

Materiaalvoorraden in de maatschappij

Overzicht van materialen in de
Nederlandse stedelijke mijn

CML: Janneke van Oorschot, Teun Verhagen, Laurant van Oers, Ester van
der Voet

CBS: Vincent van Straalen, Vivian Tunn, Kiki Kersten, Roel Delahaye

Metabolic: Nico Schouten, Pieter Witteveen, Merlijn Blok

MSc Industrial Ecology master thesis studenten: Jochem van der Zaag, Bas
Roelofs, Judith van der Horst - Verschelling, Lowik Pieters, Emma van der
Bent

CML en CBS, Maart 2023

Voorwoord

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie 2019-2023. Dit werkprogramma is een samenwerkingsverband van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML), het Centraal Planbureau (CPB), het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), RVO.nl, Rijkswaterstaat, TNO en de Universiteit Utrecht (UU) onder leiding van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Het kabinet streeft naar een volledig circulaire economie in 2050. Het doel van het werkprogramma is om de door het kabinet uitgezette koers naar 2050 te kunnen monitoren en te evalueren en de overheid te voorzien van de kennis die nodig is voor de vormgeving of bijsturing van beleid. Meer informatie over het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie is te vinden op <https://www.pbl.nl/monitoring-circulaire-economie>.



**Universiteit
Leiden**



**Monitoring en Sturing
Circulaire Economie**

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	3
Samenvatting.....	5
Introductie	12
Methode	12
Materialen	12
Productcategorieën	13
Resultaten	15
Totalen per materiaal.....	15
Totalen per productcategorie	19
Beschikbaarheid van materialen uit de stedelijke mijn.....	27
Discussie	29
Referenties	34
Appendix 1	36
Appendix 2	38

Samenvatting

De urban mine - wat is dat?

Ieder jaar komen grondstoffen, materialen en producten onze economie binnen. Van die hoeveelheden hebben we een vrij goed beeld: ze worden bijgehouden in de productie- en handelsstatistieken. Er verdwijnen ook weer grondstoffen, materialen en producten. Deels worden deze ge(her)exporteerd, en voor een deel worden deze omgezet in afval en emissies. Ook van export hebben we een goed beeld. Van emissies en afval is het beeld incompleet en gefragmenteerd. Van wat er tussen het moment van instroom en het moment van uitstroom gebeurt, weten we nog veel minder.

Voor sommige grondstoffen, materialen en producten is het verblijf in onze maatschappij kort. Voorbeelden zijn fossiele brandstoffen en voedsel: gebruik betekent opgebruik. Andere grondstoffen blijven langer in de gebruiksfase. De levensduur kan enorm variëren, korter dan een jaar (bijvoorbeeld, verpakkingen of kranten), enkele jaren (bijvoorbeeld, elektronica of kleding) tot vele decennia en soms zelfs eeuwen (gebouwen, infrastructuur, meubilair).

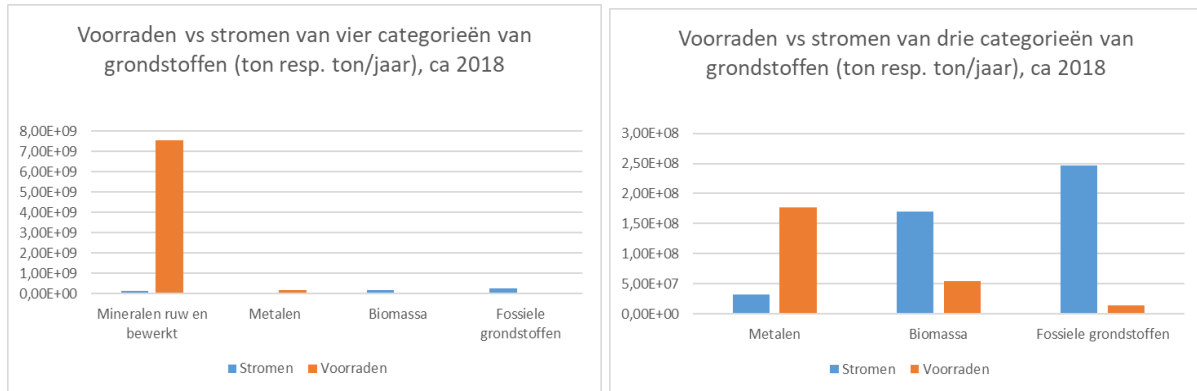
Al met al zijn in de loop der tijd enorme hoeveelheden grondstoffen, toegepast in materialen en producten, opgehoopt in onze maatschappij. Deze geaccumuleerde voorraden (*in-use stocks*) worden ook wel gekenschetst als de *urban mine*, de stedelijke mijn. Deze urban mine is het onderwerp van dit rapport. Informatie over de urban mine is schaars, maar essentieel: **in een circulaire economie is de urban mine onze voornaamste bron van grondstoffen**. Het is waar het nadenken over een circulaire economie zou moeten starten: hoe kunnen we de producten en materialen in de urban mine zo goed mogelijk in gebruik houden, via hergebruik, levensduurverlenging en recycling? Vanuit dat oogpunt is het heel wonderlijk dat we er zo weinig vanaf weten, en is de inventarisatie die de afgelopen jaren gemaakt is in het kader van het Werkprogramma Monitoring Circulaire Economie dringend nodig geweest. Het resultaat van deze inventarisatie ligt nu voor u.

De urban mine van Nederland, zoals door ons geïnventariseerd, bevat **7,81 miljard ton** materiaal. Per hoofd van de bevolking is dat ca. **447 ton**.

Wat betekent dat getal? Is dat veel? Het aantal inventarisaties naar voorraden is beperkt dus er is weinig vergelijkingsmateriaal. Er is één studie waarin is gepoogd op wereldschaal in inschatting te maken van de omvang van de voorraden, op basis van lange tijdreeksen van instromen en uitstromen: de studie van Krausmann et al. (2017). Volgens deze studie bedraagt de totale voorraad materialen wereldwijd ca. 100 ton/cap, en voor geïndustrialiseerde landen ca. 320 ton/cap. Onze inventarisatie levert getallen in een zelfde orde grootte. De Nederlandse *urban mine* is, zoals te verwachten, groot vergeleken met het wereldgemiddelde, en is ook zelfs aan de hoge kant vergeleken met het gemiddelde van de geïndustrialiseerde landen. Het is lastig te achterhalen waar dit verschil vandaan komt, ook al vanwege de verschillen in aanpak tussen beide inventarisaties.

Een eerste vergelijking, om de omvang van de voorraden beter te kunnen interpreteren, kan gemaakt worden tussen deze voorraden en de jaarlijkse instromen van dezelfde grondstoffen in de Nederlandse economie (Materiaalmonitor 2018, CBS 2020). Het resultaat is hieronder te zien in Figuur 1. Voorraden zijn een factor 10 groter dan stromen, en we vinden ze vooral terug in de categorie mineralen. Ook voor metalen zijn de voorraden groter dan de stromen. Voor biomassa en fossiele grondstoffen geldt dit niet: hier zijn de stromen groter dan de voorraden.

Figuur 1 Stromen en voorraden van verschillende typen grondstoffen



Het verschil tussen stromen en voorraden is het grootst voor mineralen, wat vermoedelijk betekent dat de gemiddelde levensduur van de toepassingen waar mineralen in terecht komen lang is - tientallen jaren tot zelfs eeuwen. Voor metalen is het verschil een factor 5-10 - de toepassingen van metalen zijn veel diverser dan die van beton, en daarmee ook de spreiding in levensduren. Voor biomassa en fossiele grondstoffen zijn de stromen veel groter dan de voorraden, wat duidt op een gemiddelde levensduur van de toepassingen die korter is dan een jaar. Eigenlijk is het beter om te concluderen dat voor biomassa en fossiele grondstoffen het grootste deel van de stromen helemaal de voorraad niet in gaat. Voor dat deel dat wel voorraadvormend is (hout en kunststoffen), kan de levensduur wel degelijk ook lang zijn.

De urban mine - hoe groot is die en wat zit erin?

Hoewel de inventarisatie nog hiaten heeft kunnen we wel stellen dat we meer dan 95% in beeld hebben in termen van massa. In tabel 1 staat een samenvatting van de samenstelling van de Nederlandse *urban mine*. Details vindt u verderop in de rapportage en in de bijbehorende spreadsheet.

Tabel 1 De samenstelling van de Nederlandse urban mine: totalen en per categorie de twee grootste toepassingen

Grondstof-categorieën	Grondstoffen / materialen	Ton Totaal	Ton / cap Totaal	Belangrijkste toepassingen per materiaal	Ton per toepassing	Ton / cap per toepassing
Mineralen	Zand, grind, klei, grond	3,9 miljard	223	Wegen	1,75 miljard	100
				Kustverdediging	1,16 miljard	67
	Beton, baksteen, asfalt etc.	3,6 miljard	209	Gebouwen	2,51 miljard	144
				Wegen	1,11 miljard	63
Metalen	Staal	165 miljoen	9,4	Gebouwen	98 miljoen	5,6
				Voertuigen	30 miljoen	1,7
	Koper en aluminium	8,9 miljoen	0,66	Gebouwen	2,97 miljoen	0,17
				Voertuigen	2,49 miljoen	0,14
	Kritieke materialen	7,9 duizend	0,005	Elektrische machines	3,5 duizend	0,002
				Consumenten-elektronica	1 duizend	0,0006
Biomassa	Hout	53 miljoen	3,1	Gebouwen, consumenten-goederen	47 miljoen	2,7
	Weefsel	1,06 miljoen	0,06	Kleding	0,39 miljoen	0,02
Fossiele grondstoffen	Kunststoffen	14 miljoen	0,8	Drink- en riool-watersysteem	5,96 miljoen	0,34
				Gebouwen	2,52 miljoen	0,14

De helft van de in totaal 447 ton/cap bestaat uit zand, klei, grond etc. voor de weg- en waterbouw. Wegen zijn de belangrijkste, maar kustverdediging een goede tweede, en vermoedelijk uniek voor Nederland. De voorraad in wegenbouw zal niet zo erg veranderen, maar kustverdediging zal meer materialen vergen in de toekomst als gevolg van zeespiegelstijging.

Van de andere helft bestaat het leeuwendeel (93%) uit bouwmaterialen als beton, cement, baksteen etc. Die vinden we vooral terug in onze gebouwen. Deze voorraad gaat op wereldschaal nog enorm toenemen, maar ook in Nederland moet er nog bijgebouwd worden om aan de vraag naar woonruimte te voldoen.

Zoals uit bovenstaande blijkt, domineert de gebouwde omgeving in termen van oppervlaktedelfstoffen die niet over grote afstanden getransporteerd worden. Maar ook als we gaan kijken naar andere grondstoffen, vinden we veel daarvan terug in de gebouwde omgeving. Staal is daarbij de grootste. Van de in totaal 0,17 miljard ton metalen (pakweg 10 ton/cap) zit 70% (0,12 miljard ton, 7 ton/cap) in gebouwen en infrastructuur. Ook voor biomassa (hout) geldt dat: ca. 47 miljoen ton (ruim 3 ton/cap), ofwel 86% van het totaal, zit in gebouwen. Voor plastics is dat 30%. Bouwmaterialen als staal en beton zijn niet problematisch vanwege tekorten, maar dragen wel veel bij aan CO₂-emissies. Momenteel wordt volgens CBS een groot deel van het bouw- en sloopafval hergebruikt. Echter het gaat hier grotendeels om downcycling: verhardings- en ophogingsmateriaal voor de wegenbouw. Recycling in de gebouwde omgeving zelf gebeurt weinig - economische en institutionele barrières staan in de weg van wat technisch mogelijk is.

Metalen zijn een interessante groep vanuit oogpunt van een circulaire economie. Het zijn waardevolle materialen en ze lenen zich uitstekend voor recycling. Staal vormt veruit het grootste aandeel: 165 miljoen ton oftewel 9,4 ton/cap. Zoals gezegd zit het grootste deel in de gebouwde omgeving. Van de resterende 14% zijn voertuigen de grootste categorie. Het meeste daarvan vinden we terug in schepen, met personenauto's als een goede tweede. Wereldwijd wordt staal al voor een belangrijk deel gerecycled (ca. 45% volgens Worldsteel). Dit gerecycled staal komt gewoon weer op de wereldmarkt, zodat staal dat nu gebruikt wordt al een Recycled Content heeft van pakweg 25%. Binnen Nederland vindt geen recycling plaats, maar dat betekent niet dat staal dat uit de Nederlandse urban mine komt wordt gedumpt. Voor personenauto's is recycling al de standaard, ook al gebeurt dat dan buiten de Nederlandse grenzen. Veel oude voertuigen worden geëxporteerd voor tweedehandsgebruik elders, waarmee we de greep op de end-of-life verwerking kwijtraken. Voor schepen geldt dat de verwerking nu voor 100% elders gebeurt, en vaak onder kommervolle en milieuonvriendelijke omstandigheden.

Andere bulk-metalen zijn met name aluminium en koper. In totaal zit hiervan 8,9 miljoen ton in de Nederlandse urban mine, oftewel 0,5 ton/cap. Hiervan vinden we 36% terug in gebouwen. Maar hier zijn ook andere categorieën interessant, met name voertuigen, maar ook het energiesysteem en allerhande apparatuur en consumentengoederen. Aluminium en koper is te vinden in vele ondergrondse toepassingen, in leidingen, kabels en pijpen van het elektriciteitssysteem, het gassysteem en het drink- en rioolwatersysteem. Net als voor staal, zijn ook voor aluminium en koper de end-of-life recycling rates al aanzienlijk. Echter voor de ondergrondse toepassingen constateren we dat een belangrijk deel na afdanking gewoon blijft liggen (zie verderop: *hibernating stocks*) Voor koper is een vergelijking interessant met de geologische voorraden. Bekende geologische reserves¹ volgens USGS ([Mineral Commodity Summaries 2022 - Copper \(usgs.gov\)](https://www.usgs.gov/minerals/commodity/copper)) zijn 880 miljoen ton op wereldschaal, dat wil zeggen 0,11 ton/cap, lager dan de

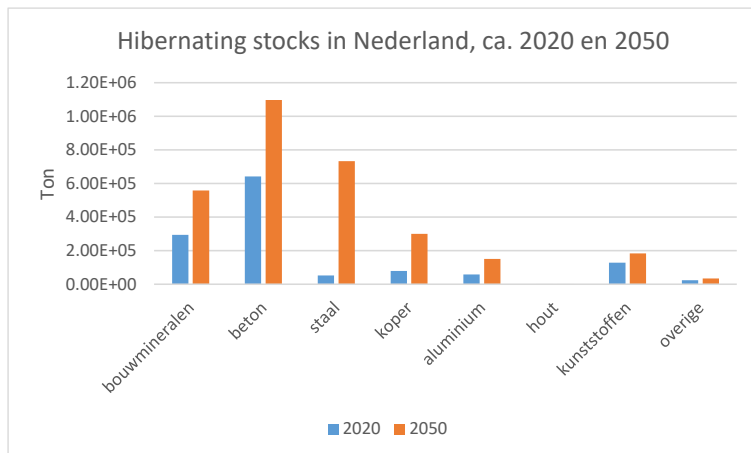
¹ Reserves, resources en estimated unknown resources zijn drie begrippen uit de mijnbouw-geologie die alle drie aangeven hoeveel van een bepaald metaal er in erts in de grond te vinden is. Reserves slaat op de ondergrondse voorraden die we kennen, en die op dit moment al profijtelijk gewonnen kunnen worden. Resources betreft de hoeveelheid waarvan we weten dat die er is, zonder te kijken naar de economische aspecten van winning. Unknown estimated resources tenslotte zijn de hoeveelheden waarvan geologen inschatten dat die nog wel te vinden zijn in de grond, op basis van hun kennis van de samenstelling van de aardkorst.

Nederlandse urban mine die 2,6 miljoen ton ofwel 0,15 ton/cap bedraagt. We kunnen dus concluderen dat voor koper de (Nederlandse) urban mine bepaald wordt ondergewaardeerd.

Een aparte categorie metalen betreft de grote en diverse groep van kostbare, technische en kritieke metalen. Het gaat daarbij om metalen als kobalt, lithium, goud, zilver en zeldzame aardmetalen die terug te vinden zijn in moderne communicatie- en energietechnologieën. Dit zijn elementen die in zeer kleine hoeveelheden gebruikt worden, maar waarvan de vraag sterk aan het toenemen is en waarvan het lastig is de productie snel op te schalen. In de voorraad zit nu 76 duizend ton, ofwel ruim 4 kg/cap. Momenteel vinden we het meeste terug in allerlei elektronica, maar in de toekomst zullen de categorieën van het energiesysteem en de voertuigen naar verwachting sterk toenemen, met een factor 5 tot 50. Van dit materiaal wordt nu nog zo goed als niets gerecycled. In de toekomst zal dat echt anders moeten. Voor kobalt worden de reserves nu geschat op 71 miljoen ton, ofwel 9 kg/cap. De urban mine in Nederland is in dit geval veel kleiner: 0,1 kg/cap. Echter deze is wel snel groeiende. Voor de toekomst is te verwachten (en te hopen) dat de voorraad in de urban mine belangrijker gaat worden als bron van materialen dan de geologische voorraden.

De andere categorieën grondstoffen, biomassa en fossiele grondstoffen, zijn vooral geassocieerd met stromen en minder met voorraden. De grootste biomassastromen zijn gerelateerd aan voedsel. Voorraadvormend biomassagebruik betreft met name hout, en ook wel vezels in textiel. De totale voorraad bedraagt 54 miljoen ton, ruim 3 ton/cap. Dat zit bijna geheel in gebouwen. De grootste fossiele grondstofstromen hebben te maken met brandstoffen voor de energievoorziening. Ook deze toepassing bereikt de voorraad niet: gebruiken is gelijk aan opgebruiken, wat resteert is CO₂. Voorraadvormend fossiele grondstofgebruik betreft eigenlijk alleen kunststoffen. Er is momenteel zo'n 14 miljoen ton plastics in gebruik, ongeveer 800 kg/cap. Kunststoffen zitten in veel verschillende toepassingen, de grootste voorraad blijkt in het drink- en rioolwatersysteem te zijn opgeslagen, waar veel leidingen en pijpen van PVC of PE zijn. Ook hier zijn gebouwen weer belangrijk, en ook in voertuigen en textiel vinden we veel kunststoffen.

Tenslotte: een interessant onderdeel van de urban mine zijn de zogenaamde *hibernating stocks*: de winterslapende voorraden. Dit begrip wordt gebruikt voor toepassingen die niet langer in gebruik zijn, maar ook (nog) niet aangeboden aan de afvalverwerking. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om oude elektronica die nog bij mensen thuis ligt. Maar ook om de eerder genoemde in onbruik geraakte ondergrondse kabels en leidingen van elektriciteit, gas, water en telecom, waarin o.a. veel koper zit. Het voordeel van deze hibernating stocks is dat ze meteen beschikbaar zijn. Voor een opstartende urban mining sector zijn deze voorraden wellicht interessant om mee te beginnen. Momenteel is het te lastig of te duur om deze voorraden te exploiteren, maar daarin zou door gericht beleid verandering kunnen komen. Onderstaande figuur geeft een overzicht van wat we nu wel weten van deze winterslapende voorraden en onze inschatting over hoe die zich gaan ontwikkelen tot 2050. De hoeveelheden zijn vergeleken bij de voorraad die nog wel in gebruik is niet groot, maar wel groeiend, speciaal voor metalen.



Urban mining en de circulaire economie

Deze urban mine is het materiaal waarmee we het in een circulaire economie moeten doen. Kennis te hebben over de omvang ervan is daarmee essentieel, maar er is meer informatie nodig om deze mijn goed te kunnen exploiteren. Er zijn enkele relevante verschillen tussen de urban mine en een "gewone" geologische mijn:

- De urban mine bestaat grotendeels uit toepassingen van grondstoffen die op dit moment in gebruik zijn en dus niet op elk gewenst moment gewonnen kunnen worden. Prospecting, het proces van inschatten van de hoeveelheid die uit een mijn gewonnen kan worden, moet dus ook een tijdsdimensie in zich hebben: wanneer komt het materiaal beschikbaar?
- De urban mine is waar de mensen zijn, en dus juist niet in afgelegen gebieden. Dit bespaart transport, maar stelt ook eisen aan de transport- en verwerkingsprocessen: deze moeten niet te belastend zijn voor de omgeving.
- De urban mine bevat "ertsen" van een andere samenstelling als die we aantreffen in de grond. Dat maakt de winning van materialen uit deze ertsen lastiger.
- De urban mine raakt niet op. Alles wat eruit gaat wordt vervangen, en daarmee hoeft er ook niet te worden nagedacht over mijnsluiting en remediation.

Momenteel loopt binnen het Werkprogramma MSCE een onderzoekslijn waarin verkenningen worden uitgevoerd naar de (toekomstige) uitstroom uit de urban mine onder bepaalde scenario-aannames voor de toekomst. Daarmee is althans het eerste aandachtspunt gedekt: de tijdsdimensie. Voor drie van de voorraden zijn hierover rapportages beschikbaar: het elektriciteitssysteem, het warmtesysteem en gebouwen. De beide energiesystemen zijn momenteel aan sterke verandering onderhevig vanwege de energietransitie. Dat betekent dat een nieuw systeem moet worden opgebouwd, terwijl tegelijkertijd het oude systeem overbodig gaat worden en daarmee beschikbaar komt als tweedehandsmateriaal.

Het goede nieuws: we kunnen uit onze inventarisatie de conclusie trekken dat de Nederlandse urban mine zeer omvangrijk is. We hebben in Nederland dan weliswaar geen mijnen, maar de enorme en nog steeds groeiende urban mine kan daarvoor compenseren.

Het slechte nieuws: we zijn er nog niet goed in om deze mijn te exploiteren. Om te beginnen is deze inventarisatie de eerste in zijn soort: we wisten simpelweg niet hoeveel er opgepot is in de loop der jaren, omdat de statistieken focussen op stromen, en voorraden verwaarloosd hebben. Maar er is ook nog nooit nagedacht over de urban mine als een potentiële bron van materialen voor de toekomst. Weliswaar bestaat er een zekere mate van recycling en hergebruik, maar dat is tot nu toe onderdeel van het afvalbeleid en daarmee reactief. Urban mining is een veel breder

begrip, waarbij de kennis van de omvang en dynamiek ervan gebruikt kan worden om te vooruit te plannen, en mijnbouwplannen te maken over hoe en wanneer te exploiteren.

De boodschap: om op termijn naar een circulaire economie toe te gaan, moeten we nu beginnen met plannen maken om de urban mine te exploiteren. Wanneer we met zijn allen serieus zijn over het terugdringen van primair grondstoffengebruik, is dit essentieel, en liggen hier voor Nederland daarom enorme kansen om voorop te lopen in dit innovatieve veld.

In het onderstaande wordt hierop nader ingegaan.

Een nieuwe productiesector in Nederland: de urban mining sector?

Hoe moet zo'n urban mining sector er uit zien? Om dat uit te werken is andere expertise nodig dan die uit het veld van de industriële ecologie. Wel kunnen we enkele startpunten neerzetten, die van belang zijn bij het concretiseren en ook bij de monitoring, en die voortkomen uit de tot nu toe opgedane inzichten over de dynamiek van de urban mine.

Om te beginnen moet benadrukt worden dat urban mining niet alleen over recycling gaat, maar veel breder is. Het gaat over het zo goed mogelijk in gebruik houden van de materialen waarover we nu beschikken. Dat kan door recycling, maar er zijn ook talloze andere mogelijkheden op materiaal- product- en dienstniveau. Zoals hergebruik, tweedehandsgebruik, reparatie, refurbishing, sharing etc..

Dit betekent ook dat het niet voldoende is om aan de achterkant van de keten te kijken. Recycling en afvalverwerking zijn weliswaar een essentieel (technisch) onderdeel van het exploiteren van de stedelijke mijn, maar er is veel meer nodig. Een ander productontwerp moet het mogelijk maken de End-of-Life verwerking te optimaliseren. Andere supply chain modellen zijn dan ook nodig, waarbij veel meer aandacht is voor onderhoud en de producent de verantwoordelijkheid houdt voor het product. Er is organisatie nodig om het voor de burger mogelijk te maken afgedankte spullen zonder excessieve inspanning of kosten op de goede plaats te krijgen. Regelgeving die nu een hinderpaal is zal aangepast moeten worden. Überhaupt moet nagedacht worden over of prikkels nu de goede kant op werken, en zo niet hoe dat veranderd kan worden. Een veelgehoord probleem is bijvoorbeeld de strikte regelgeving rond afvalstromen, waardoor het praktisch onmogelijk is deze te hergebruiken of te recyclen.

Enkele kenmerken van voorraden in de urban mine zijn belangrijk voor het formuleren van strategieën en beleid voor het exploiteren ervan:

1. De levensduur van de toepassingen
2. De staat van transitie van de toepassingen
3. Het aantal actoren/stakeholders/eigenaren in de keten
4. De mate waarin de keten internationaal is
5. De groeifase van de voorraad

Ad 1. Een belangrijk kenmerk van de urban mine is, zoals al geconstateerd, dat de materialen momenteel in gebruik zijn en dat soms nog voor een aanzienlijke tijd zullen blijven. Bij het maken van plannen om de urban mine te benutten moet daarom rekening gehouden worden met een kortere of langere vertraging vanwege de levensduur van de toepassingen. Wanneer we nu beginnen met een andere bouwstijl, bijvoorbeeld modulair bouwen, plukken we daarvan pas over tientallen jaren de vruchten. Tot die tijd gebeurt er niets - gebouwen die gesloopt worden zijn allemaal nog van voor die tijd. Voor toepassingen met een kortere levensduur zoals bijvoorbeeld elektronica zouden we wel al binnen enkele jaren verschil moeten merken.

In verband hiermee zullen we voor voorraden met een lange levensduur, zoals bijvoorbeeld in gebouwen, een dubbele strategie moeten hanteren. Enerzijds moeten nieuwe voorraden worden opgebouwd die volgens circulaire principes zijn ontworpen. Anderzijds zijn er de oude voorraden die langzamerhand beschikbaar komen en die zo goed mogelijk verwerkt moeten worden. Dat kan

leiden tot een lange overgangperiode, die ingecalculeerd moet worden – en die ervoor gaat zorgen dat al te ambitieuze circulariteitsdoelstellingen op de korte termijn op een teleurstelling gaan uitlopen.

Ad 2. Momenteel hebben we te maken met een grote transitie: de energietransitie. Veel nieuwe toepassingen worden in gebruik genomen, zoals windturbines, zonnecollectoren en batterijen voor opslag. Veel van de toepassingen in het huidige energiesysteem, zoals kolencentrales, raffinaderijen of gasleidingen, worden overbodig en worden van lieverlee afgedankt. Het gaat hierbij om enorme hoeveelheden materialen. Ook hiervoor geldt de bovenbeschreven tweedeling: nieuwe voorraden moeten van meet af aan circulair worden opgebouwd, terwijl de afgedankte toepassingen zo goed mogelijk moeten worden verwerkt. Waar het in gebouwen en in de weg- en waterbouw vooral om bouwmineralen en staal gaat, zijn in het energiesysteem, naast staal, ook veel andere metalen te vinden die hoogwaardig kunnen worden gerecycled.

Ad 3. Hoe groter het aantal actoren in de keten is, des te lastiger is het hierop beleid te voeren. Waar de keten van de grote toepassingen in de weg- en waterbouw praktisch in één hand is, die ook nog eens overheidsgerelateerd is, zijn er bij consumentenelektronica miljoenen actoren in het spel. Weg- en waterbouw lijkt daarmee een mooie testcase voor een circulaire-economiebeleid. Consumenten sturen is notoir lastig. Het gemakkelijker maken van gescheiden inzameling is een goed startpunt, en verder kunnen financiële prikkels effectief zijn zoals heffingen aan de instroomkant en statiegeldsystemen aan de uitstroomkant.

Ad 4. Hoe groter het deel van de keten is dat niet in Nederland plaatsvindt, des te lastiger is het om hierop beleid te voeren. Nederland kan de industrie in andere landen niet beïnvloeden. De enige zinvolle actie is het toewerken naar een informatiesysteem, bijvoorbeeld in de vorm van materiaalpaspoorten voor producten. Op termijn zou dit aan keurmerken gekoppeld kunnen worden. Aan de achterkant van de keten zien we dat Nederland veel tweedehandsproducten exporteert, waardoor geen greep meer is op de end-of-life verwerking. Vanuit een oogpunt van levensduurverlenging is dit wellicht niet slecht, maar wanneer het tweede leven van zo'n toepassing bestaat uit afvalverwerking met non-BAT technieken, is deze export een heroverweging waard. Opnieuw is weg- en waterbouw een sector die zich aandient als sector waarvan de keten (vrijwel) geheel binnen Nederland ligt. Dat geldt ook voor de bouw. Deze sectoren zijn daarmee geschikt om Nederlands beleid op te formuleren en testen.

Ad 5. Bij toepassingen die sterk groeien, is de discrepantie tussen instroom en uitstroom groot en is het dus niet mogelijk, ook niet in theorie, om de kringloop te sluiten. Wanneer de voorraad stabiliseert ontstaan de beste kansen om de uitstroom zoveel mogelijk tot nieuwe instroom te verwerken en zo het aandeel primair materiaal tot een minimum te beperken. Bij krimpende voorraden is de uitstroom groter dan de instroom, en zal de uitdaging eerder zijn om nieuwe toepassingsmogelijkheden te creëren voor de uitstroom. De *hibernating stocks* zijn een voorbeeld van geheel uitgefaseerde voorraden. Deze zijn niet meer in gebruik en kunnen dus meteen geëxploiteerd worden. We moeten ons dan wel afvragen waarom dat niet al gebeurt. Genoemde redenen zijn kosten en organisatie. De opbrengst van het tweedehandsmateriaal weegt niet op tegen de kosten van extractie. En bij ondergrondse kabels en leidingen is het lastig organiseren. Hier kan beleid zeker van invloed zijn, bijvoorbeeld door het verplicht stellen van het verwerken van deze toepassingen.

Door deze nieuwe blik op grondstoffen in de maatschappij komt ook afvalverwerking in een ander daglicht te staan. In plaats van zo goed mogelijk de rommel op te ruimen, worden afvalverwerkingsprocessen onderdeel van een nieuwe binnenlandse productie-sector: urban mining.

Introductie

De Nederlandse overheid heeft ambitieuze doelstellingen voor het realiseren van een circulaire economie: in 2030 moet Nederland voor 50% circulair zijn, en in 2050 moet de economie volledig circulair zijn. Om deze doelstellingen te concretiseren is een Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie in het leven geroepen. Deze rapportage over voorraden van materialen in de maatschappij maakt onderdeel uit van Werkpakket 4: Grondstoffen en Effectmonitoring. Het is een vervolg op een eerdere studies naar voorraden, gepubliceerd in begin 2020, 2021 en 2022 (van Oorschot et al., 2020, van Oorschot et al., 2021 en Verhagen et al., 2022).

In de huidige studie brengen we de resultaten van voorgaande studies samen en vullen deze verder aan. Doel is om inzicht te krijgen in de samenstelling en omvang van materiaalvoorraden in onze maatschappij en de implicaties daarvan voor de transitie naar een circulaire economie.

Methode

In voorgaande studies zijn de materiaalvoorraden van de verschillende productcategorieën in kaart gebracht door het Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML, Universiteit Leiden) en het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). Hiertoe zijn verschillende methoden gebruikt, ofwel op basis van stroomgegevens (top-down benadering), of door een rechtstreekse berekening van de voorraden zelf op productniveau (bottom-up benadering). We refereren naar voorgaande rapportage voor een uitgebreide toelichting van de gebruikte methoden (Verhagen et al., 2022). In deze rapportage brengen we de voorraadgegevens voor de verschillende productcategorieën samen. We vullen de gegevens aan met data uit de materiaalmonitor (CBS, 2020), en data over grond- en weginfrastructuur van EIB & Metabolic (2022).

De gebruikte voorraadanalyses zijn uitgevoerd tussen 2019 en 2022. Afhankelijk van het jaar van uitvoering en de destijds beschikbare data is het jaar van voorraadanalyse bepaald, variërend tussen 2017 en 2020. Aangezien de voorraadverandering over het algemeen traag is, kan er vanuit worden gegaan dat de resultaten een representatief beeld geven van de huidige materiaalvoorraad.

Materialen

We onderscheiden vijf materiaalgroepen: constructiematerialen, metalen, kritieke grondstoffen, biobased materialen en overige materialen. De materialen zijn als volgt onderverdeeld:

- Constructiematerialen (exclusief metalen, met name constructie mineralen):
 - o Beton
 - o Baksteen
 - o Asfalt
 - o Grind, zand, grond, klei (inclusief ophoogzand)
 - o (Kalkzand) steen
 - o Recyclinggranulaat & industriële reststoffen
 - o Overige constructiematerialen: bitumen, hulpstof en asbest cement
- Metalen (bulkmetalen en legeringselementen):

- Staal & ijzer: bevat zowel puur ijzer als staallegeringen, afhankelijk van studie. Bijvoorbeeld: wapeningsstaal, constructiestaal, gietijzer, roestvrijstaal.
- Koper
- Aluminium (inclusief legeringen)
- Overige metalen: omvatten ongespecificeerde en overige metalen, brons en messing.
- Legeringselementen (niet-kritiek): Cr, Mn, Ni, Mo, Zn, Sn, Pb, Cd, Te.
- Overige materialen:
 - Overige materialen: omvatten ongespecificeerde materialen, en materialen als rubber, siliconen, coatings, chemicaliën, kabels, elektronische onderdelen, epoxy resin.
- Biobased materialen:
 - Hout
 - Overige biobased materialen: omvat MDF, papier, karton, rotan en ongespecificeerd organisch materiaal
 - Textiel, biobased: het type materiaal is niet gespecificeerd.
- Kritieke grondstoffen (ook wel *Critical Raw Materials* (CRM) genoemd), 27 in totaal:
 - Neodymium, dysprosium, praseodymium, indium, gallium, germanium, zilver, lithium, terbium, silicium, palladium, kobalt, goud, platina, tantalium, magnesium, titanium, grafiet, strontium, wolfram, yttrium, lanthanum, niobium, vanadium, cerium, hafnium en ongespecificeerde CRM.

In de gebruikte studies wordt de compositie van de staal- en andere legeringen meestal niet gerapporteerd. Op productniveau wordt soms wel een overzicht gegeven van de gebruikte elementen. We rapporteren in deze studie zowel de hoeveelheid op legeringsniveau (i.e. staal) als op elementniveau (e.g. zink). De dubbeltelling die hierbij ontstaat heeft geen significant effect op de resultaten, omdat de legeringselementen vele malen kleiner zijn in omvang dan de hoeveelheid ijzer, aluminium en koper.

Productcategorieën

We onderscheiden de volgende productcategorieën: gebouwen, grond- en weginfrastructuur, waterinfrastructuur, consumenten-elektronica, transport, consumentenproducten, textiel, elektriciteitssysteem, warmtesysteem en elektronische apparatuur. De categorieën kunnen verder worden uitgesplitst naar producttype (zie Appendix 1 voor een volledig overzicht).

Gebouwen

We maken een onderscheid tussen 3 typen woningen (vrijstaand, rijtjeswoning, appartement) en 4 typen overige gebouwen (industrie, kantoor, diensten en winkel). De gebouwen zijn gematerialiseerd door koppeling van materiaalgegevens in kilogram per vierkante meter gebruiksoppervlak, specifiek per gebouwtype en bouwjaar, te koppelen aan ruimtelijke gegevens over de bouwvoorraad in Nederland in het jaar 2018. Details over de methode zijn gerapporteerd in Van Oorschot et al. (2020).

Grond- en weginfrastructuur

De waarden voor infrastructuur zijn afkomstig uit een recente studie van EIB & Metabolic (2022). De enige uitzondering is de spoorinfrastructuur. Hier is gekozen voor de waarden van Pieters (2021), omdat deze een completer beeld geven van de aan spoor gerelateerde materiaalvoorraad. De scope van EIB & Metabolic (2022) beperkt zich tot spoorstaven en ballast. Pieters (2021) neemt daarnaast ook bovenleidingen, wissels, signalen, buffers en spoorwegovergangen mee. Deze onderdelen bevatten waardevolle materialen zoals koper. Het verschil in scope verklaart de hogere waarden voor beton, ijzer & staal in het werk van Pieters. De waarden voor grind, zand,

grond en klei zijn echter een factor 10 groter in het werk Pieters, terwijl de waarden voor aluminium en isolatiemateriaal een factor 10 kleiner zijn. Deze verschillen dienen nader te worden onderzocht.

Om dubbeltelling te voorkomen zijn tunnels en bruggen gerapporteerd door Pieters (2021) buiten beschouwing gelaten. Bruggen en tunnels zijn als aparte categorieën opgenomen in de studie van EIB & Metabolic (2022).

Waterinfrastructuur

Hiervoor is gebruik gemaakt van het werk van Van der Bent (2022), omdat deze een compleet overzicht geeft van zowel de drinkwater als afvalwatervoorziening, terwijl de scope van EIB & Metabolic (2022) zich beperkt tot riolering en rioolwaterzuiveringsinstallaties. De materiaalvoorraden in de laatstgenoemde categorieën komen redelijk overeen in beide studies.

Consumentenelektronica

De materiaalvoorraden in consumentenelektronica zijn in van Oorschot et al. (2019) in kaart gebracht door het CBS. Een onderscheid is gemaakt tussen apparatuur voor temperatuur wisseling, schermen en monitoren, lampen, grote en kleine apparatuur en kleine IT en telecommunicatie.

Transport

De materiaalvoorraden in transport zijn in van Oorschot et al. (2020) gerapporteerd, en de methode toegelicht in de originele rapportage van Van der Zaag (2019). In het originele werk wordt een gedetailleerd onderscheid in transportmiddelen gemaakt. In dit werk aggregeren wij deze als volgt om de resultaten overzichtelijk te houden: vliegtuigen, (motor)fietsen, schepen, treinen en auto's, vrachtwagens & bussen.

Consumentengoederen, textiel, elektronische apparatuur

De voorraden in dit systeem zijn deels gedocumenteerd in Van Oorschot et al. (2021) en Van Oorschot et al. (2022), en later volledig gematerialiseerd door CBS (2022) als onderdeel van de Materialenmonitor (MM).

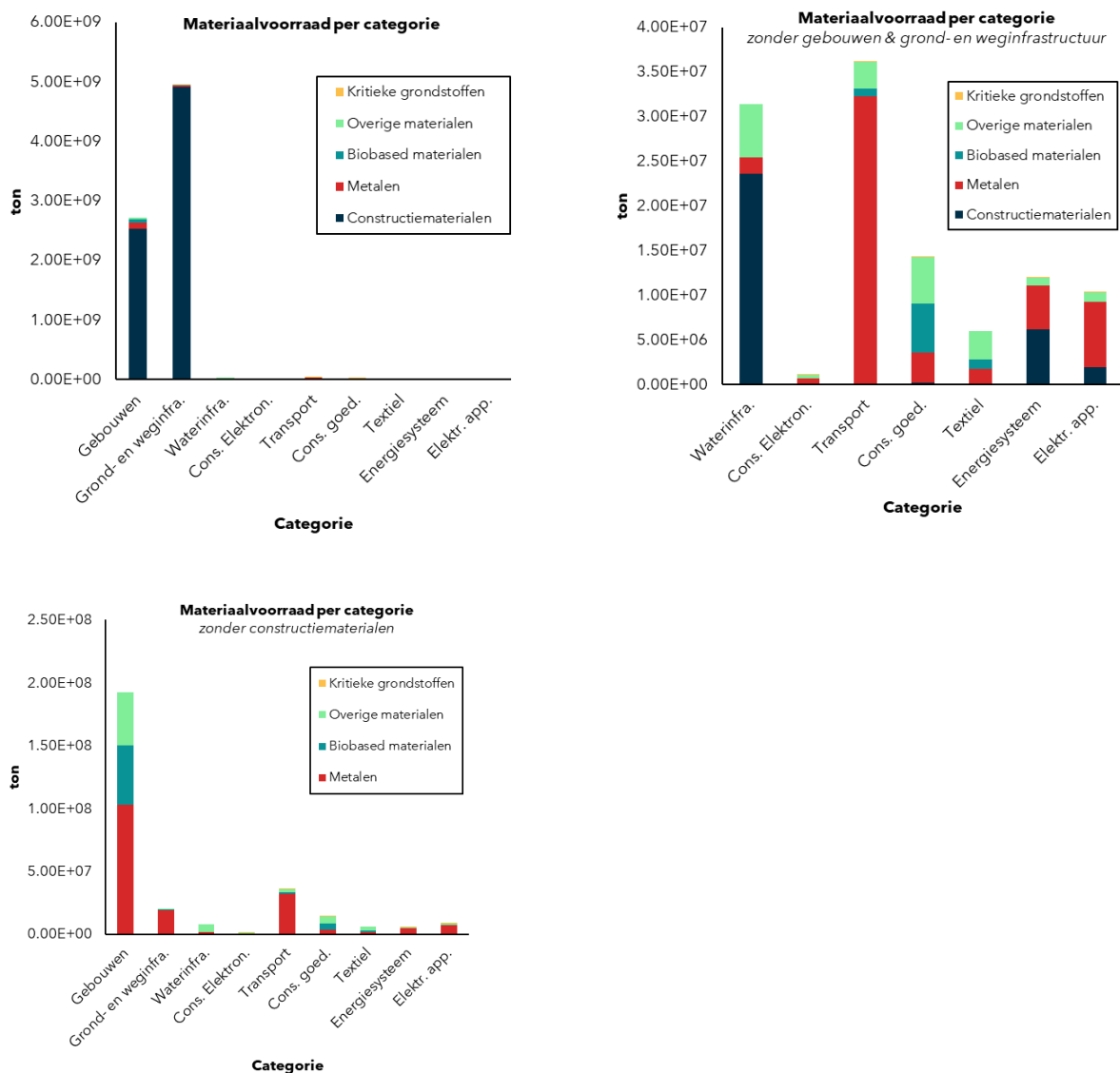
Energiesysteem

De voorraden in het elektriciteitssysteem zijn in kaart gebracht in Van Oorschot et al. (2020) en geüpdatet in de scenarioanalyse vorig jaar (Van Oorschot et al., 2021). In Verhagen et al. (2022) zijn de materiaalvoorraden in het warmtesysteem in kaart gebracht.

Resultaten

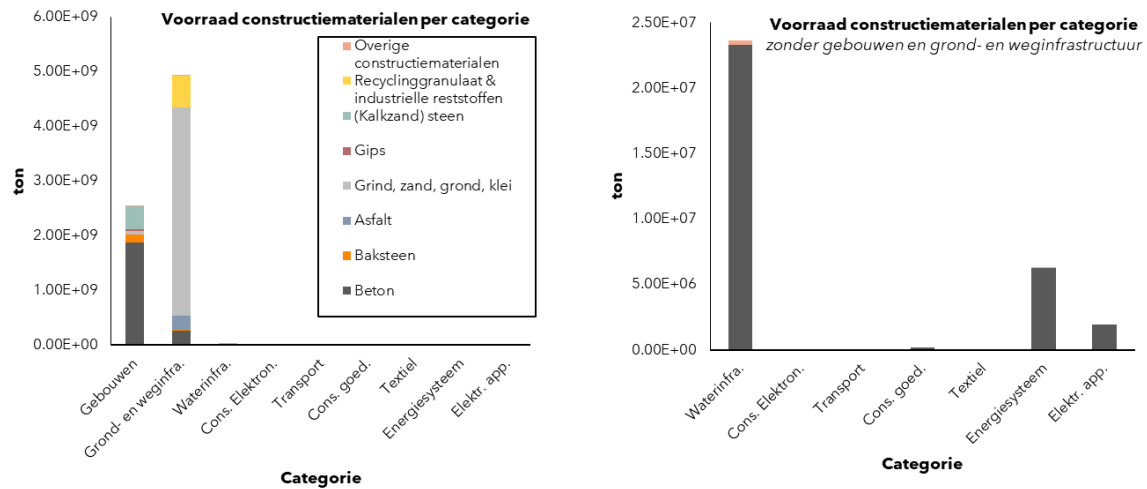
Totalen per materiaal

Figuur 1 laat de totale huidige materiaalvoorraad in Nederland zien. Het figuur linksboven laat de voorraad voor alle categorieën zien, het figuur rechtsboven zonder gebouwen en grond- en weginfrastructuur. Het figuur linksonder laat de materiaalvoorraad zien zonder constructiematerialen. De Nederlandse stedelijke mijn omvat 7,8 gigaton aan materiaal. 98% van de materialen bevindt zich grond- en weginfrastructuur (63%, gedomineerd door ophoogzand, wegen hebben het grootste aandeel) en in gebouwen (35%), veelal in de vorm van constructiematerialen (zoals beton, baksteen, asfalt, zand, grind, klei). De grond- en weginfrastructuur maakt al grootschalig gebruik van gerecycled materiaal, in de vorm van recyclinggranulaat (gerecycled beton) en industriële reststoffen: 12% van de voorraad in GWW bestaat uit zulk gerecycled materiaal.



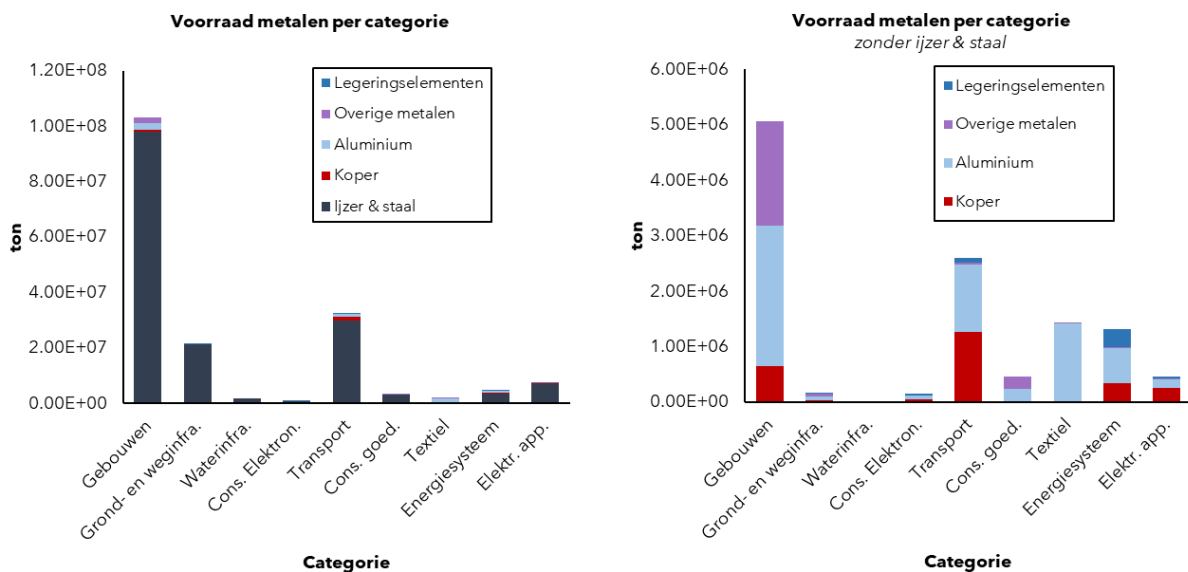
Figuur 1. Totale materiaalvoorraad per productcategorie.

Constructiematerialen vormen de grootste bulk van de materiaalvoorraad, met een totaal van 7,5 gigaton. Deze materialen bevinden zich voornamelijk in gebouwen (34%) en grond- en weginfrastructuur (66%). 52% van het constructiemateriaal bestaat uit grind, (ophoog) zand, grond en klei, 29% uit beton, 8% uit recyclinggranulaat en industriële reststoffen, 6% uit steen, 3% uit asfalt en 2% uit baksteen (Figuur 2). Beton bevindt zich voornamelijk in gebouwen (1,9 gigaton), gevolgd door de grond- en weginfrastructuur (0,3 gigaton), waterinfrastructuur (23 megaton) het energiesysteem (5 megaton) en elektrische apparatuur (2 megaton). 3,8 gigaton grind, zand en klei bevindt zich in grond- en weginfrastructuur, en 57 megaton in gebouwen. De hoeveelheid recyclinggranulaat en industriële reststoffen in grond- en weginfrastructuur is, met een totaal van 0,6 gigaton, ook aanzienlijk.



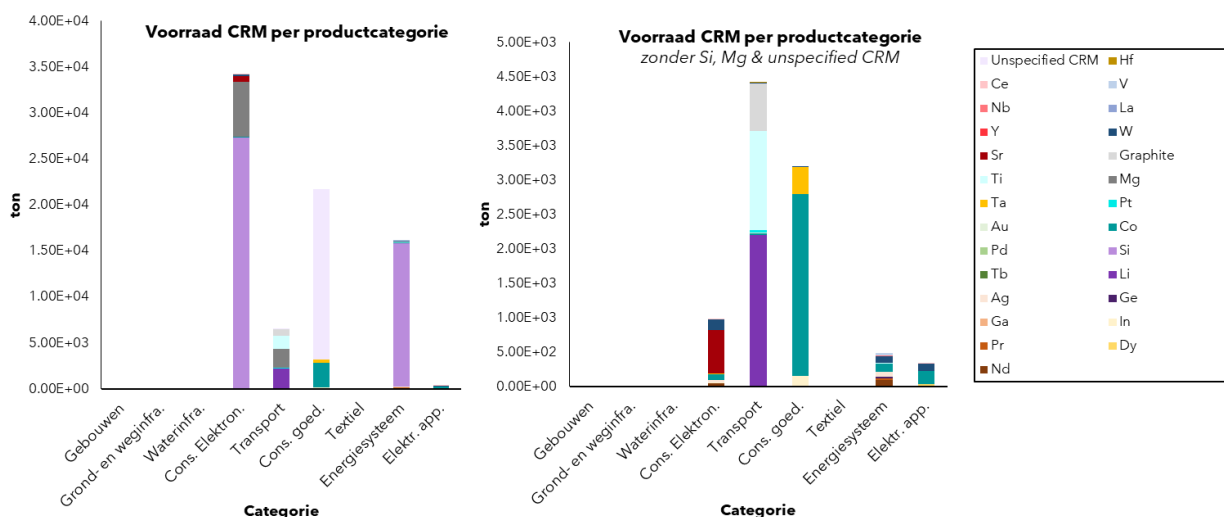
Figuur 2. Constructiematerialen voorraad, voor alle categorieën (a) en voor alle categorieën behalve gebouwen en weginfrastructuur (b).

Na de constructiematerialen vormen metalen de grootste materiaalgroep (Figuur 3). Ook bij metalen bevinden de grootste voorraden zich in gebouwen (59%), gevolgd door transport (19%) en de grond- en weginfrastructuur (11%). De totale voorraad ijzer & staal omvat 163 megaton, de voorraad koper 3 megaton, de voorraad aluminium 6 megaton, de voorraad overige metalen 3 megaton en de voorraad niet-kritieke legeringselementen 0,5 megaton.



Figuur 3. Metaalvoorraad.

Kritieke grondstoffen bevinden zich voornamelijk in consumentenelektronica (34 kiloton), consumentengoederen (22 kiloton), het energiesysteem (16 kiloton), transport (7 kiloton) en elektrische machines (3 kiloton). Silicium, voornamelijk toegepast in consumentenelektronica (27 kiloton) en het elektriciteitssysteem (zonnepanelen) (16 kiloton), vormt de grootste voorraad aan kritieke grondstoffen, gevolgd door 19 kiloton ongespecificeerde kritieke grondstoffen, grotendeels toegepast in consumentengoederen, en 8 kiloton magnesium (toegepast in consumenten elektronica en transport). Kleinere voorraadgroepen omvatten kobalt (3 kiloton), lithium (2 kiloton) en titanium (1 kiloton). Neodymium, indium, zilver, tantaal, grafiet, strontium en wolfram hebben een omvang van tussen de 100 en 1000 ton. Vanadium, germanium, dysprosium, niobium en praseodymium hebben een voorraad tussen de 10 en 100 ton. Met voorraden (veel) kleiner dan 10 ton vormen gallium, terbium, palladium, goud, yttrium, lanthanum, cerium en hafnium de kleinste voorraadgroepen.



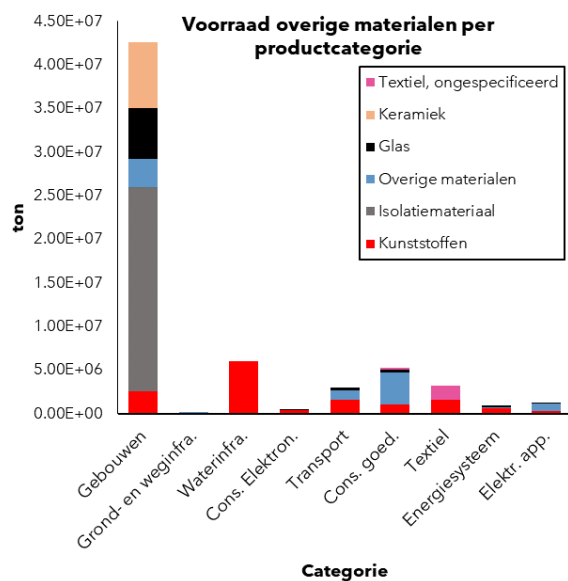
Figuur 4. Kritieke materiaalvoorraad.

De grootste materiaalvoorraad binnen de groep overige materialen is isolatiemateriaal, 24 megaton in totaal, en wordt voornamelijk toegepast in gebouwen. De totale voorraad kunststoffen omvat 14 megaton. Kunststoffen worden in alle categorieën toegepast, waarvan het grootste deel

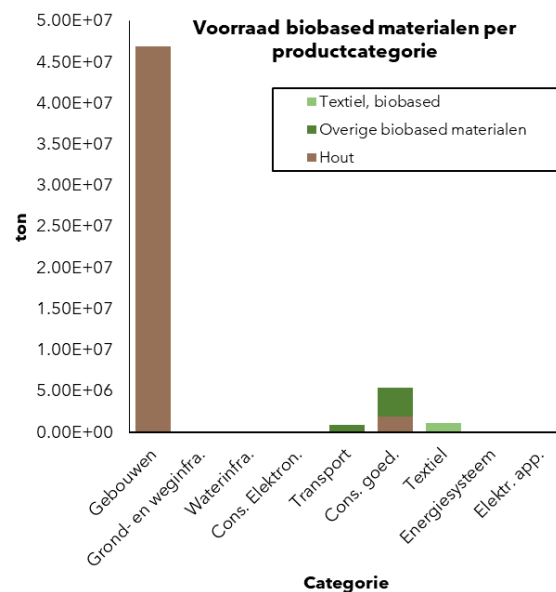
zich bevindt in de waterinfrastructuur, voornamelijk in rioolpijpen (43%), gevolgd door gebouwen (18%) en transport (11%).

Ook de voorraad textiel is met 6 megaton aanzienlijk in omvang. Er was geen data beschikbaar over specifieke materialen gebruikt binnen de materiaal- en textielgroep. Overige materialen, 9 megaton in totaal, bevatten zowel ongeclassificeerde materiaaltypen, en uiteenlopende materiaalsoorten waaronder rubber, coating, epoxy, tape en verf. Het grootste deel van deze overige materialen bevinden zich in consumentengoederen (4 megaton), transport (1 megaton) en gebouwen (3 megaton).

De totale voorraad glas omvat 7 megaton, waarvan ongeveer 90% toegepast in de bouw, 5% in transport en 4% in consumentengoederen, en 3% in het energiesysteem. De voorraad keramiek, toegepast in de bouw, omvat 8 megaton. Keramiek is niet gerapporteerd in consumentengoederen, maar zal waarschijnlijk ook een substantiële voorraad vormen.



Figuur 5. Overige materiaalvoorraad



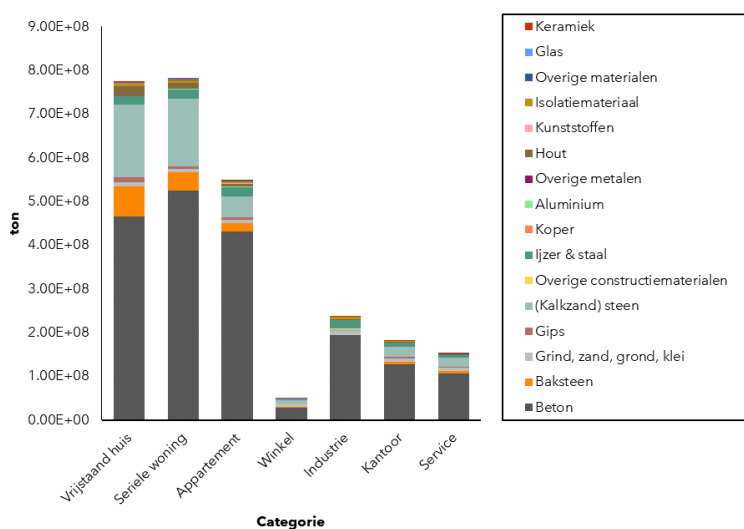
Figuur 6. Biobased materiaalvoorraad.

De voorraad biobased materialen omvat 54 megaton, waarvan 90% hout (49 megaton), 8% overige biobased materialen (4 megaton) en 2% textiel (1 megaton). Hout wordt grotendeels toegepast in gebouwen (96%), en consumentengoederen (4%). Overige biobased materialen bevinden zich met name in consumentengoederen in de vorm van MDF, papier en karton (81%). 19% van de overige biobased materialen bevindt zich in transport en is in de input data geclassificeerd als organisch of rotan.

Totalen per productcategorie

Gebouwen

De bouwvoorraad vormt met 2.7 gigaton 35% van de totale materiaalmassa in de Nederlandse stedelijke mijn. Het grootste onderdeel van deze voorraad bestaat uit constructiematerialen (93%). De grootste materiaalvoorraden bevinden zich in woningen (77%). Figuur 7 laat de materiaaluitsplitsing zien per bouwtype. Beton (69%), baksteen (5%) en (kalkzand)steen (16%) vormen de grootste bulk van de voorraad, gevolgd door ijzer & staal (4%), hout (2%), grind en zand (2%). Gips en isolatiematerialen vormen beiden 1 % van de bouwvoorraad.



Figuur 7. Materialen in gebouwen

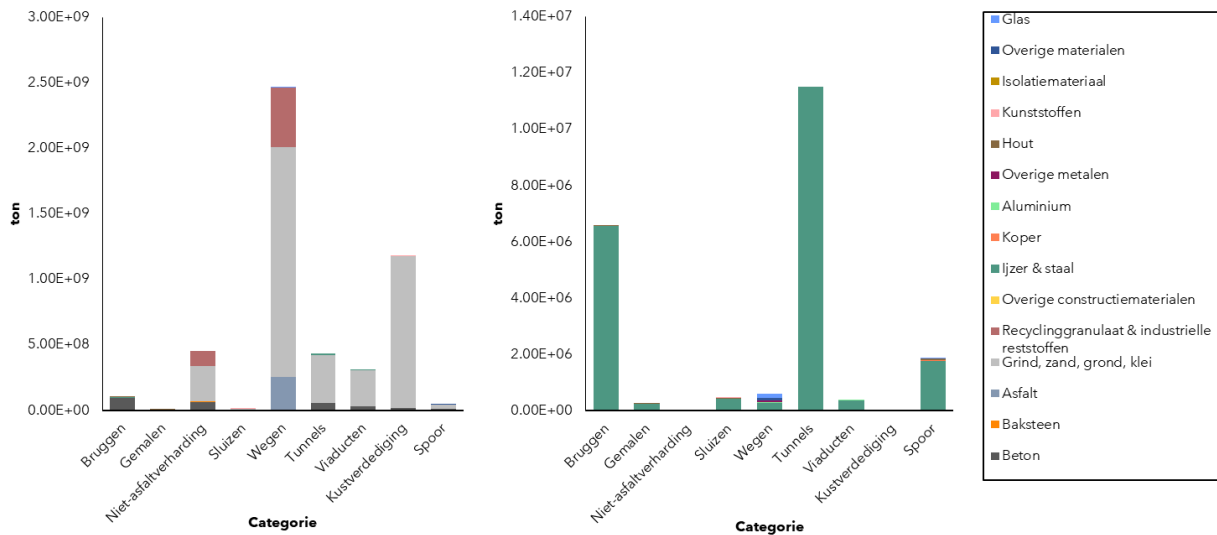
Grond- en weginfrastructuur

De materiaalmassa in de grond- en weginfrastructuur, 5.0 gigaton in totaal, vormt 63% van de stedelijke mijn. Deze voorraad bestaat hoofdzakelijk uit materialen als asfalt, zand en grind (Figuur 8). 50% van de voorraad bevindt zich in wegen, 24% in kustverdediging, 9% in tunnels, 9% in niet-asfaltverharding en 6% in viaducten.

77% van de voorraad in deze groep bestaat uit zand, grind, grond en klei, 38 gigaton in totaal, voornamelijk toegepast in wegen (46%) en kustverdediging (30%). 12%, 573 megaton, bestaat uit recyclinggranulaat en industriële reststoffen, voornamelijk toegepast in wegen (80%) en niet-asfaltverharding (20%). 6% van de voorraad bestaat uit beton, 277 megaton, waarvan het grootste deel toegepast in bruggen (32%), niet-asfaltverharding (23%), tunnels (20%) en viaducten (6%). Asfalt, 253 megaton, wordt gebruikt voor wegen. Verder bevindt zich 7 ton aan baksteen in voornamelijk bruggen (34%) en niet-asfaltverharding (66%).

Alhoewel relatief klein ten opzichte van constructiematerialen, bevinden zich ook substantiële hoeveelheden ijzer & staal (21 megaton) in de grond- en weginfrastructuur, voornamelijk in tunnels en bruggen. Daarnaast bevindt zich 33 kiloton koper in spoorinfrastructuur, en 56 kiloton aluminium voornamelijk in wegen en het spoor. 2 kiloton zink bevindt zich in spoorinfrastructuur, en 5 ton in gemalen.

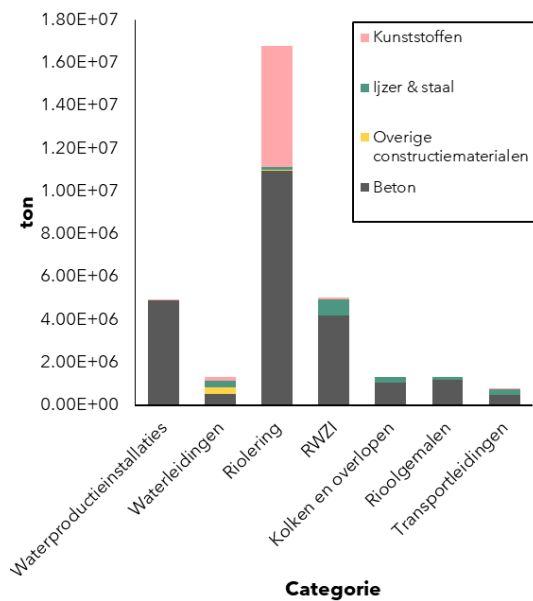
Kunststoffen, 33 kiloton in totaal, worden grotendeels toegepast in kustverdediging (43%) en het spoor (55%). Glas, 147 kiloton in totaal, wordt voornamelijk gebruikt in wegen, net als overige materialen (74 kiloton). 45 kiloton hout bevindt zich in spoorinfrastructuur, 12 kiloton in gemalen, 4 kiloton in sluizen en 2 kiloton in bruggen.



Figuur 8. Materiaalvoorraad in de wegeninfrastructuur voor alle materialen (links) en voor niet-constructiematerialen (rechts).

Waterinfrastructuur

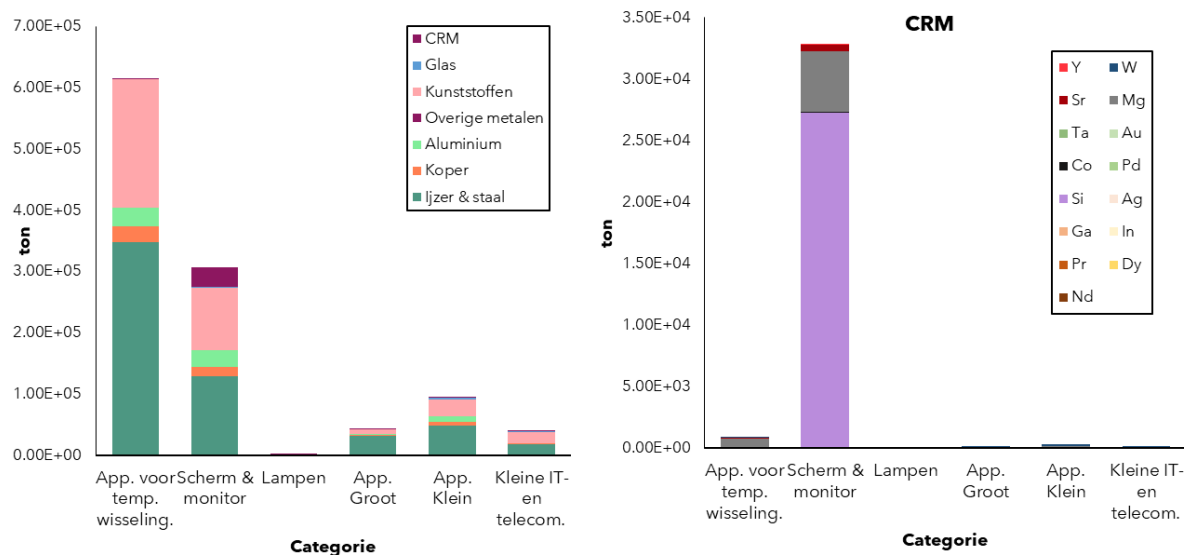
De materiaalvoorraad in waterinfrastructuur, 31 megaton in totaal, bestaat voornamelijk uit beton (23 megaton) en kunststoffen (6 megaton), en kleinere hoeveelheden ijzer & staal (2 megaton) en overige constructiematerialen (asbest cement, 352 kiloton). De grootste voorraad bevindt zich in riolering (53%), gevolgd door waterproductielocaties (16%) en RWZI (16%). De voorraad in kolken en overlopen, rioolgemalen en transportleidingen is relatief klein (3-4%).



Figuur 9. Materiaalvoorraad in waterinfrastructuur.

Consumentenelektronica

De voorraad materialen in consumentenelektronica omvat ruim 1 megaton, waarvan het grootste deel zich bevindt in apparatuur voor temperatuurwisseling, ruim 600 kiloton, en in schermen en monitoren, ruim 300 kiloton (Figuur 10). De materiaalvoorraad in consumentenelektronica bestaat hoofdzakelijk uit ijzer & staal (51%) en kunststoffen (32%). Daarnaast wordt aluminium (71 kiloton), koper (50 kiloton), (niet kritieke) legeringselementen (28 kiloton) en kritieke grondstoffen (34 kiloton) toegepast. Het grootste deel van de kritieke grondstoffen is toegepast in de schermen & monitoren (98%). De grondstoffen omvatten silicium, magnesium, en kleinere hoeveelheden andere kritieke grondstoffen (Figuur 10, rechter figuur).

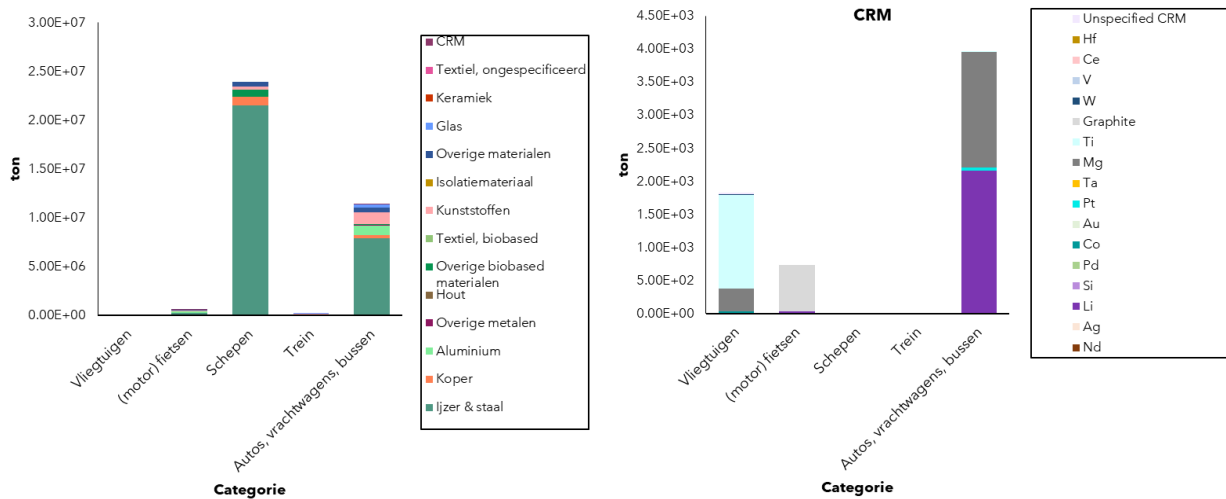


Figuur 10. Materiaalvoorraad in consumentenelektronica.

Transport

De materiaalvoorraad in transport omvat 36 megaton en bestaat voornamelijk uit metalen (Figuur 11). Het aandeel ijzer & staal (82%) is het grootst, gevolgd door kunststoffen (4%), aluminium (3%) en koper (3%). Het grootste deel van de materialen bevindt zich in schepen (66%), gevolgd door auto's, vrachtwagens en bussen (32%). Anders dan in de gebouw en infrastructuur voorraad bevinden zich in deze voorraad geen constructiematerialen.

De totale voorraad kritieke metalen omvat 6.5 kiloton. De voorraden lithium (219 ton), platina (5 ton), grafiet (70 ton), hafnium (0.2 ton) en titanium (143 ton) bevinden zich nagenoeg alleen in transport. Hoeveelheden van deze metalen in andere productcategorieën, zoals consumentenelektronica, zijn niet gerapporteerd in de gebruikte gegevens. Goud vormt met 7 ton 16% van de totale goudvoorraad, en kobalt met 79 ton 1%. Het scala aan kritieke metalen toegepast in transport is breed, maar op dit moment nog relatief klein ten opzichte van andere voorraden. De data presenteert de voorraad voor het jaar 2017. De laatste jaren is het aandeel elektrisch transport snel gestegen, en zal naar verwachting verder stijgen in de komende decennia, wat de voorraad kritieke grondstoffen in deze sector substantieel zal doen vergroten.

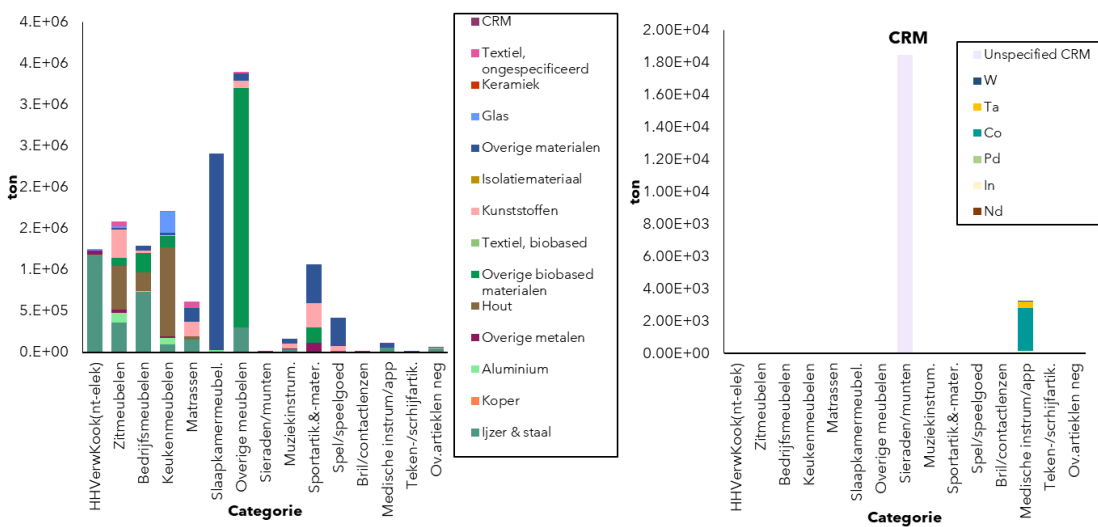


Figuur 11. Materiaalvoorraad in transport.

Consumentengoederen

De voorraad materialen in consumentengoederen is met een totaal van 14 megaton, relatief klein ten opzichte van bijvoorbeeld de gebouw en infrastructuurvoorraad. De voorraad is echter niet irrelevant, 28% van de kritieke materiaalvoorraad bevindt zich binnen deze productcategorie, 10% van de biobased materialen, en 8% van overige materialen. Binnen consumentengoederen bevindt de grootste voorraad zich in overige meubelen (24%), gevolgd door slaapkamermeubels (17%), keukenmeubelen (12%), zitmeubelen (11%) en bedrijfsmeubelen (10%). Overige biobased materialen (26%), overige biobased materialen (25%) en ijzer & staal (21%), en hout (13%) vormen de grootste materiaalvoorraden binnen deze groep. Figuur 11 laat zien dat de materiaalsamenstelling van de goederen divers is.

De kritieke grondstoffenvoorraad wordt gedomineerd door ongespecificeerde materialen, toegepast in munten en sierraden. Waarschijnlijk wordt deze voorraad gedomineerd door goud en zilver. Daarnaast bevindt zich wolfram, tantalium, kobalt, palladium, indium en neodymium in consumentengoederen, voornamelijk in de categorie medische instrumenten en apparatuur.

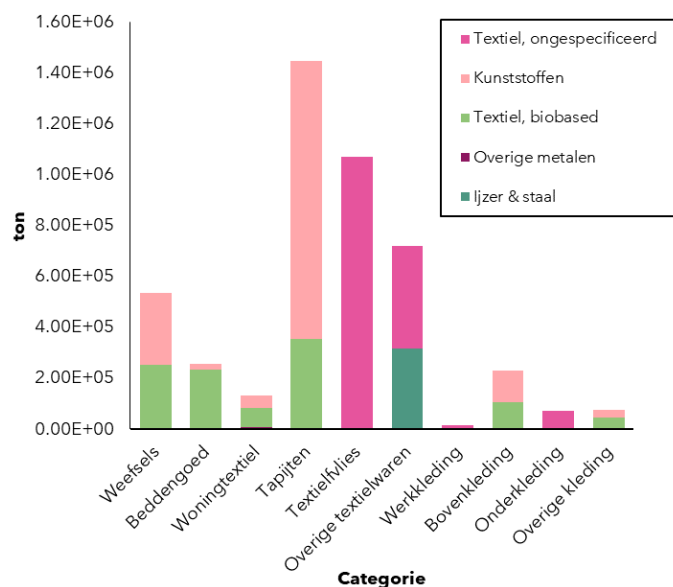


Figuur 12. Materiaalvoorraad in consumentengoederen.

Textiel

Textiel heeft een voorraadomvang van 6 megaton en wordt voornamelijk toegepast in textielvlies (18%), tapijten (24%) en overige textielwaren (36%) (Figuur 13). Een onderscheid kan worden gemaakt tussen biobased textiel en textiel, ongespecificeerd. Andere materialen die voorkomen in deze voorraadgroep zijn ijzer & staal (in overige textielwaren, omvat producten als zeil, regenkleding, touw, parachutes en tassen), overige metalen (in woningtextiel) en kunststoffen (in weefsels, beddengoed, woningtextiel, tapijten, bovenkleding en overige kleding). 35% van de voorraad bestaat uit kunststoffen, 34% uit ongespecificeerd textiel, 23% uit biobased textiel en 7% uit ijzer & staal.

De samenstelling van deze voorraad is nog vrij grof; van de meeste textielwaren is het materiaal onbekend, bij biobased textiel is onbekend om wat voor materiaal het gaat, en bij kunststoffen is onbekend om welk type kunststof het gaat. Deze informatie ontbreekt nog in de statistieken van CBS.



Figuur 13. Materiaalvoorraad in textiel.

Energiesysteem

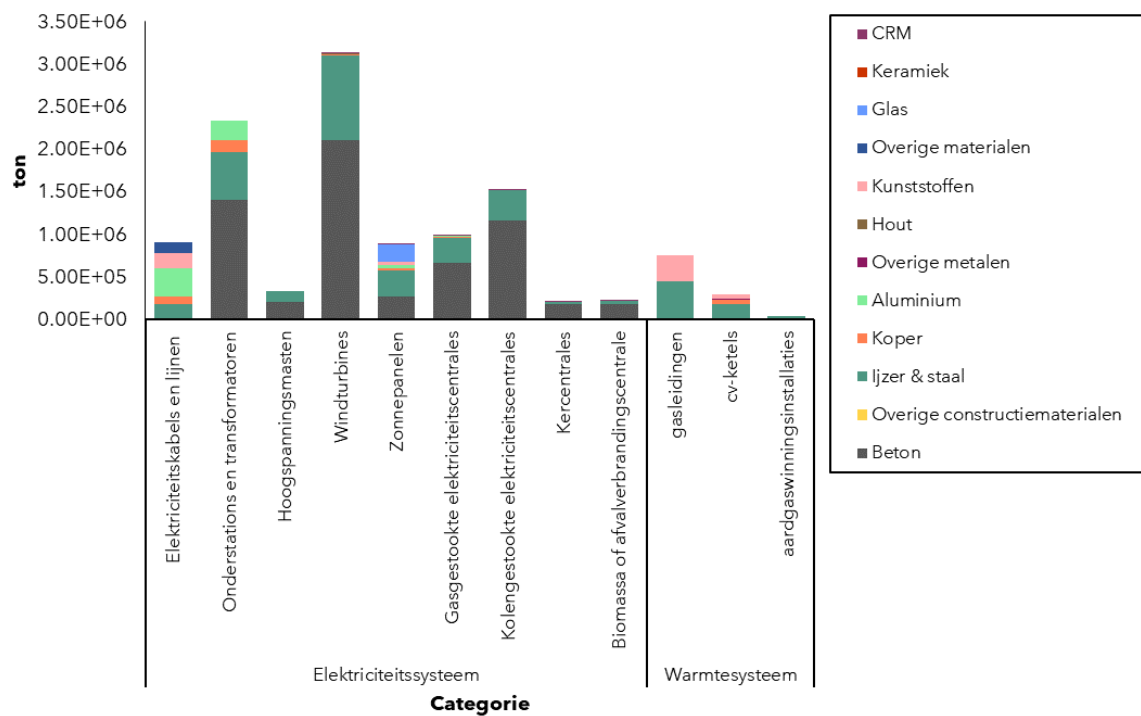
Ook de materiaalvoorraad in het energiesysteem, 12 megaton in totaal, is zeer interessant wegens de het aandeel (kritieke) metalen. Het energiesysteem is divers in materiaalsamenstelling, afhankelijk van het product. De voorraad in het elektriciteitssysteem is met een totaal van 11 megaton substantieel groter dan het warmtesysteem, wat een totale materiaalvoorraad van 1 megaton bevat.

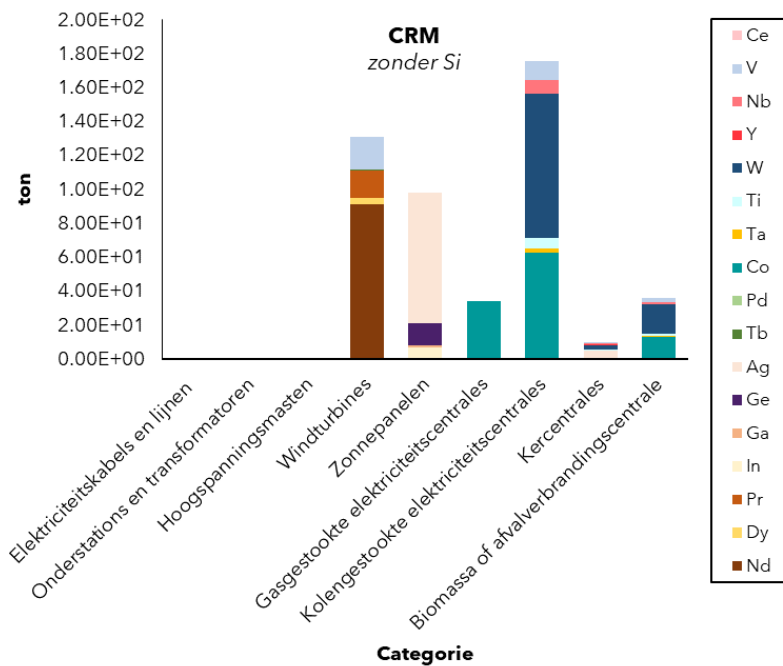
Beton is met 52% van de materiaalvoorraad het grootst in omvang (Figuur 14) en wordt voornamelijk toegepast in windturbines, onderstations en transformatoren, en kolen- en gasgestookte elektriciteitscentrales. De grootste materiaalvoorraden bevinden zich in windturbines (26%), gevolgd door onderstations en transformatoren (20%), kolencentrales (13%) en elektriciteitskabels en lijnen (10%).

In totaal bevindt zich 2,9 megaton staal en ijzer in het elektriciteitssysteem, en 0,7 megaton in het warmtesysteem. Ook de hoeveelheid koper in deze systemen is substantieel: 281 kiloton in het

elektriciteitssysteem, en 55 kiloton in het warmtesysteem. Verder bevindt zich 538 kiloton aluminium in het elektriciteitssysteem, voornamelijk in het elektriciteitskabels en lijnen. Niet kritieke legeringselementen worden veel toegepast voor elektriciteitsproductie. Verder wordt in CV-ketels messing en brons gebruikt.

De meeste kritieke grondstoffen bevinden zich in windturbines en zonnepanelen, maar ook voor fossiele elektriciteitsproductie wordt een breed scala aan kritieke grondstoffen gebruikt. In windturbines bevindt zich neodymium, dysprosium, praseodymium en terbium. Windmolens zijn het enige product waar terbium zit. Ook voor neodymium en praseodymium geldt dat het grootste gedeelte in windmolens zit, respectievelijk 67% en 80%. Zowel in zonnepanelen als in windturbines bevindt zich veel silicium, 16 kiloton in totaal, 36% van de totale silicium voorraad. Daarnaast wordt in zonnepanelen indium, gallium, germanium en zilver gebruikt. Een relatief kleine voorraad indium en zilver bevindt zich in een kerncentrale. Voor indium is het energiesysteem een relatief kleine toepassing (5%). Germanium wordt vrijwel uitsluitend in energietoepassingen gebruikt (99%). Ook voor gallium (55%) en zilver (69%) is het energiesysteem een belangrijke toepassing. Kobalt, tantalium, titanium, wolfram, yttrium, niobium, vanadium worden in fossiele elektriciteitscentrales gebruikt, en zijn relatief klein ten opzichte van voorraden in andere productcategorieën.





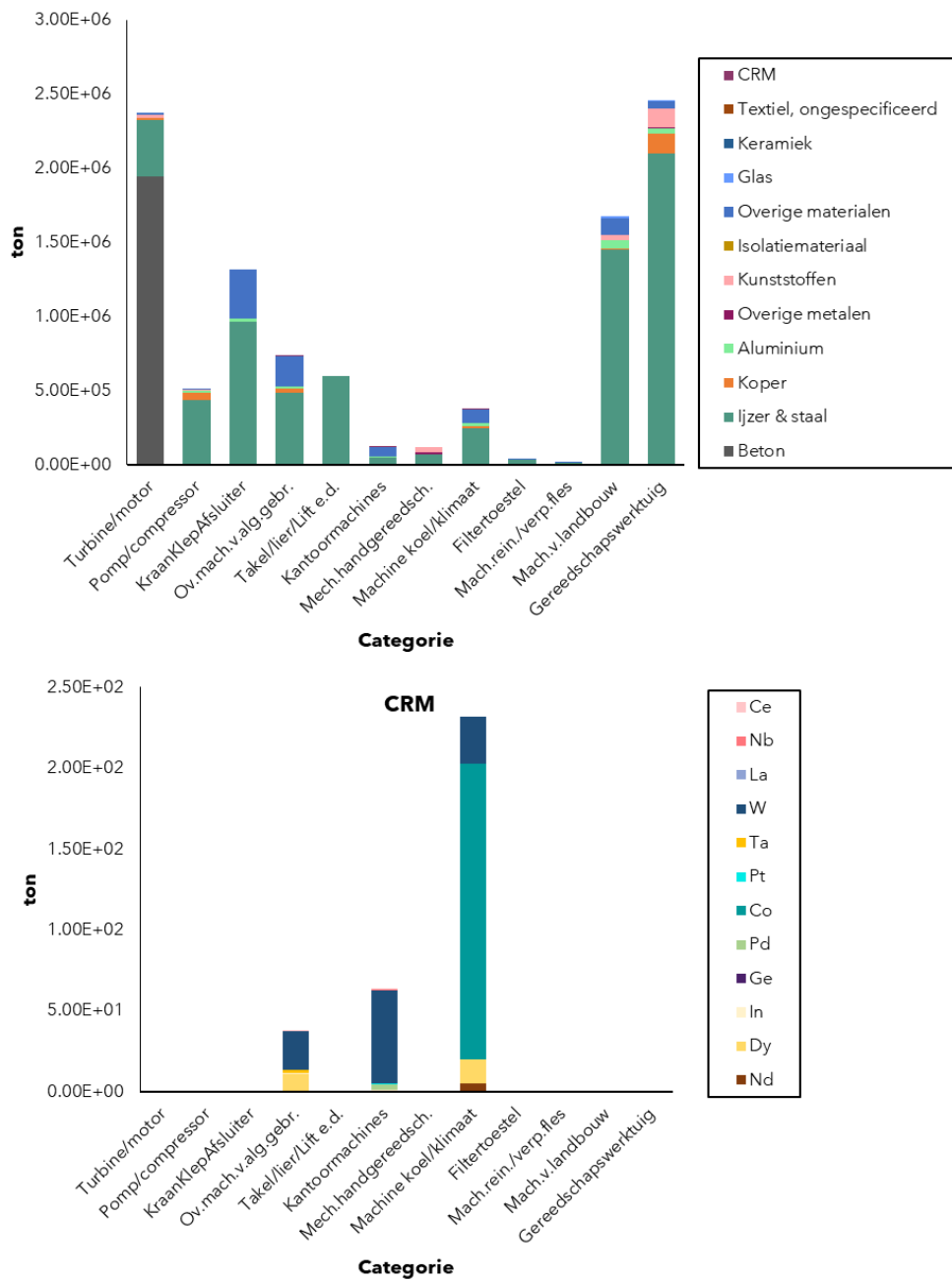
Figuur 14. Materiaalvoorraad in het energiesysteem.

Elektronische apparatuur

De materiaalvoorraad in elektronische apparatuur is met een totaal van 10 megaton vergelijkbaar in omvang als het energiesysteem. De voorraad bestaat hoofdzakelijk uit ijzer & staal (66%, in vrijwel alle productcategorieën), beton (19%, toegepast in turbines en motoren), en overige materialen (8%, in vrijwel alle productcategorieën). De grootste voorraden bevinden zich in gereedschapswerktuigen (24%), machines voor landbouw (16%), turbines en motoren (23%), en kraan-klep afsluiters (13%). Ijzer & staal binnen deze groep omvat 4% van de totale ijzer & staalvoorraad.

In elektronische apparatuur bevindt zich een substantiële hoeveelheid kritieke materialen. Zo bevindt 79% van de dysprosiumvoorraad, 75% van de palladium voorraad, 100% van de lanthanium voorraad en 29% van de wolfrام voorraad zich in elektronische apparatuur. Dysprosium bevindt zich in de categorie overige machines (42%) en in machines voor koeling en klimaat (57%). Palladium en lanthanium wordt voornamelijk in katnoormachines gebruikt. Wolfrام in zowel kantoormachines (52%), machines voor koeling en klimaat (26%) en in overige machines (22%).

Met name in machines voor koeling en klimaat, kantoormachines en overige machines bevinden zich een breed scala aan kritieke grondstoffen: neodymium, kobalt, indium, platina en wolfrام.



Figuur 15. Materiaalvoorraad in elektronische apparatuur.

Beschikbaarheid van materialen uit de stedelijke mijn

Wanneer materialen uit de stedelijke mijn beschikbaar komen voor hergebruik hangt af van de leeftijdsopbouw van de huidige voorraad en de levensduur van het betreffende product. De levensduur verschilt aanzienlijk per productcategorie. Een inschatting van de gemiddelde levensduur van de verschillende productcategorieën is gemaakt op basis van literatuur en statistieken (Tabel 1). In appendix 2 is een gedetailleerd overzicht van levensduurspecificaties per product te vinden. De levensduur van gebouwen en GWW is het hoogst, met een gemiddelde rond de 70 jaar. De verwachte productlevensduur loopt in de literatuur uiteen. Levensduren van West-Europese gebouwen worden bijvoorbeeld tussen de 71 en 220 jaar geschat (Deetman et al., 2020). Ook voor tunnels en viaducten vinden we verschillen in levensduren in de literatuur: Schmied et al. (2013) rapporteren levensduren langer dan 200 jaar, terwijl op basis van sloopfracties uit EIB & Metabolic (2022) een levensduur van ongeveer 100 jaar kan worden geschat. De gemiddelde levensduur van gemalen wordt geschat op 50 jaar (TNO, 2021), en het oudste nog gemaal dat nog in gebruik is stamt in Nederland uit 1852. Wanneer we uitgaan van hogere levensduurinschattingen, wordt de materiaaluitstroom sterker beperkt, en daarmee ook de materiaalvraag voor vervangende producten.

In deze studie gaan we uit van de levensduur zoals gerapporteerd in Tabel 1. Op basis van deze levensduren kunnen we een grove inschatting maken van de materialen die uit de stedelijke mijn beschikbaar komen voor secundaire productie of hergebruik. Hierbij is de aanname gemaakt dat de voorraad lineair over de jaren is opgebouwd. We berekenen de uitstroom binnen een decennium (Figuur 16).

Voor constructiematerialen omvat de uitstroom per decennium ongeveer 0.9 gigaton, grotendeels beton, grind, zand, grond, klei, recyclinggranulaat en industriële reststoffen. Gezien de levensduur van producten waarin het materiaal voornamelijk wordt toegepast (in gebouwen en GWW), vergelijkbaar is, is ook de verhouding tussen het vrijgekomen materiaal uit deze sectoren vergelijkbaar als met de voorraad.

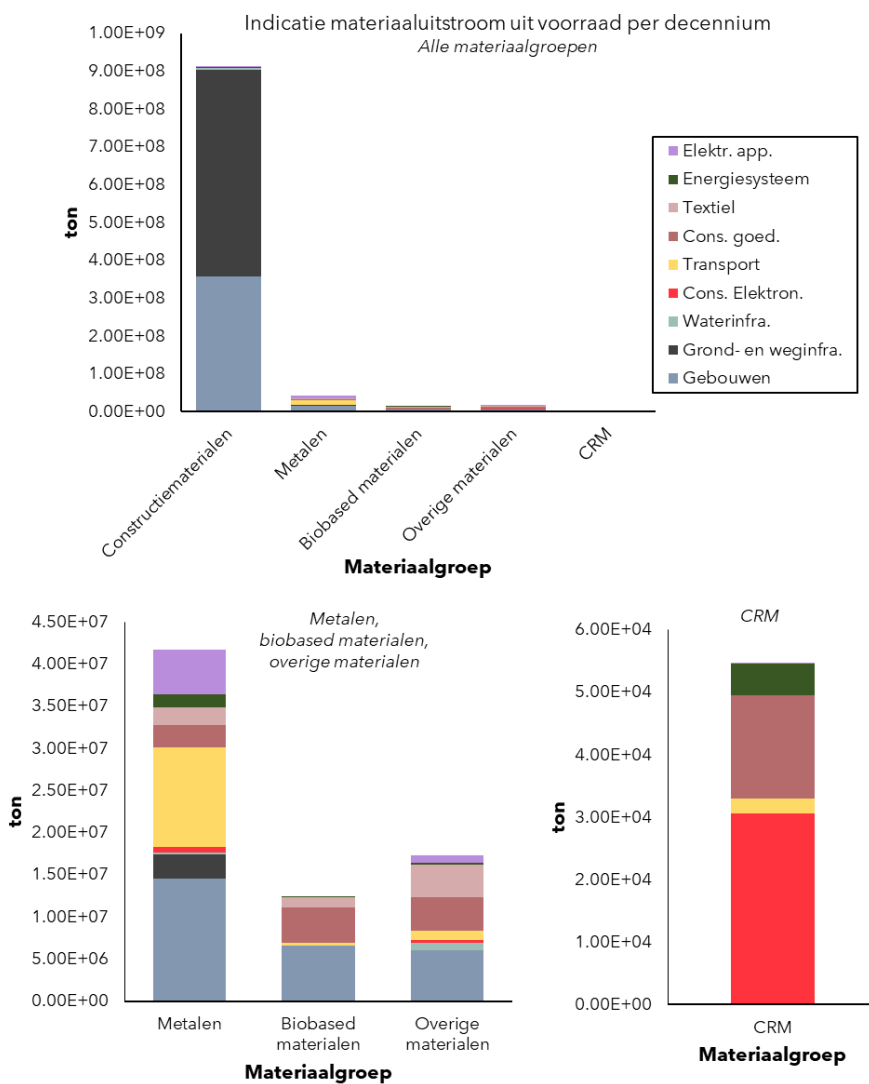
In totaal komt in 10 jaar grofweg 40 megaton aan metaal, grotendeels ijzer en staal, beschikbaar voor recycling. Alhoewel metalen in gebouwen veruit het grootste aandeel van de voorraad vormen, is de metaaluitstroom uit deze sector, door de lange levensduur, naar verhouding een stuk kleiner. Metalen in gebouwen vormen alsnog de grootste uitstroom (15 megaton), maar ook de uitstroom uit transport (12 megaton), elektrische apparatuur (5 megaton) en overige sectoren is aanzienlijk.

De uitstroom biobased materialen is geschat op 12 megaton, en overige materialen op 17 megaton. Ook voor deze materialen is het beeld aanzienlijk anders bij de uitstroom dan bij de voorraad. Alhoewel de materiaaluitstroom nog steeds aanzienlijk is bij gebouwen, is ook de uitstroom uit consumentengoederen en textiel substantieel. De korte levensduur van meubelen en kleding resulteert in een grote uitstroom van biobased materialen en kunststoffen.

De uitstroom kritieke grondstoffen omvat circa 55 kiloton in 10 jaar. De uitstroom is het grootste uit de consumentenelektronica sector (30 kiloton), gevolgd door consumentengoederen (17 kiloton). Ten opzichte van de voorraad is het aandeel kritieke grondstoffen in de uitstroom afkomstig uit het energiesysteem en transport klein. De levensduur van producten in deze sectoren is dan ook ruim twee keer zo lang dan die van consumenten elektronica en consumentengoederen.

Tabel 2. Gemiddelde levensduur per productcategorie

Product categorie	Gemiddelde levensduur
Gebouwen	71
Grond- en weginfra.	68
Waterinfra.	64
Cons. Elektron.	11
Transport	27
Cons. goed.	13
Textiel	8
Energiesysteem	32
Elektr. app.	14



Figuur 16. Geschatte uitstroom in de komende 10 jaar uit de huidige stedelijke mijn.

Discussie

Discussie resultaten

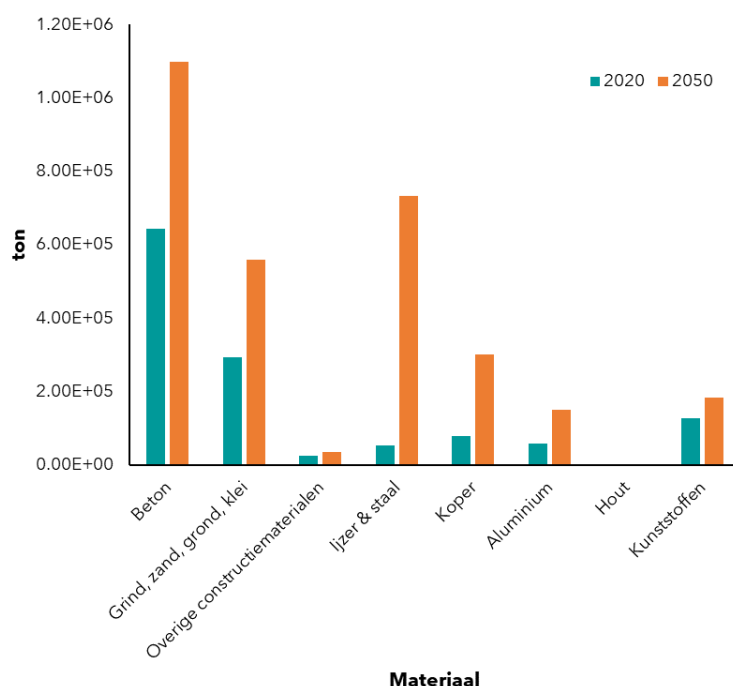
- Het overgrote deel (98%) van de *stedelijke mijn* bevindt zich grond- en weginfrastructuur en gebouwen. Deze voorraad bestaat voornamelijk uit zand, grind en klei, deels verwerkt tot baksteen, asfalt en beton. Constructiematerialen vormen 96% van de totale materiaalvoorraad.
- Alhoewel substantieel kleiner in omvang dan constructie mineralen, vormen metalen, met een totale omvang van 175 megaton, een minstens net zo relevante voorraadgroep voor een circulaire economie. De relevantie komt voort uit de milieu impact gerelateerd aan primaire productie, de goede recyclebaarheid en risico's met betrekking tot leveringszekerheid. Met name in gebouwen, weg- en waterinfrastructuur en transport bevinden zich grote hoeveelheden metalen. In andere sectoren zijn de metaalvoorraden relatief klein.
 - o Deze sectoren hebben prioriteit voor verduurzaming, i.e. efficiënt gebruik en het vergroten van metaalrecycling en hergebruik. Circulaire ontwerpstrategieën, zoals *design-for-disassembly*, kunnen hieraan bijdragen. Mogelijkheden daarvoor worden steeds vaker onderzocht voor gebouwen, maar nog nauwelijks voor infrastructuur en transport.
 - o Er zijn nog veel logistieke en technologische uitdagingen met betrekking tot inzameling en scheiding van metalen, en de recycling daarvan. Met name staal en aluminium kennen honderden, misschien zelfs duizenden legeringen die niet apart ingezameld worden. Deze worden in recyclingsprocessen vaak gemengd, waardoor de toepasbaarheid van het gerecyclede metaal laagwaardiger wordt. Informatie over het type legering ontbreekt vaak in zowel statistieken als in de praktijk.
- Kritieke grondstoffen zijn relatief klein in omvang, maar hebben een zeer hoge economische relevantie.
 - o Een breed scala aan CRM toegepast in energiesysteem, transport en elektronische apparatuur.
 - Alhoewel nu nog beperkt, zal als gevolg van klimaatverandering en de energietransitie de vraag naar windturbines, zonnepanelen, elektrisch transport en apparatuur voor koeling- en klimaatregulering naar verwachting sterk toenemen in de komende decennia. Deze producten bevatten verschillende CRM. De toelevering van deze materialen en producten kan in de toekomst kritiek worden, secundaire productie biedt dan een kans.
 - Bijvoorbeeld, uit een studie van Metabolic et al. (2020) blijkt dat de vraag in Nederland naar iridium, lithium en neodymium en dysprosium voor de energietransitie tussen 2040 en 2050 kan groeien tot meer dan 10% van de huidige mondiale productie. Ook voor metalen benodigd voor elektrische voertuigen worden de aandelen ten opzichte van de mondiale productie mogelijk kritiek (Metabolic et al., 2019).
 - Projecties voor de groei in vraag naar kritieke materialen voor airconditioning, consumentenelektronica en elektrische apparatuur ontbreken nog.

Hibernating stocks

Een substantieel deel van de voorraad bevindt zich in de grond of onder water, wat terugwinning bij *end-of-life* van het product economisch en technisch compliceert. Het gaat hierbij om elektriciteitskabels, water- en rioolleidingen, gasleidingen en warmtenetten, maar ook de fundering van gebouwen en wegen. Waar het bij gebouwen en wegen gebruikelijk is bij sloop ook de fundering te verwijderen, blijven kabels en leidingen na gebruik vaak liggen. Naar deze voorraden kan verwezen worden als winter slapende voorraden of "*hibernating stocks*". De *hibernating stocks* bevatten substantiële hoeveelheden waardevolle materialen, zoals aluminium en koper. In *hibernating* kabels, leidingen en funderingen van windturbines bevindt zich op het moment zo'n 50 kiloton aan ijzer & staal, 80 kiloton aan koper, en 60 kiloton aan aluminium. Extractie van deze materialen is vaak nog financieel onaantrekkelijk, met als gevolg een sterke groei van de voorraad als de huidige praktijk zich voortzet (grofweg in 2050 10 keer groter voor staal & ijzer, met name in offshore windturbine funderingen, en verdrievoudiging tot verviervoudiging van aluminium en koper, met name in elektriciteitskabels). Om circulariteit te bevorderen, kan worden onderzocht op welke manier deze materialen alsnog kunnen worden teruggewonnen.

Ook bij consumentenelektronica is sprake van *hibernation*; sinds 2017 werd slechts 55% van oude huishoudelijke elektrische apparaten ingeleverd (NVMP, 2019). Deze producten zijn, anders dan kabels en leidingen, direct beschikbaar voor inzameling, maar een geschikte inzamelingsinfrastructuur en stimulansen bij consumenten zijn nog onvoldoende.

Kunststoffen bevinden zich in elke sector en de voorraad is met een totaal van 14 megaton substantieel in omvang. Net als bij legeringen wordt het type kunststof niet altijd gerapporteerd, idem voor textiel. Deze informatie is belangrijk om hoogwaardige recycling te bevorderen. Een groot deel van de kunststoffen (43%) bevindt zich in de waterinfrastructuur (95% in riolering), een voorraadgroep die gevoelig is voor *hibernation*.



Beschikbaarheid van materialen uit de stedelijke mijn

Een analyse van de levensduur van de voorraden geeft een indicatie van het beschikbaar komen van de stedelijke mijn. De grootste voorraden (gebouwen en de grond-, weg- en waterinfrastructuur) hebben ook de langste levensduren, wat de in- en uitstroom van materiaal beperkt. Kleinere voorraadgroepen zoals consumentenelektronica hebben typisch een korte levensduur. Ondanks de lange levensduur is de uitstroom constructiematerialen aanzienlijk door de grote omvang van deze voorraad. Met name voor bewerkte mineralen zoals beton en asfalt zijn de impact van primaire productie hoog en is hoogwaardige secundaire productie nog een uitdaging. Voor deze materialen bestaat een goede inzamelingsinfrastructuur en de materialen worden gerecycled, maar de toepassing van het recyclaat is typisch laagwaardig. Verbetering in productontwerp en recycling-technologie zijn hier dus nog belangrijk om hoogwaardige toepassing van het recyclaat mogelijk te maken.

Wanneer we naar metalen kijken zijn naast gebouwen ook voertuigen en elektronische apparaten belangrijke sectoren. Bij kritieke grondstoffen zijn dat, naast voorgenoemde producten, ook consumenten elektronica en consumenten goederen. Deze producten hebben typisch een korte levensduur (10-20 jaar), resulterend in een grote vraag en uitstroom van materiaal. Circulair productontwerp, zodat de levensduur van het product wordt gefaciliteerd, en uiteindelijk de recycling van de materialen is juist voor deze producten belangrijk. Daarnaast zijn ook in de recyclingtechnologie nog stappen te maken. Hetzelfde geldt voor biobased materialen en kunststoffen in consumentengoederen en textiel.

In hoeverre biedt de stedelijke mijn kansen voor circulariteit?

Door aanhoudende groei van de bevolking en economie blijft ook de *stedelijke mijn* waarschijnlijk groeien, wat resulteert in een grotere materiaalinstroom dan materiaaluitstroom. Samen met huidige beperkingen in inzameling, hoogwaardige recycling technologieën, en technologische ontwikkeling wat resulteert in veranderingen in materiaalgebruik (met name *high-tech* metalen), blijft circulariteit momenteel beperkt.

Naast het verbeteren van productontwerp, logistiek, en technologie, kan systeemverandering bijdragen aan de circulaire transitie, zoals de deeleconomie, transitie naar duurzamere vervoerswijzen, en levensduurverlenging.

Recycling vindt op grote schaal plaats, met name voor constructiematerialen, maar voor laagwaardigere toepassingen. De grond- en weginfrastructuur maakt als enige sector al grootschalig gebruik van gerecycled materiaal (12% van de voorraad). Uit de studie van EIB & Metabolic (2022) volgt dat van de ingaande materiaalstroom al circa 45% al uit secundaire grondstoffen bestaat. Het gaat hierbij met name om constructiematerialen waarvan de toepassing typisch laagwaardig is, i.e. als fundering voor wegen. Hetzelfde geldt voor metalen, kunststoffen en textielwaren.

Relevantie voor beleid

In deze studie presenteren we een nagenoeg volledig overzicht van de Nederlandse *stedelijke mijn*. Informatie over de samenstelling en omvang van de stedelijke mijn kan helpen bij het prioriteren van sectoren voor verduurzaming in materiaalgebruik. Het gaat hierbij niet alleen om de grootste grondstofgebruikers, maar ook de aan het materiaal gerelateerde toeleveringsrisico's en milieu-impact van productie, en de verwachte groei van de voorraadgroep.

Deze analyse vormt een goed startpunt voor scenario analyse. De voorraadgegevens kunnen worden gekoppeld aan scenario's voor voorraadgroei, samen met verwachte levensduren van de verschillende producten. Op basis daarvan kan de in- en uitstroom worden berekend. Dergelijke

resultaten kunnen een basis vormen voor beleid met betrekking tot grondstofgebruik, inzameling van afgedankte materialen, en de verwerking daarvan.

Wanneer periodiek bijgehouden, geven de resultaten inzicht in de dynamiek van de stedelijke mijn, en aan de hand daarvan kan het circulaire economiebeleid worden geëvalueerd.

Koppeling aan milieu-impactgegevens en toeleveringsrisico is een belangrijke volgende stap, zodat de meest vervuilende en kritieke toepassingen kunnen worden geïdentificeerd.

Beperkingen van de studie & aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In deze sectie presenteren we een overzicht van de beperkingen in de huidige studie, en aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

Ten eerste ontbreken nog gedetailleerde gegevens met betrekking tot textiel, kunststoffen en legeringen. In de gebruikte statistieken worden textielsoorten niet specifiek gerapporteerd, waardoor details ontbreken over de samenstelling van de voorraad. Textiel heeft typisch een korte levensduur, resulterend in een groot volume in- en uitstroom. Om de textielsector te verduurzamen is informatie over de samenstelling belangrijk, deze ontbreken grotendeels nog.

Ook voor kunststoffen ontbreken vaak details over samenstelling. De toepassing van kunststoffen is breed, en de impact op milieu welbekend. Een betere rapportage van typen kunststoffen in de stedelijke mijn is essentieel voor het sturen van circulair beleid en bevorderen van hoogwaardige recycling.

Tot slot is onduidelijk hoe verschillende metalen zich in legeringen bevinden. Dit soort informatie is belangrijk om hoogwaardig materiaalhergebruik te bevorderen. Consistentie en detail in de rapportage is daarom belangrijk; dit moet nog worden verbeterd. Productinformatie van producenten en de introductie van een materiaalpaspoort kan hierbij helpen.

Op een aantal plekken ontstaan mogelijk dubbeltellingen:

- De productgroep grote apparatuur in de categorie consumentenelektronica omvat onder andere zonnepanelen (alleen particulier), terwijl deze ook in de productgroep energieproductie wordt gerapporteerd. Ook is er een mogelijke overlap tussen turbines, motoren en pompen in de productcategorieën elektronische machines en energieproductie. Constructie mineralen (windturbines), metalen en kritieke grondstoffen (windturbines en zonnepanelen) vormen voor windturbines en zonnepanelen de belangrijkste materialen. Voor constructie mineralen, ijzer & staal maakt dit nauwelijks verschil op het eindresultaat, omdat het overgrote deel van deze materialen zich in gebouwen en GWW bevindt. Ook voor aluminium, koper, en kritieke materialen verwachten we geen grote verschillen door dubbeltellingen, omdat de inventarisatie in de categorie energieproductie completer is en de betreffende materiaalvoorraden een stuk groter zijn.
- Op materiaalniveau rapporteren we zowel staal inclusief legeringselementen, als legeringselementen los. We verwachten niet dat dit grote consequenties heeft voor het eindresultaat omdat de kritieke metalen in de legeringen vele malen kleiner zijn in massa dan de hoeveelheid ijzer en andere niet kritieke legeringselementen zoals koolstof en nikkel. Voor producten waarin zich kritieke grondstoffen bevinden, zijn meestal de elementen ook los gerapporteerd, waardoor een redelijk beeld ontstaat van de voorraadomvang van deze elementen.

Deze dubbeltellingen konden in de huidige rapportage niet worden voorkomen, omdat ze deel uitmaken van een grotere productgroep. Verdere uitsplitsing van de categorieën

consumentenelektronica, en turbines, motoren en pompen, en uitsplitsing van legeringen op elementniveau is nodig om de accuraatheid van de analyse te vergroten.

De relevantie van de voorraadanalyse kan verder worden vergroot door het toevoegen van een ruimtelijke component. Dit maakt aggregatie van de resultaten mogelijk naar verschillende beleidsniveaus, en geeft informatie over locatie waar materialen beschikbaar komen voor extractie uit de stedelijke mijn, wat de logistiek rondom materiaalhergebruik kan bevorderen. Ook kan locatie van invloed zijn op de voorraaddynamiek, bijvoorbeeld het effect van verstedelijking op de bouwvoorraad (van Oorschot et al., 2022). Met name voor stationaire producten zoals infrastructuur en gebouwen zijn ruimtelijke gegevens vaak beschikbaar, maar waarschijnlijk is het toevoegen van een ruimtelijke component ook mogelijk voor mobiele voorraden (i.e. consumentengoederen, transportmiddelen), door koppeling aan eigenaarschap.

De materialisatie van de voorraden is gedaan op basis van verschillende statistische bronnen, ruimtelijke datasets en materiaalgegevens uit de industrie en literatuur. Om de stedelijke mijn periodiek te kunnen updaten, is het belangrijk dat de aanpak en databronnen worden geharmoniseerd, bijvoorbeeld in de vorm van een materialen monitor, geleid door het CBS.

Referenties

CBS (2020). Materiaalmonitor 2010, 2016, 2018. <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2021/03/materiaalmonitor-2010-2016-en-2018>

CBS (2022). Voorraden project, conversie naar materialen.

Deetman, S., Marinova, S., van der Voet, E., van Vuuren, D. P., Edelenbosch, O., & Heijungs, R. (2020). Modelling global material stocks and flows for residential and service sector buildings towards 2050. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118658.

EIB & Metabolic (2022). Materiaalstromen in de bouw & infra. <https://www.eib.nl/publicaties/materiaalstromen-in-de-bouw-en-infra/>

Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., ... & Haberl, H. (2017). Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(8), 1880-1885.

Metabolic, Copper8 & Universiteit Leiden (2019). Metaalvraag van elektrisch vervoer.

Metabolic, Copper8 & Universiteit Leiden (2020). Metal demand for renewable electricity generation in the Netherlands.

Oorschot, J. van, B. Roelofs, J. van der Horst & E. van der Voet (2021). Dynamiek van de voorraden in het elektriciteitssysteem: scenario's voor in- en uitstromen tot 2050. CML Universiteit Leiden.

Oorschot, J. van, E. van der Voet, V. van Straalen, V.S.C. Tunn & R. Delahaye (2021). Voorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie deel II, CML / CBS.

Oorschot, J. van, J. van der Zaag, E. van der Voet, V. van Straalen & R. Delahaye (2020). Voorraden in de maatschappij; de grondstoffenbasis voor een circulaire economie. Geraadpleegd van: <https://www.universiteitleiden.nl/nieuws/2020/01/de-stad-als-urban-mine>

Pieters, L. I. (2021). Towards a Circular Economy: Material Changes in the Dutch Railway Infrastructure until 2050. Universiteit Leiden & Technische Universiteit Delft.

Schmied, M., M. Mottschall, and A. Löchter. 2013. *Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland*. Berlin: Öko-Institut - Institute for Applied Ecology. <https://www.oeko.de/oekodoc/1852/2013-520-de.pdf>. Accessed December 4, 2020.

TNO (2021). Instandhouding civiele infrastructuur. Proeve van landelijk prognoserapport vervanging en renovatie. Delft.

Van der Bent, E. (2021). Urban mining for a circular economy: A dynamic material flow analysis of the stedelijke mijn of the Dutch water cycle infrastructure. Universiteit Leiden & Technische Universiteit Delft.

Van der Zaag, J. (2020). Material stocks and flows in the circular economy: a prospective material flow analysis for vehicles in the Netherlands for 2000-2050. Universiteit Leiden & Technische Universiteit Delft. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A7dfc5c37-8200-47dc-b413-a8be3b03d140>

Verhagen, J., Pieters, L., van der Voet, V., van Straalen, V. & Tunn, V. (2022). Voorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie; met case studies op het gebied van het gassysteem, de spoorinfrastructuur en consumentengoederen. Universiteit Leiden, centrum voor Milieuwetenschappen. Centraal Bureau voor de Statistiek. Februari 2022.

Appendix 1

Sector	Product
Gebouwen	Vrijstaand huis
	Seriele woning
	Appartement
	Winkel
	Industrie
	Kantoor
Wegeninfrastructuur	Service
	Bruggen
	Gemalen
	Niet-asfaltverharding
	Riolering
	Sluizen
	Wegen
	Spoor
	Tunnels
	Viaducten
Water infrastructuur	Kustverdediging
	Gemalen
Water infrastructuur	Waterproductielocaties
	Waterleidingen
Consumentenelektronica	Apparatuur voor temperatuuruitwisseling
	Schermen, monitoren en apparatuur met schermen
	Lampen
	Grote apparatuur
	Kleine apparatuur
Transport	Kleine IT- en telecommunicatieapparatuur
	Vliegtuigen
	(motor) fietsen
	Schepen
	Trein
	Autos, vrachtwagens, bussen
Consumenten goederen	HHVerwKook(nt-elek)
	Zitmeubelen
	Bedrijfsmeubelen
	Keukenmeubelen
	Matrassen
	Slaapkamermeubel.
	Overige meubelen
	Sieraden/munten
	Muziekinstrum.
	Sportartik.&-mater.
	Spel/speelgoed
	Bril/contactlenzen
	Medische instrum/app
	Teken-/schrijffartik.
Ov.artieklen neg	
Textiel	Weefsels
	Beddengoed
	Woningtextiel
	Tapijten
	Textielvlies
	Overige textielwaren
	Werkkleding
	Bovenkleding
	Onderkleding
	Overige kleding
Elektriciteitssysteem	Elektriciteitskabels en lijnen
	Onderstations en transformatoren
	Hoogspanningsmasten
	Windturbines
	Zonnepanelen
	Gasgestookte elektriciteitscentrales
	Kolengestookte elektriciteitscentrales
	Kercentrales
	Biomassa of afvalverbrandingscentrale
	Waterstof elektriciteitscentrale
Energieopslagsystemen	
Warmtesysteem	CV
	Gaslijdingen
	Gasproductiefaciliteit
Elektronische apparatuur	Turbine/motor
	Pomp/compressor
	KraanKlepAfsluit
	Ov.mach.v.alg.gebr.
	Takel/lief/Lift
	Machine koel/klimaat
	Kantoomachines
	Mech.handgereedsch
	Filtertoestel
	Mach.v.landbouw
Gereedschapswerktuig	
Mach.rein./verp.fles	

Tabel A1 laat de verschillende productcategorieën zien die zijn onderscheiden in deze studie. Ook wordt het jaar van de voorraadinventarisatie vermeld, en de eenheid. Voorraden zijn geïnventariseerd tussen 2017 en 2020, afhankelijk van de jaar van uitvoering, en de beschikbare gegevens.

Appendix 2

Excel bestand: Materiaalvoorraden_Nederland.xlsx (apart bijgeleverd)

