van hergebruik van biomassa-assen met Cs-137 hierin speelt.

De tweede groep betreft Nederlandse burgers: hoe percipieert de 'gemiddelde' burger het hergebruik van biomassa-as, in welke mate wordt dit geaccepteerd en welke factoren spelen hierin een rol? Daarbij kan aandacht besteed worden aan verschillen bij hergebruik van biomassa-assen in (nieuwbouw)woningen versus toepassingen in de openbare ruimte (zoals dijken, windmolens, wegen). Empirisch onderzoek onder burgers kan worden uitgevoerd met behulp van focusgroepen.

Uit eerder onderzoek is bekend dat burgers verschillen van elkaar in hun houding en gedrag ten opzichte van hergebruik van materialen/spullen en het aanschaffen van circulaire producten. Een interessante groep zijn de burgers die een positieve houding hebben ten opzichte van het hergebruik van materialen en/of de circulaire economie in het algemeen. Van deze burgers kan worden nagegaan hoe zij staan tegenover het hergebruik van biomassa-assen met Cs-137. Een dergelijk onderzoek kan aanknopingspunten geven om uiteindelijk ook bij een grotere groep burgers hergebruik te stimuleren.

De resultaten van de onderzoeken onder de twee groepen kunnen geïntegreerd worden door deelnemers te laten reflecteren op de resultaten van de andere groep en na te gaan of de eigen perceptie en acceptatie hierdoor verandert.

## 8.5 Stimulansen en belemmeringen

In onderstaande tabel geven we scores voor verschillende aspecten, waarbij 1 sterk belemmerend is en 5 sterk stimulerend. Zie hoofdstuk 9 voor meer informatie.

<b>Aspect</b>	<b>Score</b>	<b>Toelichting</b>
Kennis over uitvoeren onderzoek	5	Voorstel voor opzet onderzoek gebaseerd op actuele kennis is beschikbaar.
Kennis van Nederlandse situatie	2	Specifieke informatie voor de Nederlandse situatie ontbreekt nog.



## 9 Methodiek voor integrale beoordeling van hergebruik

In dit hoofdstuk beschrijven we een methodiek voor een gestructureerde beoordeling van hergebruik en recycling van biomassa-assen, gebaseerd op zes thema's: stralingsbescherming, wet- en regelgeving, gezondheid en circulariteit, technisch, financieel/economisch en sociaal-maatschappelijk. Door elk thema te scoren op een schaal van 1 tot 5 ontstaat een overzicht van stimulansen en beperkingen.

### 9.1 Methodologie

Om de mogelijkheden voor hergebruik en recycling van biomassa-assen en gerelateerde reststromen te beoordelen, is een beoordelingsmethodiek ontwikkeld op basis van een puntscore-systeem. Deze methode maakt een gestructureerde en transparante vergelijking mogelijk van verschillende materialen of toepassingen op basis van vastgestelde beoordelingscriteria.

#### 9.1.1 *Beoordelingssysteem*

Beoordeling vindt plaats op de volgende thema's:

i. stralingsbescherming, ii. overige wet- en regelgeving, iii. gezondheid en circulariteit, iv. technisch, v. financieel en economisch en vi. sociaal maatschappelijk. Elk thema wordt beoordeeld met een score van 1 tot 5, waarbij:

- **1** = sterk belemmerend
- **2** = belemmerend
- **3** = neutraal
- **4** = stimulerend
- **5** = sterk stimulerend

Het gemiddelde cijfer wordt berekend als het gemiddelde van alle individuele scores voor een bepaald materiaal of toepassing, waarbij het mogelijk is de individuele scores verschillende gewichten toe te kennen. De thema's worden beoordeeld aan de hand van de stimulansen en belemmeringen zoals beschreven, en in tabelvorm weergegeven, in de corresponderende hoofdstukken van dit rapport.

#### 9.1.2 *Eindbeoordeling*

Op basis van de gemiddelde score en de individuele deelresultaten wordt een totale beoordeling toegekend, met drie mogelijke uitkomsten:

- **Nog niet haalbaar**
  - Geen minimumvereisten.
- **Mogelijk haalbaar**
  - Geen enkele individuele score van 1 toegestaan; maximaal één score van 2 toegestaan; gemiddelde score minimaal 3.
- **Haalbaar**
  - Geen individuele scores van 2 of lager; gemiddelde score minimaal 4.

Deze systematiek biedt een geïntegreerd beeld van de technische haalbaarheid, de regelgeving en veiligheid, en de sociaal-economische aanvaardbaarheid van hergebruik of recycling van biomassa-assen.

## 9.2 Casus: biomassa-assen als cement additief

### 9.2.1 Toepassingskader

Dit voorbeeld betreft het potentieel gebruik van Cs-houdende biomassa-assen afkomstig uit een energiecentrale als additief in cement in Nederland, zowel voor constructief als niet-constructief beton.

### 9.2.2 Beoordelingsresultaten

In de hier gepresenteerde casus is de beoordeling uitgevoerd door de auteurs van dit rapport. De resultaten van de beoordeling zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Thema	Omschrijving	Score	Toelichting
Stralingsbescherming	Beoordeling van blootstellingsrisico's en naleving van RP-normen	4	Radiologische risico's zijn laag en beheersbaar (regelgeving en procedures kunnen wel een belemmering zijn).
Overige wet- en regelgeving	Afstemming met bestaande (EU- en nationale) wetgeving en afvalbeheerregels	3	Enige onzekerheid over classificatie en vergunningseisen
Gezondheid en circulariteit	Veiligheid bij verwerking en gebruik, bescherming van werknemers en publiek, bijdrage aan circulaire economie	2-3	Score 2 voor ongereinigde as; score 3 na reiniging of conditionering
Technisch	Beschikbaarheid van normen, technische haalbaarheid en toepasbaarheid	2-3	Score 2 voor constructief beton (gebrek aan normen); score 3 voor niet-constructieve toepassingen
Financieel en economisch	Economische haalbaarheid, schaalbaarheid en investeringskansen	3-4	Score 3 in huidige situatie; score 4 bij gegarandeerde schaal en investeringsbereidheid
Sociaal maatschappelijk	Publieke perceptie, bewustzijn en maatschappelijke acceptatie	2	Onvoldoende kennis beschikbaar van de Nederlandse situatie

De auteurs zijn deskundigen op het gebied van de stralingsbescherming. De beoordeling op dit thema is robuust. Uit de resultaten blijkt dat stralingsbescherming niet de meest beperkende factor is voor hergebruik. Voor de overige thema's is de beoordeling gebaseerd op de in de betreffende hoofdstukken gepresenteerde literatuur en interviews. Voor deze thema's is de beoordeling gepresenteerd als illustratief voor de werking van de systematiek. Voor een verdere uitwerking van de casus is het wenselijk dat de scores worden gevalideerd door inhoudelijk experts.

### 9.2.3 *Eindbeoordeling*

De in dit rapport ontwikkelde methodiek geeft een systematische benadering om te bepalen of hergebruik op dit moment haalbaar is. Daarnaast geeft de methodiek inzicht in wat de belangrijkste belemmeringen zijn. We doen hiermee geen uitspraken over de wenselijkheid van hergebruik.

De totale beoordeling resulteert in een **Nog niet haalbaar** voor toepassing in constructief beton, vanwege een gemiddelde score onder 3 en lage individuele scores (2) voor 'Gezondheid en circulariteit' en 'Technisch'. Hoewel hergebruik vanuit het Circulair Materialen Plan gezien wordt als wenselijk, zijn er in deze casus nog belangrijke belemmeringen. De stimulansen zijn beperkter. Voor niet-constructieve betontoepassingen wordt de beoordeling als **Mogelijk haalbaar** geclassificeerd, aangezien de risico's lager zijn en de prestaties onder voorwaarden aanvaardbaar worden geacht. Het thema stralingsbescherming lijkt met een score van 4 geen belemmering te zijn om beschouwde assen toe te passen in beton.

### 9.2.4 *Vervolgstappen en risicobeoordeling*

- **Vervolgstappen:** Verdere ontwikkeling van reinigings- en conditioneringsprocedures voor biomassa-assen, gecombineerd met de vaststelling van technische standaarden, kan leiden tot een beoordeling van **Mogelijk haalbaar** of hoger voor constructieve toepassingen.
- **Risico's:** Publieke perceptie kan een negatieve invloed hebben op de acceptatie. Misverstanden over de radioactieve aard of duurzaamheid van biomassa-assen zouden kunnen leiden tot weerstand. Aanvullend onderzoek is nodig om vast te stellen in hoeverre dit in Nederland het geval is.

### 9.2.5 *Validatie van de stralingsbeschermingsevaluatie door experts*

Om de robuustheid van de methodiek te toetsen, is de beoordeling van het thema stralingsbescherming niet alleen uitgevoerd door de onderzoekers, maar ook door 6 deskundigen binnen RIVM en NRG PALLAS. Voorafgaand hebben de deskundigen de achtergrondinformatie over het thema stralingsbescherming ontvangen (een eerdere versie van hoofdstuk 3) samen met de bijbehorende tabel. De beoordeling is door de deskundigen afzonderlijk uitgevoerd. Een compleet overzicht van de uitkomsten is weergegeven in Bijlage 2. In de bijlage zijn de afzonderlijke resultaten opgenomen en gegroepeerd per afdeling. Analyse van de resultaten laat een consistent beeld zien, met slechts kleine individuele variaties. Eén van de invullers suggereert de te scoren aspecten weer te geven als stelling, en de formulering iets uit te breiden om misverstanden te voorkomen. Bij toepassing van de systematiek in de praktijk is het wenselijk per thema inhoudelijk experts te betrekken bij de beoordeling.

## 9.3 **Beschouwing van de methodologie**

De methodiek voor de beoordeling van hergebruik en recycling van biomassa-assen biedt een gestructureerde manier om verschillende relevante aspecten te kwantificeren. Door de zes thema's – stralingsbescherming, overige wet- en regelgeving, gezondheid en veiligheid, technisch, financieel/economisch en sociaal-maatschappelijk – afzonderlijk te scoren van 1 tot 5 ontstaat een overzicht van de kansen en beperkingen voor hergebruik. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de

bruikbaarheid, beperkingen en toekomstige verfijningen van deze methodiek.

### 9.3.1 *Rol van stralingsbescherming*

Uit de analyse blijkt dat stralingsbescherming op zichzelf geen beperkende factor hoeft te zijn voor hergebruik. Wel blijft het van belang de maatschappelijke context mee te nemen, met name de noodzaak van adequate communicatie over risico's. Ook de relatie met vrijgave versus storten vraagt nadere aandacht. Binnen generiek afvalbeheer geldt hoe minder problematisch het afval, hoe sterker het hergebruik wordt verplicht, terwijl het instrument van specifieke vrijgave binnen de stralingsbescherming momenteel vooral wordt toegepast om storten toe te staan.

### 9.3.2 *Suggesties voor gebruik en/of verfijning van de methodiek*

De methode gebruikt scores op zes thema's, maar een eenvoudige optelling geeft geen inzicht in het relatieve belang van elk thema. Een mogelijke verfijning is de weging van thema's: bijvoorbeeld een hogere weging voor stralingsbescherming en gezondheid bij radioactief materiaal, terwijl financiële aspecten lager kunnen worden gewogen.

Het is raadzaam bij toepassing van de methodiek minstens één expert per thema te betrekken en relevante stakeholders te consulteren. Dit sluit aan bij de gedachte om de beoordeling te laten uitvoeren door een grotere groep van betrokkenen. Het gemiddelde of mediaan van de scores geeft een robuustere beoordeling.

Sluit waar van toepassing aan op eisen of methodieken welke reeds van toepassing zijn. Hierbij kan gedacht worden aan:

- Afstemming van de methodiek op specifieke nationale en Europese voorschriften om consistentie met vergunningprocedures te verbeteren.
- Een betere aansluiting op het Circulair Materialenplan (CMP). Bij het vaststellen van de minimumstandaarden in CMP zijn de stimulansen en belemmeringen voor hergebruik al afgewogen op het gebied van o.a. milieueffecten, technische haalbaarheid en kosten. Meer informatie over hoe deze afweging is gedaan (en welke belemmeringen eventueel bepalend zijn) kan helpen bij de afweging of hergebruik van radioactieve reststromen haalbaar is.
- Op lange termijn kan het wenselijk zijn om radioactieve componenten en zeer zorgwekkende stoffen op vergelijkbare wijze op te nemen in de nationale afval- en materialenplannen om te komen tot consistente en eenvoudige regelgeving.

Naast een toepassing van de gehele methodiek kan gebruik ook worden beperkt tot een enkel thema, zoals stralingsbescherming, bijvoorbeeld bij vergunningaanvragen.

### 9.3.3 *Workshop voor praktijktoetsing en verdieping*

Een passende vervolgstap is het organiseren van een workshop met bijvoorbeeld de ANVS, IenW en betrokkenen bij het Landelijk Afvalbeheerplan om de methodiek toe te passen op een andere afvalstroom of een herhaling voor biomassa-assen. Hier kan ook de relatie met specifieke vrijgave versus storten verder worden onderzocht.

## 10 Conclusies

Dit rapport beantwoordt aan de hand van de casus Cs-137 in biomassa-assen een tweetal onderzoeksvragen:

- Welke factoren stimuleren dan wel belemmeren hergebruik van radioactieve reststoffen?
- Hoe kunnen deze factoren systematisch tegen elkaar worden afgewogen?

Bij de beantwoording van de eerste vraag valt op dat bescherming van werknemers en leden van de bevolking tegen blootstelling aan ioniserende straling geen onoverkomelijke beperkingen oplegt aan hergebruik van biomassa-assen. Wel zijn er enkele aandachtspunten te identificeren met bredere relevantie dan deze assen: hoewel het instrument specifieke vrijgave in principe toepasbaar is, blijkt dit in de praktijk erg complex. Daarnaast is regelgeving uit de stralingsbescherming minder bekend bij betrokken partijen in de praktijk. Een meer integrale aanpak, met versterking van de aansluiting van regelgeving voor radioactieve en niet-radioactieve reststoffen verdient daarom aanbeveling. Tenslotte bleek uit interviews dat in de praktijk verschillen in de regelgeving voor kunstmatige en van nature voorkomende radionucliden lastig uitlegbaar zijn.

Buiten de stralingsbescherming zijn beleidsmatige stimulansen aanwezig, maar een combinatie van juridische, financiële en normatieve barrières belemmert een grootschalige toepassing van biomassa-assen als circulaire grondstof. De variabele samenstelling van biomassa-assen, met soms ongunstige chemische samenstelling, is een belangrijke belemmerende factor. In combinatie met afwezigheid van certificering en onbekendheid met biomassa-assen als grondstof bemoeilijkt dit de toegang tot de markt.

Voor de beantwoording van de tweede vraag is een systematiek ontwikkeld waarbij voor aspecten op een zestal terreinen (stralingsbescherming, wet- en regelgeving, gezondheid en circulariteit, technisch, financieel/economisch en sociaal-maatschappelijk) op een vijfpuntsschaal beoordeeld kan worden in hoeverre ze stimulerend dan wel belemmerend zijn voor hergebruik. Er is gekozen voor een vijfpuntsschaal omdat hiermee voldoende nuance kan worden aangegeven zonder dat de beoordeling nodeloos complex wordt. Deze systematiek is ook voor andere reststoffen dan Cs-137 bevattende biomassa-assen toepasbaar.



## Referenties

1. M. van der Schaaf, P.D.B.M. Bekhuis, en L.H.A. Boudewijns, *Radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland. Een inventarisatie*, RIVM-rapport 2022-0073, 2022.
2. *Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming*, Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040179/2025-01-01>, Versie 1 januari 2025.
3. *Wet milieubeheer*, Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/2025-09-17>, Versie 17 september 2025.
4. Interview met A. Keulen (Carbonfuse) en A. van Zomeren (TNO) door F. Dekkers, et al., *Hergebruik van biomassa-assen*, 10 januari 2025.
5. Interview met Stralingsbeschermingsdeskundige van Applus Nederland door F. Dekkers, et al., *Hergebruik van Cs-137 houdende biomassa-assen*, 24 maart 2025.
6. Interview met Coördinerend vergunningverlener ANVS (Ronald van Duijvenvoorde) door F. Dekkers and M. van der Linden, *Vergunningverleningsproces voor hergebruik van Cs-137 houdende biomassa-assen*, 25 juni 2025.
7. World Bioenergy Association (WBA), *Global bioenergy statistics report*, 12th edition, 2025.
8. F. Lamers, et al., *Options for increased use of ash from biomass combustion and co-firing*, International Energy Agency (IEA), Bioenergy Task 32, Deliverable D7, 2018.
9. J.W.A. Langeveld, et al., *Gebruik van houtige biomassa voor energieopwekking*, PBE Jaarrapportage 2021, opgesteld door Biomass research, 2022.
10. J.I. Odziejewicz, et al., *Utilization of Ashes from Biomass Combustion*. *Energies*, 2023. **15**(24): p. 9653.
11. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), *Klimaat- en Energieverkenning 2022*, PBL-publicatienummer: 4838, 2022.
12. K. Brandenburg, et al., *Hernieuwbare energie in Nederland 2022*, Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), beschikbaar via <https://www.cbs.nl/nl-nl/erratum/2023/41/hernieuwbare-energie-in-nederland-2022>, 4 september 2023.
13. L. Tosti, et al., *Evaluating Biomass Ash Properties as Influenced by Feedstock and Thermal Conversion Technology towards Cement Clinker Production with a Lower Carbon Footprint*. *Waste and Biomass Valorization*, 2021. **12**(8): p. 4703–4719.
14. P.P. Morgenstern en G.M. de Groot, *Bio-energiecentrales. Inventariserend onderzoek naar milieuaspecten bij diverse energieopwekkingstechnieken met behulp van biomassa*, RIVM-rapport 609021104/2010, 2010.
15. S.V. Vassilev, et al., *An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification*. *Fuel*, 2013. **105**: p. 40–76.
16. S.A. Farber, *Cesium-137 in wood ash results of nationwide survey*, Conferentie: 5th Annual National Biofuels Conference Newton, MA, October 21, 1992, 1992.

17. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments*. Technical Reports Series 472, Wenen: IAEA, 2010.
18. S. Stoulos, et al., *Post-Chernobyl 137Cs in the atmosphere of Thessaloniki: a consequence of the financial crisis in Greece*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014. **128**: p. 68–74.
19. R. Hedvall, B. Erlandsson, en S. Mattsson, *Cs-137 in fuels and ash products from biofuel power plants in Sweden*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1996. **31**(1): p. 103–117.
20. S. Radulovic, S. Pepin, en R. Wiegers, *Natural radionuclides and Cs-137 in biomass combustion residues: how to solve the puzzle?*, Conferentie: 10th International Symposium on Naturally Occuring Radioactive Material - Utrecht (the Netherlands), 9-13 mei 2022, 2023.
21. J. Fořt, et al., *Durability analysis of sustainable mortars with biomass fly ash as high-volume replacement of Portland cement*. *Journal of Building Engineering*, 2024. **91**: p. 109565.
22. J. van Groenestijn, P. Harmsen, en H. Bos, *Biomassa voor de circulaire economie: Alles wat je wilde weten over biomassa maar nooit durfde te vragen*, *Groene grondstoffen*, no. 23, Wageningen Food & Biobased Research, Wageningen.  
<https://doi.org/10.18174/475889>, 2019.
23. M. Berra, T. Mangialardi, en A.E. Paolini, *Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials*. *Construction and Building Materials*, 2015. **76**: p. 286–296.
24. J.Y. An en B.B. Park, *Effects of wood ash and N fertilization on soil chemical properties and growth of *Zelkova serrata* across soil types*. *Scientific Reports*, 2021. **11**(1): p. 14489.
25. F.C. Silva, et al., *Use of biomass ash-based materials as soil fertilisers: Critical review of the existing regulatory framework*. *Journal of Cleaner Production*, 2019. **214**: p. 112–124.
26. L. van Schöll en R. Postma, *Hergebruiksmogelijkheden houtas als meststof: toepassingsmogelijkheden*, *Nutriënten Management Instituut NMI B.V. Eindrapport 1704.N.17*, 2018.
27. *ANVS-verordening stralingsbescherming*, Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040581/2023-07-01>, Versie 1 juli 2023.
28. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance*. Safety Reports Series 44, Wenen: IAEA, 2005.
29. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. Volume I: Sources, New York: UN, 2000.
30. *Besluit stortplaatsen en stortverboden afvalstoffen*, Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0009094/2025-08-18>, Versie 18 augustus 2025.
31. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, *Het nationale programma voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen*, 2016.
32. P.D.B.M. Bekhuis en S.W.L. Palstra, *Specifieke vrijgave van radioactieve stoffen in Nederland. Regelgeving en toepassing*, RIVM-rapport 2024-0073, 2024.

33. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Application of the Concept of Clearance*. General Safety Guide 18, Wenen: IAEA, 2023.
34. Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS). *Toestemming RWE Geertruidenberg voor tijdelijk verwerken as met radioactieve stoffen*. Beschikbaar via <https://www.autoriteitnvs.nl/actueel/nieuws/2025/04/23/toestemming-rwe-geertruidenberg-voor-tijdelijk-verwerken-as-met-radioactieve-stoffen>, geraadpleegd 17 oktober 2025.
35. Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS), *Wijziging Kernenergielovgeving (Kernenergielovgeving verleend aan RWE Generation NL B.V. voor het verrichten van handelingen met radioactieve stoffen, toestellen en materialen met van nature voorkomende radionucliden)*, ANVS-PP-2023/0096869-16, 23 april 2025.
36. Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS), *Reactie aanvullende informatie inzake Cs-137 houdende vliegassen*, Brief aan RWE Generation NL B.V, ANVS-PP-2023/0096869-09, beschikbaar via <https://www.autoriteitnvs.nl/documenten/vergunning/2025/02/26/ontwerpvergunning-rwe>, 2023.
37. Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS), *Verzoek aanvullende informatie*, Brief aan RWE Generation NL B.V, ANVS-PP-2023/0096869-05, beschikbaar via <https://www.autoriteitnvs.nl/documenten/vergunning/2025/02/26/ontwerpvergunning-rwe>, 16 mei 2023.
38. Europese Unie, *Richtlijn 2013/59/Euratom*, Beschikbaar via <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj/eng>, 5 december 2013.
39. S. Pepin, et al., *The issue of Cs-137 in firewood and biomass combustion: a review*. Radiation Protection Dosimetry, 2023. **199**(8-9): p. 759–766.
40. Radiation and Nuclear Safety Authority Finland (STUK), *Radiation and Nuclear Safety Authority Regulation on Practices that Cause Exposure to Natural Radiation*, Regulation STUK S/6/2022, 28 januari 2022.
41. Radiation and Nuclear Safety Authority Finland (STUK). *The radioactivity of building materials and ash*. Beschikbaar via <https://stuk.fi/en/the-radioactivity-of-building-materials-and-ash>, geraadpleegd 18 juli 2025.
42. M. Markkanen, *STUK experience on recycling of Cs-containing fly ashes*, Persoonlijke communicatie aan F. Dekkers (RIVM), 29 november 2024.
43. Swedish Radiation Safety Authority (SSM), *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om hantering av kontaminerad aska*, SSMFS 2012:3, 2012.
44. Swedish Radiation Safety Authority (SSM), *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om undantag från strålskyddslagen och om friklassning av material, byggnadsstrukturer och områden*, SSMFS 2018:3, 2018.
45. Skogsstyrelsen (Swedish Forest Agency). *Askåterföring*. Beschikbaar via <https://www.skogsstyrelsen.se/bruka-skog/skogsbransle/askaterforing/>, geraadpleegd 17 oktober 2025.

46. Skogsstyrelsen (Swedish Forest Agency), *Recommendations for extraction of harvesting residues and ash recycling* Letter (meddelande) 2008:2, beschikbaar via <https://shop.skogsstyrelsen.se/sv/publikationer/meddelanden/rekommendationer-vid-uttag-av-avverkningsrester-och-askaterforin.html>, 2008 (English translation 2011).
47. F. Dekkers, et al., *Vrijgave van terreinen na werkzaamheden met radioactiviteit. Mogelijkheden voor dosiscriteria*, RIVM-rapport 2022-0184, 2023.
48. Applus+ RTD, *Risico-inventarisatie en -evaluatie voor de stralingsdosis ten gevolge van handelingen met bronnen van ioniserende straling*, Rapport 0325-148045-001-01-2021 revisie 1, bijlage 2 (RWE Generation NL BV RIE) bij vergunningaanvraag van RWE Generation NL B.V. van 13 april 2023, beschikbaar via <https://www.autoriteitnvs.nl/documenten/vergunning/2025/02/26/ontwerpvergunning-rwe>, 11 april 2023.
49. P. de Jong, et al., *National survey on the natural radioactivity and <sup>222</sup>Rn exhalation rate of building materials in the Netherlands*. Health Physics, 2006. **91**(3): p. 200–210.
50. R.C.G.M. Smetsers en P.D.B.M. Bekhuis, *Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserendestraling in Nederland*, RIVM-rapport 2021-0032, 2021.
51. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Circulair Materialenplan (CMP)*. Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/>, geraadpleegd 24 februari 2026.
52. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Landelijk afvalbeheerplan 2017–2029 (LAP 3)*, 2021.
53. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Circulair Materialenplan (CMP): materialen*. Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/materialen/>, geraadpleegd 24 februari 2026.
54. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Circulair Materialenplan (CMP): instrumenten voor sturing*. Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/onderwerpen/verwerken-materialen/hogwaardige-verwerking/instrumenten-sturing/>, geraadpleegd 24 februari 2026.
55. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *LAP3: A4 Algemene uitgangspunten en algemeen beleid*, Tweede wijziging, beschikbaar via <https://lap3.nl/beleidskader/deel-a-algemeen/a4-algemene/>, geldig vanaf 1 januari 2024.
56. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *LAP3: D2 Minimumstandaard*, Tweede wijziging, beschikbaar via <https://lap3.nl/beleidskader/deel-d-vergunning/d2-minimumstandaard/>, geldig vanaf 1 januari 2024.
57. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Circulair Materialenplan (CMP): assen energiewinning uit biomassa*. Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/materialen/assen-energiewinning-biomassa/>, geraadpleegd 24 februari 2026.
58. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Circulair Materialenplan (CMP): reststoffen kolencentrales*. Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/materialen/reststoffen-kolencentrales/>, geraadpleegd 24 februari 2026.

59. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Circulair Materialenplan (CMP): hout (keten)*. Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/materialen/assen-energiewinning-biomassa/>, geraadpleegd 24 februari 2026.
60. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *LAP3: Sectorplan 24 Reststoffen van energiewinning uit biomassa*, Tweede wijziging, beschikbaar via <https://lap3.nl/sectorplannen/sectorplannen/rest-biomassa/>, geldig vanaf 1 januari 2024.
61. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *LAP3: Sectorplan 23 Reststoffen van kolengestookte energiecentrales*, Tweede wijziging, beschikbaar via <https://lap3.nl/sectorplannen/sectorplannen/rest-kolen/>, geldig vanaf 1 januari 2024.
62. Kiwa BMC B.V., *Beoordelingsrichtlijn voor het KOMO®-(attest met) productcertificaat voor poederkoolvliegias voor gebruik in mortel en beton. Techniekgebied H3*, BRL 2505:2013, beschikbaar via <https://www.komo-online.nl/brl/brl2505>, 2013.
63. Rijkswaterstaat. *Over het LAP*. Beschikbaar via <https://lap3.nl/lap/>, geraadpleegd 18 juli 2025.
64. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Ontwerp Circulair Materialenplan Afvalplan: assen biomassa energiewinning*, Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/inspraak/materialen/>, januari 2025.
65. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Ontwerp Circulair Materialenplan Afvalplan: reststoffen kolencentrales*, Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/inspraak/materialen/>, januari 2025.
66. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *LAP3: B14 Zeer zorgwekkende stoffen*, Tweede wijziging, beschikbaar via <https://lap3.nl/beleidskader/deel-b-afvalbeheer/b14-zeer/>, 1 januari 2024.
67. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Circulair Materialenplan (CMP): over de toetsingskaders*. Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/cmp/toetsingskaders/>, geraadpleegd 24 februari 2026.
68. R. Siddique, *Utilization of wood ash in concrete manufacturing*. Resources, Conservation and Recycling, 2012. **67**: p. 27–33.
69. P. Van den Heede en N. De Belie, *Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations*. Cement and Concrete Composites, 2012. **34**(4): p. 431–442.
70. *Richtlijn 2008/98/EG van het Europees Parlement en de Raad van 19 november 2008 betreffende afvalstoffen en tot intrekking van een aantal richtlijnen (Kaderrichtlijn Afvalstoffen)*, Beschikbaar via <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20251016>, Geconsolideerde versie 16 oktober 2025.
71. T. Turunen, *Waste by any other name? National end-of-waste rulings and waste shipments*. Review of European, Comparative & International Environmental Law. **Early view** (<https://doi.org/10.1111/reel.70026>).

72. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). *CE-markering in de Europese Unie: regels en richtlijnen*. Beschikbaar via <https://www.rvo.nl/onderwerpen/eu-wetgeving/ce-markering>, geraadpleegd 15 december 2025.
73. *Regeling bodemkwaliteit 2022*, Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0047808/2025-05-21>, Versie 1 januari 2025.
74. I. Maj, et al., *Biomass Ash: A Review of Chemical Compositions and Management Trends*. Sustainability, 2025. **17**(11): p. 4925.
75. I. Carević, et al., *Leaching Characteristics of Wood Biomass Fly Ash Cement Composites*. Applied Sciences, 2020. **10**(23): p. 8704.
76. L. Tosti, et al., *Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material*. Resources, Conservation and Recycling, 2018. **134**: p. 25–33.
77. L. Tosti, et al., *Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products*. Journal of Cleaner Production, 2020. **245**: p. 118937.
78. *Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet*, Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0019031/2025-01-01>, Versie 1 januari 2025.
79. L. Tosti, et al., *Assessment of biomass ash applications in soil and cement mortars*. Chemosphere, 2019. **223**: p. 425–437.
80. K. Manskinen, H. Nurmesniemi, en R. Pöykiö, *Occupational Risk Evaluation of Using Bottom Ash and Fly Ash as a Construction Material*. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2012. **16**(1): p. 79–87.
81. S. Peters, et al., *Personal exposure to inhalable cement dust among construction workers*. Journal of Environmental Monitoring, 2009. **11**(1): p. 174–180.
82. *Arbeidsomstandighedenregeling*, Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0008587/2025-02-01>, Versie 1 februari 2025.
83. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Nationaal Programma Circulaire Economie 2023-2030*, februari 2023.
84. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Nationaal Programma Circulaire Economie, 1e actualisatie (2025)*, oktober 2025.
85. N. Tkachenko, et al., *Global database of cement production assets and upstream suppliers*. Scientific Data, 2023. **10**(1): p. 696.
86. G. Habert, et al., *Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives*. Cement and Concrete Research, 2010. **40**(5): p. 820–826.
87. S.A. Miller, A. Horvath, en P.J.M. Monteiro, *Readily implementable techniques can cut annual CO2 emissions from the production of concrete by over 20%*. Environmental Research Letters, 2016. **11**(7): p. 074029.
88. M. Fischetti, N. Bockelman, en W.V. Srubar, *Solving cement's massive carbon problem*, Scientific American, beschikbaar via <https://www.scientificamerican.com/article/solving-cements-massive-carbon-problem/>, 1 februari 2013.
89. Global Cement and Concrete Association (GCCA), *Concrete Future. The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*, Publication version 0.1, 12 oktober 2021.

90. I.H. Shah, et al., *Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO2 emissions by up to 1.3 gigatons*. Nature Communications, 2022. **13**(1): p. 5758.
91. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Ontwerp Circulair Materialenplan: vormen van recycling beoordelen*, Beschikbaar via <https://circulairmaterialenplan.nl/inspraak/onderwerpen/hoogwaardige-verwerking-0/>, januari 2025.
92. G.C.H. Doudart de la Grée, et al., *Contaminated biomass fly ashes – Characterization and treatment optimization for reuse as building materials*. Waste Management, 2016. **49**: p. 96–109.
93. G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, en E. de Moraes Rego Fairbairn, *Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete*. Materials and Structures, 2009. **42**(7): p. 983–992.
94. I. Gabrijel, M. Skazlić, en N. Štirmer, *Long-Term Behavior of Concrete Containing Wood Biomass Fly Ash*. Applied Sciences, 2022. **12**(24): p. 12859.
95. O.J. Olatoyan, et al., *Potential use of biomass ash as a sustainable alternative for fly ash in concrete production: A review*. Hybrid Advances, 2023. **4**: p. 100076.
96. L. van der Voort, *Grondstoffenschaarste dreigt: nationale strategie in ons maatschappelijke belang*, 21e jaargang nummer 13/14, beschikbaar via <https://www.cascade-zandgrind.nl/nieuws/grondstoffenschaarste-dreigt-2.html>, 18 november 2024.
97. SGS INTRON B.V., *Ontwikkelingen betreffende hoofdbestanddelen voor klinkergebaserde cementen en geopolymeren*, Rapport A117240/R20201150a-NL 2021.
98. Sociaal-Economische Raad (SER), *Meer vaart maken met de grondstoffentransitie. Reactie op het Nationaal Programma Circulaire Economie 2023-2030*, ADVIES 23/04 | April 2023, 2023.
99. M. Timmermans, et al., *Beschikbaarheid en gebruik secundaire bouwmaterialen en producten*. Verkenning, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), De circulaire bouwconomie, 2021.
100. Rijksoverheid. *Circulaire economie in 2050*. Beschikbaar via <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/nederland-circulair-in-2050>, geraadpleegd 23 oktober 2025.
101. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). *MIA en Vamil voor ondernemers*. Beschikbaar via <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/mia-vamil/ondernemers>, geraadpleegd 23 oktober 2025.
102. J.R. Pels, *Hergebruik van assen uit biomassaverbranding. Hoeveelheden en samenstelling van de assen en opties voor materiaalhergebruik*, Energie Centrum Nederland, ECN-E--11-034, Petten, Nederland, 2011.
103. N. Love, et al., *Stakeholders' perspective on sustainable cement made with naturally occurring radioactive by-products: A cross-country comparison*. Journal of Environmental Management, 2025. **374**: p. 124136.
104. Cement & beton centrum. *Cementnormen*. Beschikbaar via <https://cementenbeton.nl/cementnormen/>, geraadpleegd 17 april 2025.

105. Cement & beton centrum. *Samenstelling van beton*. Beschikbaar via <https://cementenbeton.nl/samenstelling-beton/>, geraadpleegd 17 april 2025.

## Bijlage 1 Blootstellingsscenario's

In deze bijlage worden de blootstellingsberekeningen, gepresenteerd in paragraaf 3.4 in meer detail besproken.

### B1.1 Verdunning bij recycling van biomassa-vliegas

In Tabel B1.1 en Tabel B1.2 is een overzicht gegeven van de verschillende stappen in de recycling van biomassa-vliegas (Tabel B1.1 beschrijft recycling in bouw materiaal, Tabel B1.2 beschrijft een alternatieve toepassing, namelijk het gebruik van vliegas als meststof). Het uitgangspunt is vliegas met 1 Bq/g Cs-137.

De concentratie neemt in elke stap af (beschreven met de verdunningsfactoren  $f_1$  t/m  $f_6$ ). De mate van verdunning hangt af van de stap in het proces maar zal typisch een orde van grootte zijn, zie Tabel B1.3. Leden van de bevolking staan dus bloot aan een product waarin het hergebruikte vliegas meerdere malen is verdund.

Opmerkingen bij de tabellen:

- In sommige gevallen staat de verdunningsfactor tussen haakjes: dit geeft aan dat personen kunnen blootstaan aan verschillende concentraties (onverdund en verdund materiaal).
- Cs-137 in grond kan worden opgenomen in eetbare gewassen (in een moestuin). De factoren die de opname van Cs-137 in planten beschrijven zijn niet opgenomen in de tabel (deze zijn meegenomen in de blootstellingsscenario's).

Tabel B1.1 Overzicht van de mogelijke stappen in de recycling van biomassa-vliegas met Cs-137, bij gebruik in bouwmaterialen.

Stap	Beschrijving	Materiaal	[Cs-137] (Bq/g)	Blootgestelde persoon
I	Verwerken van vliegas (o.a. transport, mengen van verschillende partijen)	Vliegas	1 ( $\times f_1$ )	Werknemer (kan van een derde partij zijn)
II	Het maken van vliegas-houdend cement	Vliegas, cement	1 $\times f_1$ ( $\times f_2$ )	Werknemer
III	Het maken van beton, en het bouwen met beton	Cement, beton	1 $\times f_1 \times f_2$ ( $\times f_3$ )	Werknemer
IVa	Aanwezig zijn in/rond een constructie van beton (dit zal met name niet-constructief beton zijn, bijvoorbeeld tegels, zie paragraaf 3.4)	Beton	1 $\times f_1 \times f_2$ $\times f_3$	Lid van bevolking
IVb	Uitloging van radionucliden uit beton naar omliggende grond	Grond	1 $\times f_1 \times f_2$ $\times f_3 \times f_4$	Lid van bevolking
V	Verwerken van oud beton, maken van nieuw beton, en bouwen met beton, na een bepaalde tijd (met radioactief verval $D$ )	Beton	1 $\times f_1 \times f_2$ $\times f_3$ ( $\times f_5$ ) $\times D$	Werknemer
VI	Aanwezig zijn in een constructie van beton (dit kan constructief beton zijn,	Beton	1 $\times f_1 \times f_2$ $\times f_3 \times f_5 \times D$	Lid van bevolking

Stap	Beschrijving	Materiaal	[Cs-137] (Bq/g)	Blootgestelde persoon
	bijvoorbeeld gebruikt in de woningbouw, zie paragraaf 3.4)			

Tabel B1.2 Overzicht van de mogelijke stappen in de recycling van biomassa-vliegas met Cs-137, bij gebruik als meststof.

Stap	Beschrijving	Materiaal	[Cs-137] (Bq/g)	Blootgestelde persoon
I	Verwerken van vliegas (o.a. transport, mengen van verschillende partijen)	Vliegas	$1 \times f_1$	Werknemer (kan van een derde partij zijn)
VII	Gebruik van vliegas als meststof (mengen met grond)	Grond	$1 \times f_1 \times f_6$	Lid van de bevolking

Tabel B1.3 Typische (conservatieve) waarde voor de verdunningsfactoren.

Factor	Omschrijving	Waarde	Opm.
f1	Verdunning door het mengen van verschillende batches vliegas, om een (chemisch) homogeen product te maken	1	1
f2	Fractie biomassa-vliegas in cement	0,3	2
f3	Fractie cement in beton	0,15	3
f4	Uitloging van Cs-137	0,1	4
f5	Fractie van oud beton (granulaat) in nieuw beton	0,5	5
f6	Mengen van vliegas-meststof met grond	0,01	6
D	Radioactief verval	0,5	7

Opmerkingen bij de tabel:

- De keuze voor  $f_1 = 1$  (geen verdunning) is zeer conservatief. Verder kan de verdunningsfactor  $f_1$  in Tabel B1.1 en Tabel B1.2 verschillende waarden hebben. Hier is in deze eenvoudige berekeningen geen rekening mee gehouden.
- De fractie vliegas in cement hangt af van het type cement, en ligt tussen 0,06 en 0,35 voor de types waarin vliegas is verwerkt [104]. Het gaat in dit geval om vliegas van kolencentrales. Volgens Tosti et al. [76] heeft betonmortel waarin 20-40% van het cement is vervangen door biomassa-vliegas goede eigenschappen, al neemt de druksterkte bij 40% vliegas iets af. Daarom is gekozen voor  $f_2 = 0,3$ . Dit is een hogere fractie dan op dit moment is toegestaan volgens norm EN 450 (zie paragraaf 3.4).
- Beton bestaat uit 1 deel cement, 2 delen zand en 3 delen grind [105].
- De verdunningsfactor voor uitloging,  $f_4$ , is lastig in te schatten. Voor de berekeningen is aangenomen dat al het Cs-137 uit een betonnen weg (0,2 m dik, 5 m breed, dichtheid 2,4 g/cm<sup>3</sup>) uitloopt en uiteindelijk terechtkomt in een stuk grond naast de weg (0,2 m dik, 100 m breed, dichtheid 1,3 g/cm<sup>3</sup>).
- Aangenomen wordt dat de volledige hoeveelheid grind wordt vervangen door oud beton (granulaat). Dit is een conservatieve aanname.
- Gebaseerd op de maximale toegestane hoeveelheid biomassa-vliegas als meststof in de landbouw in Denemarken (5 ton per hectare per 5 jaar) [25]. Aangenomen is dat het vliegas (onverdund) elk jaar wordt aangebracht (1 ton per hectare, ofwel 100 g per m<sup>2</sup>), wordt verdund in de bovenste 20 cm grond (dichtheid 1,3 g/cm<sup>3</sup>), en dat de activiteitsconcentratie in grond wel afneemt door radioactief verval, maar niet door uitloging naar dieper gelegen bodemlagen of opname door planten. Na ca. 100 jaar is de activiteitsconcentratie in de grond constant (evenwicht tussen radioactief verval en aanbreng van nieuw vliegas), en is de verhouding tussen de activiteitsconcentratie in grond en in vliegas ordegrrootte 0,01. Wanneer vliegas slechts enkele jaren wordt aangebracht, kan een lagere waarde voor  $f_6$  worden gebruikt (ordegrrootte 0,001).
- Beton wordt typisch na enkele tientallen jaren hergebruikt (zie paragraaf 3.4), voor de berekeningen wordt uitgegaan van hergebruik na 1 halveringstijd van Cs-137.

## B1.2 Blootstellingsscenario's voor hergebruik van vlieggas met Cs-137

Voor de berekeningen wordt aangesloten bij reeds uitgevoerde blootstellingsberekeningen, namelijk:

- Uit IAEA SRS-44 [28] (Tabel I-VII daarin):
  - o Scenario WL: een werknemer op een deponie of vergelijkbare faciliteit, die blootstaat via de blootstellingswegen externe blootstelling, inhalatie (van stof) en ingestie (via hand-mondcontact).
  - o Scenario RH: een lid van de bevolking dat in een huis woont dat gebouwd is van besmet bouw materiaal. Externe straling is de enige beschouwde blootstellingsweg.
- Uit RIVM-rapport 2022-0184 [47] (Tabel G.1 daarin):
  - o Scenario 'extern': een lid van de bevolking dat tijd doorbrengt op een besmet terrein. Externe straling is de enige beschouwde blootstellingsweg.
  - o Scenario 'ingestie (direct)': een lid van de bevolking dat gewassen eet uit een moestuin met besmette grond. Ingestie is de enige beschouwde blootstellingsweg.

Scenario's uit IAEA SRS-44 liggen ten grondslag aan de vrijgavegrenswaarden in het Bbs (zie paragraaf 3.1).

De berekende blootstellingen in bovenstaande studies zijn geschaald zodat de verdunning van Cs-137 in het materiaal overeenkomt met de waarde in Tabel B1.1 en Tabel B1.2, gegeven de verdunningsfactoren in Tabel B1.3. Verdunningsfactoren tussen haakjes worden niet meegenomen (de berekeningen zijn dus conservatief; er is aangenomen dat personen in elke stap blootstaan aan het minst verdunde materiaal). Voor scenario IVa is daarnaast de blootstellingsduur aangepast naar 400 uur/jaar (in plaats van 7000 uur/jaar in de oorspronkelijke berekening, 400 uur/jaar komt overeen met de gebruikte blootstellingsduur in IAEA SRS-44 voor het hier niet beschouwde scenario RP, een lid van de bevolking dat gebruik maakt van een openbare ruimte waar besmet materiaal is gebruikt voor de constructie).

Niet alle blootgestelde personen uit Tabel B1.1 en Tabel B1.2 zijn relevant voor de blootstellingsberekeningen. De werknemers in stap II, III en V staan bijvoorbeeld bloot aan lagere activiteitsconcentraties dan de werknemers in stap I. Wanneer de blootstellingsscenario's hetzelfde zijn, zal de werknemer in stap I dus altijd de hoogste dosis ontvangen. De berekeningen worden daarom uitgevoerd voor de personen in stap I, IVa, IVb, VI en VII.

## B1.3 Resultaat van blootstellingsberekeningen

Resultaten van de blootstellingsberekeningen zijn gegeven in Tabel B1.4.

De berekende doses zijn (ordegrootte)schattingen. De berekeningen geven een indicatie van de blootstelling van werknemers en leden van de bevolking bij hergebruik van vlieggas met Cs-137. Om een beslissing te maken over specifieke vrijgave zijn mogelijk gedetailleerdere blootstellingsberekeningen nodig, en moet worden onderzocht of de

gebruikte parameters (zoals blootstellingstijd) realistisch zijn voor de werkelijke situatie.

Opmerking: indien het beton in stap VIa wordt gebruikt voor woningbouw in plaats van voor de bouw van tegels e.d., zal de effectieve dosis voor leden van de bevolking hoger zijn: bijna 40 microSv/jaar per Bq/g Cs-137 in het oorspronkelijke vliegas.

*Tabel B1.4 Geschatte blootstelling van werknemers en leden van de bevolking bij hergebruik van vliegas met Cs-137.*

Stap	Persoon	Omschrijving	Blootstellingsweg	Effectieve dosis (microSv/jaar per Bq/g in onverdund vliegas)
I	Werknemer	Komt overeen met scenario WL uit IAEA SRS-44: werknemer die 450 uur/jaar werkt met vliegas.	Ingestie Inhalatie Externe blootstelling	$4,5 \cdot 10^1$
IVa	Lid van de bevolking	Komt overeen met scenario 'extern' uit RIVM 2022-0184: persoon die 400 uur/jaar gebruik maakt van betonnen constructie (weg).	Externe blootstelling	$2,0 \cdot 10^0$
IVb	Lid van de bevolking	Komt overeen met scenario scenario 'ingestie' uit RIVM 2022-0184: persoon die voedsel eet (22 kg/jaar) uit een moestuin (met Cs-137 door uitloging).	Ingestie	$5,0 \cdot 10^{-2}$
VI	Lid van de bevolking	Komt overeen met scenario RH uit IAEA SRS-44: persoon die 4500 uur/jaar gebruik maakt van betonnen constructie (woning).	Externe blootstelling	$9,5 \cdot 10^0$
VII	Lid van de bevolking	Komt overeen met scenario 'ingestie' uit RIVM 2022-0184.: persoon die voedsel eet (22 kg/jaar) uit een moestuin (met vliegas-meststof).	Ingestie	$1,1 \cdot 10^{-1}$

## Bijlage 2 Beoordeling stralingsbeschermingsaspecten

Onderstaande tabel vat de uitkomsten van de stralingsbeschermingsevaluatie door deskundigen binnen RIVM en NRG PALLAS zoals beschreven in paragraaf 9.2.5. Een '✓' betekent dat de deskundige geen oordeel heeft gegeven.

Aspect	RIVM-1	RIVM-2	RIVM-3	NRG-1	NRG-2	NRG-3	Toelichting
<b>1. Wetgeving m.b.t straling</b>							
Minimalisatie	5	5	3	4	5	5	Minimalisatie radioactief afval is een beleidsdoel
Instrument specifieke vrijgave bestaat	4	3	3	2	4	4	Er is een bestaand juridisch kader voor hergebruik
Beschikbaarheid afvoerroutes	3	3	2	4	4	4	Voor biomassa-assen is het ontbreken van afvoerroutes een stimulans voor hergebruik. Voor NORM is stort op een deponie mogelijk, wat een belemmering kan zijn voor het ontwikkelen van hergebruiksmogelijkheden.
Toepassing van specifieke vrijgave	2	2	1	1	2	2	Het instrument is complex, zie Bekhuis en Palstra [32].
Onderscheid tussen kunstmatige en natuurlijke radionucliden	2	2	2	3	3	3	Genoemd als belemmering (lastig uit te leggen), maar streng dosiscriterium voor kunstmatige radionucliden kan stimulerend werken i.v.m. afwezigheid van geschikte afvoerroutes.
Complexiteit vergunningsproces	1	1	1	2	2	2	Vergunningaanvraag kan lang duren. Eisen in de vergunning kunnen strenger zijn dan de wetgeving

Aspect	RIVM-1	RIVM-2	RIVM-3	NRG-1	NRG-2	NRG-3	Toelichting
<b>2. Internationale richtsnoeren</b>							
Beschikbaarheid scenario's	4	5	3	4	4	3	O.a. IAEA SRS-44 en RP 122 beschrijven blootstellingsscenario's (mogelijk zijn aanvullende scenario's nodig voor grote hoeveelheden).
Graduele aanpak	4	5	2	3	5	/	IAEA geeft aan dat specifieke vrijgave voor hergebruik past binnen de graduele aanpak.
<b>3. Regelgeving omringende landen</b>							
Aanwezigheid regelgeving in andere landen	4	4	4	3	3	/	Sommige landen hebben regelgeving voor biomassa-assen met Cs-137. Een aandachtspunt bij overname van deze regelgeving in NL is de classificatie als bestaande of geplande blootstellingsituatie (in landen met veel bosbouw en veel Cs-137 depositie ligt classificatie als bestaande blootstellingssituatie voor de hand).
Harmonisatie regelgeving	3	1	3	2	3	3	Ontbreekt. Internationale handel/transport kan hierdoor worden bemoeilijkt. Harmonisatie is niet te verwachten.
<b>4. Stralingsrisico's bij hergebruik</b>							
Daadwerkelijke stralingsrisico's	5	5	2	5	5	5	De dosis bij hergebruik van biomassa-assen is beperkt (<10 microSv/jaar voor een lid van de bevolking per Bq/g Cs-137 in het as)



Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

april 2026

De zorg voor morgen  
begint vandaag