



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Scenario's voor materiaalvoorraden en stromen in gebouwen: update recycling, aanvulling milieu-impact & uitbreiding naar verbouwwerkzaamheden

Oorschot, J. van; Voet, E. van der

Citation

Oorschot, J. van, & Voet, E. van der. (2023). *Scenario's voor materiaalvoorraden en stromen in gebouwen: update recycling, aanvulling milieu-impact & uitbreiding naar verbouwwerkzaamheden*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3714651>

Version: Publisher's Version

License: [Creative Commons CC BY 4.0 license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3714651>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

The background of the cover is a photograph of a wall in a state of significant disrepair. The upper portion of the wall has a light-colored, possibly white or off-white, paint that is heavily peeling and flaking, revealing a darker, textured surface underneath. The lower portion of the wall features a grid of square tiles, likely made of ceramic or stone. These tiles are also in poor condition, with many missing, cracked, or partially detached, showing a rough, uneven surface. The overall color palette is muted, consisting of various shades of beige, tan, and brown, which gives the image a gritty, historical, or perhaps industrial feel. The lighting appears somewhat uneven, with brighter areas where the paint is still intact and darker, shadowed areas in the crevices and missing tile sections.

Scenario's voor materiaalvoorraden en stromen in gebouwen

Update recycling, aanvulling milieu-impact &
uitbreiding naar verbouwwerkzaamheden

Janneke van Oorschot
Ester van der Voet

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>.



Monitoring en Sturing Circulaire Economie

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	2
1. Introductie	4
2. Methode	5
2.1. Recycling van de materiaaluitstroom	5
2.2. Milieu-impact gerelateerd aan nieuwbouw & verbouw (2018-2050).....	5
2.2.1. Methode 2023: Korte toelichting van beoogde aanpak	6
2.2.2. Methode 2022: Eerste inventarisatie materiaalintensiteiten verbouwwerkzaamheden & scenario's voor materiaalstromen door gebouwverduurzaming	7
3. Resultaten & Discussie	11
3.1. Materiaalvraag en aanbod uit de stedelijke mijn	11
3.1.1. Gevoeligheidsanalyse	12
3.2. Milieu-impact gerelateerd aan nieuwbouw (2018-2050)	12
3.3. Materiaalvraag gerelateerd aan verbouwwerkzaamheden	14
3.3.1. Materiaalvraag gerelateerd aan verduurzaming gebouwen	14
3.3.2. Inventarisatie data gebouw-transformatie en uitbouw	18
3. Conclusie & aanbevelingen.....	21
4. Referenties	22

1. Introductie

Afgelopen jaar zijn door het CML, Metabolic en het PBL scenario's uitgewerkt voor de materiaalvoorraad en de materiaalstromen gerelateerd aan nieuwbouw en sloop tussen 2018 en 2050. Met de gebruikte methodiek is het mogelijk om het effect van verstedelijking en bouw strategieën op de materiaalinstroom en uitstroom in kaart te brengen, en kansen voor het sluiten van materiaalkringlopen. In dit werk geven we een update voor de recycling van de materiaaluitstroom, en bereken we de milieu impact gerelateerd aan materiaalproductie. We berekenen de impact van materiaalextractie tot en met materiaalproductie, voor zowel primaire productie als secundaire productie. Voor secundaire productie berekenen we de impact vanaf ontmanteling van het gebouw.

Niet alleen bij nieuwbouw en sloop, maar ook bij komen significante hoeveelheden materialen vrij bij herstel- en verbouwwerkzaamheden (EIB & Metabolic, 2022; Lederer et al., 2021). Deze zijn in de voorgaande studie nog niet in kaart gebracht. In deze studie doen we een eerste aanzet tot het in kaart brengen van de aan verbouwwerkzaamheden gerelateerde materiaalstromen. We focussen ons daarbij op energierenovatie. Doel is om de analyse volgend jaar in meer detail uit te werken en uit te breiden naar andere verbouwwerkzaamheden (e.g. transformatie, uitbouw en overige renovatie) en te integreren in de Ruimtescanner van PBL. Naast de materiaalvraag analyseren we welke materialen beschikbaar komen uit het gas-gebaseerde warmtesysteem, en berekenen we de milieu impact gerelateerd aan de productie van materialen voor energierenovatie. Tot slot kijken we naar beschikbare databronnen voor een inventarisatie van materiaalstromen voor gebouw-transformatie, uitbouw en overige renovatie.

2. Methode

2.1. Recycling van de materiaaluitstroom

Afgelopen jaar maakten we een eerste inschatting van de herbruikbaarheid van sloopmateriaal voor nieuwbouw. Hierbij analyseerde we drie verstedelijkingsscenario's (Dichtbij, Verbonden en Ruim), samen met drie bouwstrategieën (Conventioneel, Biobased en Circulair). We verwijzen naar van Oorschot et al. (2022) voor een gedetailleerdere toelichting van de scenario's en methodiek. De recyclinggegevens zijn in dit werk verder verfijnd, waarbij we een onderscheid maken tussen end-of-life recyclingpercentage en maximum secundair aandeel in de instroom.

We berekenen welk aandeel van de sloop (demolition, D), per materiaal (m) kan worden hergebruikt voor nieuwbouw. Alleen hoogwaardige recycling is overwogen, verwijzend naar de productie van secundair materiaal dat kan worden gebruikt voor een vergelijkbare toepassing als de primaire toepassing. Hergebruik op componentniveau is niet overwogen, omdat materialen die tussen 2018 en 2050 beschikbaar komen uit de stedelijke mijn afkomstig zijn van gebouwen die niet circulair zijn ontworpen. End-of-life recycling rate (EoL-RR) verwijst naar het aandeel van de sloopstroom dat wordt gerecycled. Recycled Content (RC) verwijst naar het aandeel secundair materiaal in het aanbod, en Maximaal Recycled Content (MRC) verwijst naar de maximaal aanvaardbare RC: vanwege technische of institutionele redenen kan dit vaak geen 100% zijn. EoL-RR, RC en MRC zijn gebaseerd op literatuur en huidige praktijken in de Nederlandse of Europese recyclingindustrie (Tabel 1). Indien de potentieel te recycleren fractie van de sloopstroom groter is dan het maximale aandeel secundaire materialen in de instroom, kan een deel van het sloopmateriaal niet hergebruikt worden binnen de bouwsector. Wanneer de hoeveelheid gerecycled sloopmateriaal kleiner is dan het maximale aandeel secundair materiaal in de instroom, kan al het secundaire materiaal worden hergebruikt (vergelijking 1 en 2):

$$\text{if } EoLRR_m * D_m \geq I_m * MRC_m : R_m = I_m * MRC_m \quad (1)$$

$$\text{if } EoLRR_m * D_m < MRC_m : R_m = D_m * EoLRR_m \quad (2)$$

R_m presenteert de gerecyclede secundaire materiaalstroom.

In een gevoeligheidsanalyse analyseren we hoe het aandeel secundair materiaal verandert wanneer we huidige EoL-RR toepassen in plaats van best practice EoL-RR. De huidige EoL-RR is gebaseerd op de huidige praktijk in Nederland en Europa, terwijl de best practice EoL-RR het huidige maximum presenteert. Om de limieten in gerecycleerde inhoud te onderzoeken, beoordelen we ook hoe de resultaten veranderen bij het toepassen van een 100% EoL-RR.

2.2. Milieu-impact gerelateerd aan nieuwbouw & verbouw (2018-2050)

We berekenen broeikasgas (BKG) emissies gerelateerd aan materiaalproductie op basis van de levenscyclusinventarisatie (LCI) database Ecolnvent versie 3.6 (Wernet et al., 2016) en vullen de dataset waar nodig aan met waarden uit wetenschappelijke literatuur (zie de Appendix B voor een overzicht). Voor de productie van primaire materialen berekenen we de impact van materiaalextractie tot de materiaalproductie. Voor secundaire materiaalproductie berekenen we de BKG-emissies voor sloop van gebouwen, materiaaltransport, recycling en secundaire materiaalproductie.

Voor de aan energierenovatie gerelateerde BKG emissies nemen we aan dat alle materialen primair zijn geproduceerd. Ter vergelijking leggen we de BKG emissies voor energierenovatie

naast die voor nieuwbouw, waarbij we bij de nieuwbouw voor de vergelijking ook uitgaan van 100% primaire productie.

Naast de uitstoot van broeikasgassen berekenen we het benodigde landgebruik voor houtproductie. Landgebruik voor andere materialen wordt niet beoordeeld vanwege hun relatief kleine impact. We gebruiken Ecolnvent achtergronddocumentatie voor de opbrengst en productietijd in m³ per m² voor zacht- en hardhout. Verliezen in de toeleveringsketen (bijv. houtkap, zagen, drogen, schaven) zijn gebaseerd op de productieprocessen in Ecolnvent versie 3.6 (Wernet et al., 2016).

Tabel 1. End-of-life recycling rate (EoL-RR) per materiaal voor de huidige situatie, de huidige best-practice en voor 100% RR, en maximum secundair aandeel (maximum recycled content, MRC).

Materiaal	EOL recycling rate (huidig)	EOL recycling rate (best practice)	EOL recycling rate (100%)	Maximum recycled content	Bron
Beton	0.29	0.45	1.00	0.37	Betonakkoord (2018), Zhang (2021, chapter 2), Verhagen et al. (2021)
Baksteen	0.01	0.95	1.00	0.25	KNB (n.d.), KNB (2022), Verhagen et al. (2021), BDA (2014)
Overige constructiematerialen	0.29	0.45	1.00	0.37	See Concrete
Staal & ijzer	0.90	0.95	1.00	1.00	EuRIC (2018a), Bouwen met Staal (n.d.), Verhagen et al. (2021), Bowyer et al. (2015)
PUR	0.00	0.00	1.00	0.00	Wiprachtiger et al. (2020)
XPS	0.00	0.00	1.00	0.00	Wiprachtiger et al. (2020)
EPS	0.01	0.68	1.00	0.12	Wiprachtiger et al. (2020), EPS Industry Alliance (2016)
Glaswol	0.02	0.68	1.00	0.80	Wiprachtiger et al. (2020), Isover (2018)
Steenwol	0.02	0.68	1.00	0.50	Wiprachtiger et al. (2020), Bouwfisica (2018) & Rockwool (n.d.)
Houtvezel isolatie	0.01	0.68	1.00	0.80	Wiprachtiger et al. (2020)
Keramik	0.01	0.95	1.00	0.25	See Brick
Glas naar glas	0.07	0.95	1.00	0.93	Vlakglas Recycling Nederland (2020) & Verhagen et al. (2021)
Glas naar glaswol	0.41	0.95	0.00	0.77	Vlakglas Recycling Nederland (2020), ISOVER St. Gobain (2018) & Verhagen et al. (2021)
Houten plank naar plaat	0.24	0.95	1.00	1.00	Mehr et al. (2018) & Verhagen et al. (2021)
Houten plaat naar houtvezelplaat	0.76	0.95	1.00	1.00	Mehr et al. (2018) & Verhagen et al. (2021)
Overig	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	Metabolic (2021)
Kunststoffen	0.25	0.90	1.00	0.50	EuRIC (2018b) & ASBP (2021), Verhagen et al. (2021)
Aluminium	0.90	0.95	1.00	1.00	EuRIC (2018a)
Koper	0.80	0.95	1.00	1.00	EuRIC (2018a)
Overige metalen	0.90	0.95	1.00	1.00	See steel & iron
Overige biobased materialen	0.50	0.95	1.00	1.00	See wood

2.2.1. Methode 2023: Korte toelichting van beoogde aanpak

In een voorgaande studie keken we naar het effect van verstedelijking, bevolkingsgroei en bouwstrategie op nieuwbouw en sloop activiteiten tussen 2018 en 2050. In de opvolger van het model willen we het effect van renovatie meenemen omdat deze activiteiten naar verwachting aanzienlijke materiaalstromen met zich mee brengen. Daarnaast kan renovatie gezien worden als een circulariteitsstrategie (slow the sloop) wegens levensduurverlenging van het gebouw. Beleidsopties kunnen vervolgens worden vergeleken: is sturing op grootschalige gebouwvervanging wenselijk vanuit CE perspectief, of kunnen we beter inzetten op grootschalig renoveren van de huidige bouwvoorraad?

We onderscheiden, naast bouw- en sloopactiviteiten 4 typen verbouwwerkzaamheden. Ten eerste resulteert de verduurzaming van de bouwvoorraad in significante materiaalstromen als gevolg

van **energierenovatie**. Het gaat hierbij om toevoeging van isolatiemateriaal en dubbel glas, en een transitie naar duurzame warmtevoorziening ((hybride) warmtepomp of warmtenet).

Naast energierenovatie zijn er tal aan andere **herstel- en verbouwwerkzaamheden**. Deze werkzaamheden zijn divers van aard, denk aan restauraties aan gevel en dak, verplaatsen van muren binnen het pand, vernieuwing van keukens of badkamer, of structurele renovaties zoals vervanging van draagbalken of de fundering. De materiaalintensiteit van deze activiteiten zijn, evenmin als de frequentie van deze werkzaamheden, nog niet in kaart gebracht.

Ook de **transformatie** van gebouwen resulteert in materiaalstromen, bijvoorbeeld van kantoor naar woningen. Uit cijfers van het CBS blijkt dat in 2018 en 2019 meer dan 12.000 woningfuncties per jaar zijn ontstaan uit gebouwen met een oorspronkelijk niet-residentiele functie (CBS, 2020). Scenario's voor de hoeveelheid transformaties tussen 2018 en 2050 zijn nog niet gemaakt.

Tot slot zijn materialen nodig bij **uitbreiding** van gebouwen, i.e. opbouw of uitbouw. Hier is vooral de materiaalinstroom relevant. Scenario's voor de hoeveelheid en het type uitbreidingen van gebouwen zijn nog niet gemaakt, en de materiaalintensiteit van dergelijke werkzaamheden is nog onbekend.

De voorgenoemde activiteiten leiden tot levensduurverlenging van gebouwen, en daarmee de vermindering van bouw- en sloopactiviteiten. Deze dynamiek moet nog worden opgenomen in de Ruimtescanner.

2.2.2. Methode 2022: Eerste inventarisatie materiaalintensiteiten verbouwwerkzaamheden & scenario's voor materiaalstromen door gebouwverduurzaming

In een eerste exercitie inventariseren we de materiaalvraag tussen 2018 en 2050 gerelateerd aan verduurzaming van gebouwen (energierenovatie). Daarnaast bestuderen we databronnen voor het materiaalstromen door gebouwtransformatie en gebouwextensie (uitbouw en opbouw). Koppeling van deze intensiteiten aan de omvang van deze activiteiten tussen 2018 en 2050 is nog niet mogelijk, omdat dit samenhangt met de hoeveelheid sloop en nieuwbouw en daarom aanpassingen in de Ruimtescanner behoeft (op de agenda voor 2023).

Isolatie

Recent zijn studies uitgevoerd naar de materiaalstromen gerelateerd aan energierenovatie van representatieve gebouwen (Lederer et al., 2020, 2021, Zhang et al., 2021). Dit biedt aanknopingspunten voor het materialiseren van verduurzamingsmaatregelen. Koppeling van deze gegevens aan de te verduurzamen gebouwvoorraad geeft inzicht in de gerelateerde materiaalomvang.

Als startpunt worden de bouw- en sloop scenario's uit de Ruimtescanner (RS) genomen. In het RS model wordt op basis van de gebouwvoorraad en landgebruik in 2018 en de groei in huishoudens tussen 2018 en 2050 (op basis van de WLO scenario's) de bouw, sloop en gebouwvoorraad in 2050 ruimtelijk gemodelleerd. Als gevolg van de Bijna-Energie-Neutrale-Gebouwen (BENG) norm die geldt voor alle nieuwbouw kunnen we aannemen dat gebouwen gebouwd tussen 2018 en 2050 geen verduurzamingsrenovatie behoeven. Deze gebouwen zijn goed geïsoleerd en beschikken over een warmtepomp (van Oorschot et al., 2022). Aangenomen is dat het restant van de gebouwvoorraad uit 2018 (niet gesloopte gebouwvoorraad tussen 2018 en 2050) met een slechte energieprestatie (energielabel $\leq D$) wordt gerenoveerd voor verduurzaming. Voor de energieprestatie van de huidige gebouwvoorraad maken we gebruik van statistieken van het RVO (<https://energiecijfers.databank.nl/dashboard/dashboard/energielabels>). Het RVO definieert per

gebouwtype het aantal eenheden per energielabel. Voor een deel van de gebouwvoorraad (grootweg 50%) is echter geen energielabel bekend. We nemen aan dat de cijfers een representatief beeld geven van de gehele gebouwvoorraad en berekenen per gebouwtype het percentage met een bepaald energielabel (Tabel 2). We maken daarbij een onderscheid tussen energielabel A of hoger, B, C, D, E, F en G. Omdat energiegegevens ontbreken voor industrie, en we aannemen dat grote industriële ruimtes geen warmtesysteem behoeven, is dit gebouwtype niet meegenomen in deze studie.

Het aandeel per energielabel vermenigvuldigen we met het totale gebruiksoppervlakte per gebouwtype in 2018. Vervolgens kijken we per scenario naar de gesloopte gebruiksoppervlakte tussen 2018 en 2050. We maken de volgende aanname: gebouwen met het laagste energielabel (G) hebben prioriteit bij sloop. Wanneer de sloopopgave groter is dan de huidige voorraad met energielabel G (voor het betreffende gebouwtype), volgen gebouwen met energielabel F, enzovoort¹.

Van de overgebleven voorraad (voorraad 2018 min sloop tussen 2018 en 2050), is aangenomen dat alle gebouwen met energielabel D of lager worden verduurzaamd. Verduurzaming heeft hier betrekking op isolerende maatregelen (gevel- en dakisolatie, en dubbel glas). Verduurzaming van de warmtevoorziening bespreken we in het volgende hoofdstuk. De materiaalintensiteiten van de isolerende maatregelen zijn gebaseerd op een studie van Lederer et al. (2020). Voor woningen wordt hierbij de intensiteit in kilogram per vierkante meter gebruiksoppervlak gehanteerd. Voor overige gebouwen wordt de intensiteit in kilogram per kubieke meter gebouwwolume tot aan de dakrand gerapporteerd. Omdat in onze studie de waarden berekend zijn per vierkante meter gebruiksoppervlakte, moeten de referentiewaarde voor overige gebouwen nog worden omgerekend naar volume. Hiertoe vermenigvuldigen we het totale gebruiksoppervlakte met 3, omdat dit een gebruikelijke etagehoogte is.

Het totale oppervlakte van woningen en volume niet-woningen met energielabel D of lager is vervolgens vermenigvuldigd met de materiaalintensiteiten van Lederer et al. (2020). 3 materialen zijn onderscheiden: glas, isolatie wol en polystyreen (Tabel 3).

Tabel 2. Indicatie van het huidige aandeel gebruiksfunctie in vierkante meters gebruiksoppervlak naar energielabel op basis van RVO (2022). Gegevens ontbreken voor industrie.

	A of hoger	B	C	D	E	F	G
Vrijstaand	22%	16%	22%	13%	8%	9%	11%
Serieel	22%	15%	33%	14%	8%	4%	3%
Appartement	23%	18%	26%	16%	9%	4%	3%
Kantoor	32%	12%	17%	11%	7%	6%	15%
winkel	56%	11%	12%	7%	5%	3%	6%
services	39%	10%	13%	9%	10%	5%	15%

¹ We zijn ons ervan bewust dat dit een simplistische aanname is. In werkelijkheid zal een deel van de gebouwen met een laag energielabel niet worden gesloopt omdat het een historische waarde heeft. Dit soort uitzonderingen worden meegenomen in de Ruimtescanner. Echter, informatie op gebouwniveau (bouwjaar, energielabel) verdwijnt in de output van het model (100 x 100 meter resolutie). Omdat we op dit moment alleen beschikken over de output van het ("oude") model, is het in deze exercitie nog niet gelukt om een betere integratie van de gebouwverduurzaming met de Ruimtescanner te maken. We gebruiken daarom een versimpelde benadering. Integratie van verbouwwerkzaamheden met de Ruimtescanner staat op de agenda voor 2023.

Tabel 3. Materiaalintensiteiten voor energierenovatie in kg per m² gebruiksoppervlak (woningen) en kg per m³ (niet woning) gebouw, specifiek per bouwjaar, uit Lederer et al. (2020). Uitstroom is aangenomen als nul.

		$MI_{input, GVeaves}$ (kg/m ² NFA _{conditio} n)	$MI_{input, GVeaves}$ (kg/m ³)		
Material	Building year	residential	service	industrial	other
Glass	1800-1918 renovated	10.44726	0.690634	0.999639	0.85452
	1919-1945 renovated	7.159774	0.690634	0.999639	0.85452
	1946-1980 renovated	6.677576	0.690634	0.999639	0.85452
Mineral wool	1800-1918 renovated	3.867848	0.435121	0.110422	0.34709
	1919-1945 renovated	2.650735	0.435121	0.110422	0.34709
	1946-1980 renovated	2.472213	0.435121	0.110422	0.34709
Polystyrene	1800-1918 renovated	7.977276	0.8	0.906744	1.100702
	1919-1945 renovated	5.467031	0.8	0.906744	1.100702
	1946-1980 renovated	5.098836	0.8	0.906744	1.100702

Warmtesysteem

De berekening van de materiaalvraag gerelateerd aan de warmtetransitie komt grotendeels overeen met de studie van Verhagen et al. (2022, Nederlandse rapportage in voorbereiding voor PBL). Echter zit er een verschil in de berekening van de gebouwomvang die een nieuw warmtesysteem krijgt. Daarvoor maken wij gebruik van onze voorgaande studie. Deze is met behulp van de ruimtescanner is vervaardigd en daarbij is aangenomen dat alle nieuwbouw voorzien is van een warmtepomp (van Oorschot et al., 2022). Daarnaast nemen breiden we de analyse van Verhagen et al. (2022) uit naar utiliteitsgebouwen. We verwijzen naar Verhagen et al. (2022) voor een uitgebreide toelichting van de warmtetechnieken en scenario's voor implementatie van de verschillende technologieën.

Bij nieuwbouw is dus aangenomen dat een warmtepomp wordt geïnstalleerd. Deze materialen zijn al meegenomen in de studie afgelopen jaar. In het restant aan woningen uit 2018 (voorraad die niet wordt gesloopt) bevindt zich voor een groot deel nog een gas-gebaseerd warmtesysteem. Deze dienen voor 2050 te worden vervangen met een duurzamer alternatief: aansluiting op een warmtenet, of een (hybride) warmtepomp. Voor het aandeel gebouwen dat al over één van voorgenoemde warmtevoorzieningen beschikt kunnen we gebruik maken van statistieken van het CBS (2022). Hieruit blijkt dat ruim 67 duizend woningen in 2018 beschikten over een warmtepomp. Voor utiliteitsgebouwen is dit ongeveer 46 duizend. Ook voor het aandeel gebouwen dat is aangesloten op warmtenetten is data beschikbaar. Op basis van een studie van TNO en CBS (Segers et al., 2019) blijkt dat in 2019 ongeveer 4,5 miljoen woningen waren aangesloten op warmtenetten. Het aantal utiliteitsgebouwen dat gebruik maakt van warmtenetten wordt in voorgenoemde studie niet gekwantificeerd, maar laag inschat. We nemen in deze analyse aan dat alleen een deel van de woningvoorraad beschikt over een warmtenet.

Voor de warmtesystemen binnen het gebouw (zowel warmtepompen als warmtenetten) wordt de gemiddelde levensduur geschat op 25 jaar (Verhagen et al., 2022). Omdat de eerste warmtepompen rond 1994 zijn geïnstalleerd (CBS, 2022), kunnen we aannemen dat de warmtepompen die tussen 1994 en 2018 zijn geïnstalleerd tussen 2018 en 2050 worden vervangen. We nemen aan dat ook de installaties binnen gebouwen voor warmtenetten, geïnstalleerd voor 2018, tussen 2018 en 2050 worden vervangen. Voor infrastructuur is de geschatte levensduur langer (ongeveer 50 jaar). We gaan ervanuit dat deze infrastructuur tot 2050 in gebruik blijft. Ook voor de elektriciteitsproductie faciliteiten nemen we aan dat ze tot 2050 in gebruik blijven.

Verhagen et al. (2022) kwantificeren de materiaalvraag gerelateerd voor hybride warmtepompen, normale warmtepompen, lage temperatuur warmtenetten en hoge temperatuur warmtenetten. Daarbij worden het warmteproductie systeem, de infrastructuur, en aanpassingen die nodig zijn aan het gebouw zelf meegenomen. De materiaalintensiteiten zijn gerapporteerd in kilogram per woning. De materiaalintensiteit-schattingen van een warmtepomp zijn gebaseerd op een 10 kW pomp, die ongeveer 125 m² vloeroppervlak kan verwarmen (bouwjaar 1995) (Warmtepompverwarming, n.d.), ofwel 0.008 warmtepomp per vierkante meter. Vergelijkbaar berekenen we een omrekenfactor voor het warmtenet, door 1 "unit" warmtenet te delen door het gemiddeld oppervlak van een woning (109 m²) (CBS, 2022): 0.0084 warmtenet / m²:

- Omrekenfactor voor (hoge- en lage temperatuur) warmtenetten: $f_{wn} = 0.0084 \text{ unit} / \text{m}^2 \text{ GO}$
- Omrekenfactor voor (hybride) warmtepompen: $f_{wp} = 0.008 \text{ 10 kW warmtepomp} / \text{m}^2 \text{ GO}$

Het gebruiksoppervlak (GO) aan gebouwen dat een nieuw warmtesysteem behoeft (Nieuw_ws) wordt als volgt berekend:

- $Nieuw_ws = \text{restant_gebouwen} - Won_wp - Won_wn - Ut_wp$

Waarbij:

- Restant_gebouwen = GO gebouwen met bouwjaar tot 2018 dat niet wordt gesloopt tussen 2018 en 2050 (verkregen uit de Ruimtescanner)
- Won_wp = Aantal woningen dat al een warmtepomp heeft * gemiddelde oppervlak (GO) van woningen
- Won_wn = Aantal woningen dat voor 2018 is aangesloten op een warmtenet * gemiddeld oppervlak (GO) van woningen
- Ut_wp = Aantal utiliteitsgebouwen dat voor 2018 een warmtepomp heeft gekregen * gemiddelde oppervlak (GO) van utiliteitsgebouwen (zonder industrie)

Voor het aandeel per warmtesysteem gaan we uit van het "Mixed" scenario uit Verhagen et al. (2022), dat is gebaseerd op de scenariostudie van Berenschot (2019). Het aandeel per technologie is daarbij als volgt:

- Aandeel hoge temperatuur warmtenet: $HT-WN = 5\%$
- Aandeel lage temperatuur warmtenet: $LT-WN = 40\%$
- Aandeel warmtepomp: $WP = 35\%$
- Aandeel hybride warmtepomp: $H-WP = 20\%$

We kunnen nu de materiaalvraag per materiaal (I_m) gerelateerd aan de transitie van gebouwen naar een alternatief warmtesysteem als volgt berekenen:

- $I_m = Nieuw_ws * f_{wn} * HT-WN * mat_{m, HT-WN} + Nieuw_ws * f_{wn} * LT-WN * mat_{m, LT-WN} + Nieuw_ws * f_{wp} * WP * mat_{m, WP} + Nieuw_ws * f_{wp} * H-WP * mat_{m, H-WP}$

Waarbij mat de intensiteit in kilogram per woning van materiaal m in de betreffende technologie is.

We nemen aan dat in de gebouwvoorraad waar een nieuw warmtesysteem wordt geïmplementeerd een gas-gebaseerd warmtesysteem wordt verwijderd. We nemen aan dat alleen de materialen binnenshuis worden verwijderd. Extractie van gasleidingen is dus niet meegenomen. In Verhagen et al. (in voorbereiding) wordt de omvang van de gasinfrastructuur, en opties voor stedelijk mijnen van de infrastructuur in meer detail besproken.

De "cradle-to-gate" (van extractie tot en met materiaalproductie) impact gerelateerd aan de materiaalvraag is ook berekend. Hierbij is aangenomen dat al het materiaal primair is (0% RC, Recycled Content). We kijken naar de emissies in CO₂ equivalent, ofwel de "Global warming potential" (GWP). We gebruiken eenzelfde benadering als voor de berekening van de milieu impact van nieuwbouw (zie hoofdstuk 2.2).

3. Resultaten & Discussie

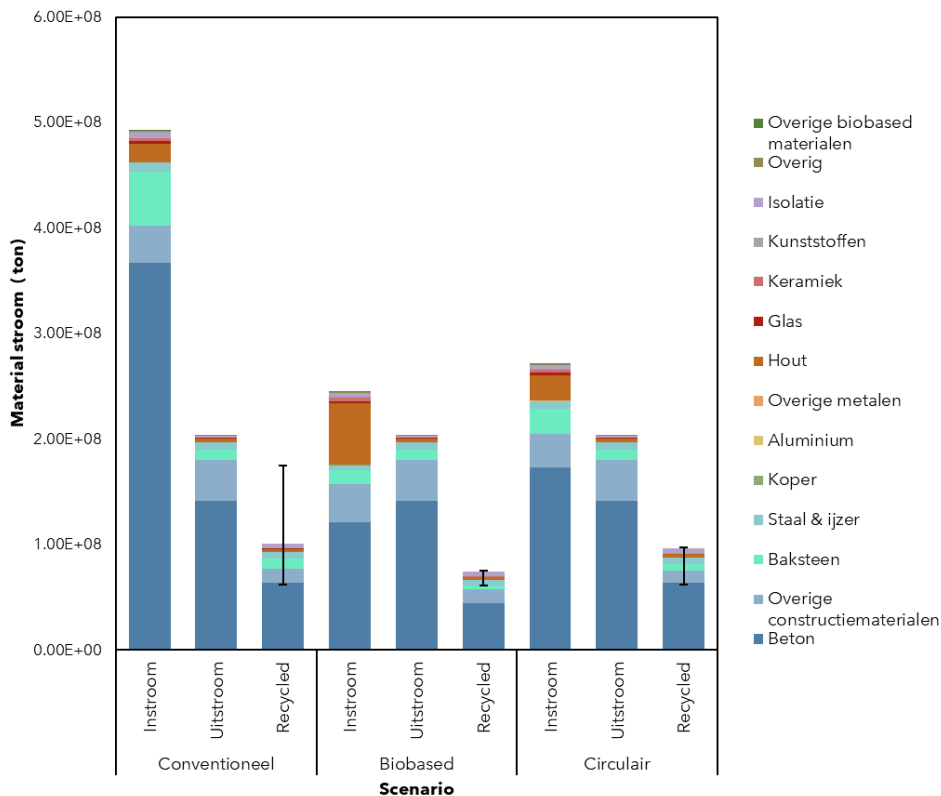
3.1. Materiaalvraag en aanbod uit de stedelijke mijn

De effecten van bouwstrategie op de materiaalvragen waren in de analyse van vorig jaar al besproken. We geven in de eerste twee alinea's van deze sectie een korte samenvatting, met focus op scenario Hoog, Dichtbij. De materiaalvraag neemt met circa 50% af bij verschuiving van 20% (Conventioneel) naar 80% biobased bouwconstructies (Biobased) (Figuur 1). De afname van de materiaalvraag komt grotendeels voort uit een verschuiving van traditionele bouwmaterialen zoals beton, baksteen, staal en ijzer naar hout en andere biobased materialen. De vraag naar hout is ongeveer 3 keer groter voor de Biobased bouwstrategie in vergelijking met de Conventionele bouwstrategie.

Ook de implementatie van circulaire bouwstrategieën vermindert de materiaalvraag aanzienlijk (Figuur 1). In de Circulaire scenario's bestaat een groter deel van de materiaalvraag uit overige bouwmaterialen, staal en ijzer, isolatie, hout, aluminium, kunststoffen dan in de conventionele scenario's. De verschuiving wordt veroorzaakt door vervanging van traditionele componenten, b.v. betonnen draagconstructies, met losmaakbare onderdelen, b.v. stalen draagconstructies.

De materiaaluitstroom tussen 2018 en 2050 is afhankelijk van de mate van verstedelijking, maar niet van de bouwstrategie (want instroom is nog geen uitstroom voor 2050). Verstedelijking leidt tot hogere sloopcijfers als gevolg van verdichting van gebouwen, maar de nieuw gebouwde gebouwen, ongeacht de gebruikte bouwmaterialen, zullen pas na 2050 beschikbaar komen voor *urban mining*. Bijna 8% van de gebouwenvoorraad in 2018 wordt gesloopt in scenario Dichtbij, terwijl minder dan 1% wordt gesloopt in scenario Ruim. De EoL-RR en de MRC verminderen de herbruikbaarheid van de materiaaluitstroom drastisch. Alternatieve recyclingpercentages aan het einde van de levensduur (weergegeven als foutmarges in figuur 1) worden besproken in de gevoeligheidsanalyse. In scenario Conventioneel, scenario Dichtbij, kan 20% van de materiaalvraag worden ingevuld met gerecyclede materialen. Deze waarden zijn lager voor traject Verbonden (11%) en Ruim (0%).

De vraag en uitstroom in scenario Biobased en Circulair komen beter overeen dan in scenario Conventioneel. In scenario Dichtbij vertegenwoordigt de uitstroom 83% van de vraag in scenario Biobased en 75% van de vraag in scenario Circulair. Echter, aan slechts respectievelijk 29% en 34% van de vraag kan in scenario Biobased en Circulair worden voldaan met secundaire materialen. Het relatief kleine potentieel wordt veroorzaakt door de beperkte EoL-RR en de MRC, en de mismatch tussen materiaalsamenstelling in de materiaalinstroom en -uitstroom, vooral voor scenario Biobased. Het gerecyclede aandeel in deze scenario's is lager voor scenario Verbonden (tussen 20% en 22%) en scenario Ruim (0%).



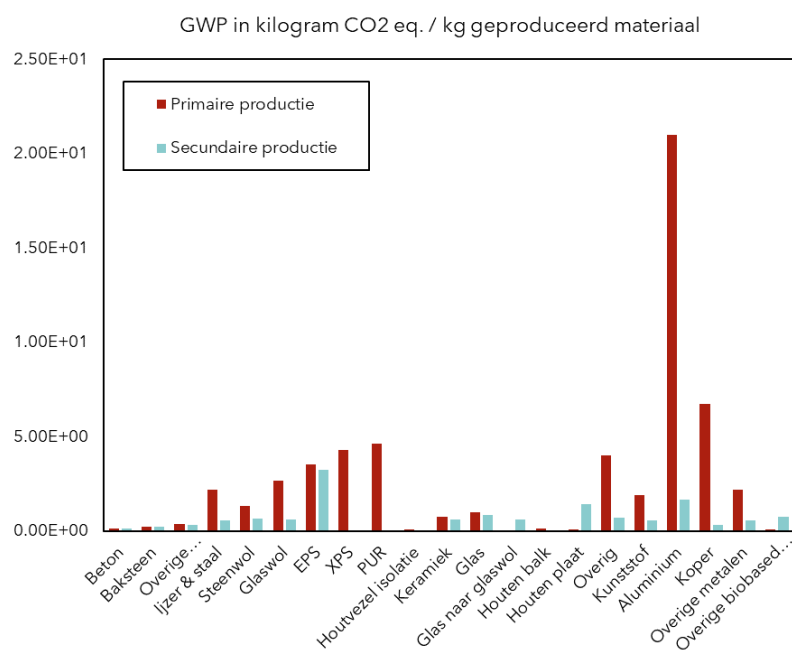
Figuur 1. Materiaalinstroom, uitstroom en Recycled Content in de instroom voor scenario Conventioneel, Biobased en Circulair. De foutmarge geeft de RC weer voor een 100% EoL-RR (bovengrens) en huidige praktijk EoL-RR (ondergrens).

3.1.1. Gevoeligheidsanalyse

Het wijzigen van de best-practice EoL-RR naar huidige EoL-RR vermindert het potentieel aan Recycled Content in nieuw gebouwde gebouwen enigszins. Voor scenario Dichtbij is de reductie 8% voor scenario Conventioneel, 5% voor scenario Biobased en 12% voor scenario Circulair. Het verhogen van de EoL-RR tot 100% heeft vooral invloed op scenario Conventioneel. In dit scenario neemt het potentieel aan Recycled Content toe met 15% in vergelijking met de huidige beste recyclingpercentages. Een 100% EoL-RR verandert het potentieel voor gerecycled materiaal voor de scenario's Biobased en Circulair nauwelijks, aangezien de MRC al bijna is bereikt voor de best practice EoL-RR. De resultaten laten zien dat met de huidige recyclingtechnologieën een hoger niveau van circulariteit al haalbaar is als de recyclinginspanningen verbeteren. Verdere verbetering van de EoL-RR is noodzakelijk, samen met verhoging van de MRC.

3.2. Milieu-impact gerelateerd aan nieuwbouw (2018-2050)

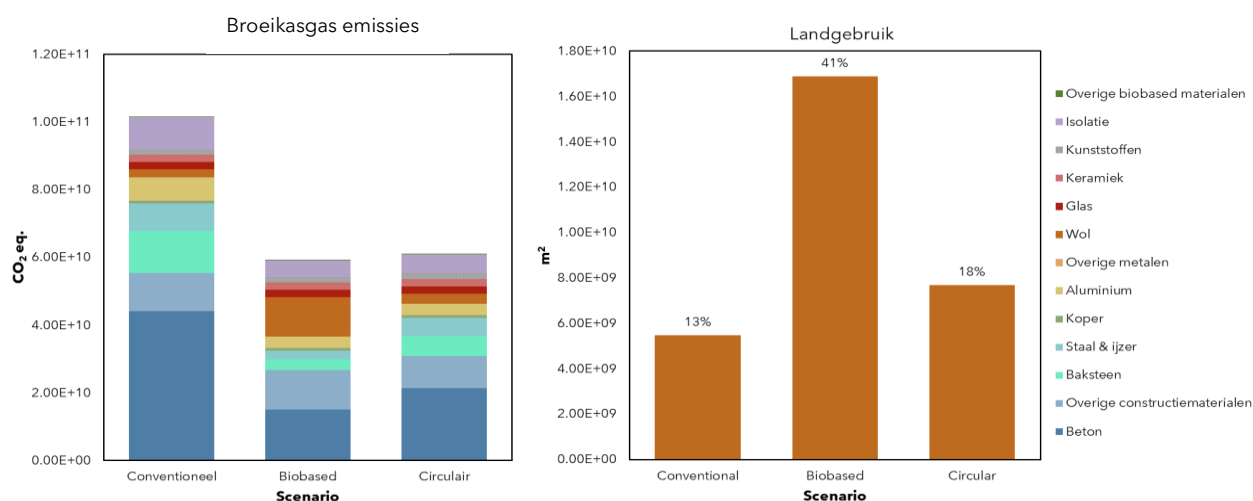
Figuur 2 laat de broeikasgasemissies zien voor de productie van verschillende bouwmaterialen. De rode staven presenteren de impact in kilogram CO₂ equivalent per kilogram geproduceerd primair materiaal, de blauwe staven presenteren de impact voor de productie van secundair materiaal (recycling). De impact is het hoogst voor primaire productie van aluminium, gevolgd door koper en een aantal isolatiematerialen. Over het algemeen verlaagt secundaire productie de impact aanzienlijk.



Figuur 2. Broeikaseffect in kg CO₂ eq. per kilogram geproduceerd materiaal.

We hebben de milieueffecten van de bouwmaterialen geanalyseerd voor de verschillende bouw strategieën (voor scenario Dichtbij), met de nadruk op broeikasgasemissies en landgebruik. De broeikasgasemissies gerelateerd aan de productie van bouwmaterialen voor scenario Conventioneel bedragen 104 miljoen kilogram CO₂-equivalent (Figuur 3). In scenario's Biobased en Circulair worden de BKG-emissies met respectievelijk 45% en 43% verminderd ten opzichte van scenario Conventioneel.

Hoewel het Biobased-scenario de laagste emissies laat zien, is het ook het meest landintensief. Figuur 3 toont de benodigde oppervlakte grond voor de productie van hout (voor geschatte jaarlijkse houtvraag) voor de drie gebouwscenario's. Voor scenario Biobased is ongeveer 16.300



Figuur 3. Broeikasgasemissies voor materiaalproductie (primair en secundair aandeel) (links) en landgebruik gerelateerd aan houtproductie (rechts) voor scenario Conventioneel, Biobased en Circulair. De percentages geven het landoppervlak van Nederland dat benodigd zou zijn voor productie van hout.

vierkante kilometer land nodig, gelijk aan 39% van de oppervlakte van Nederland. Voor scenario's Circulair (7.100 km²) en Conventioneel (4.900 km²) is de benodigde oppervlakte kleiner, maar nog steeds substantieel.

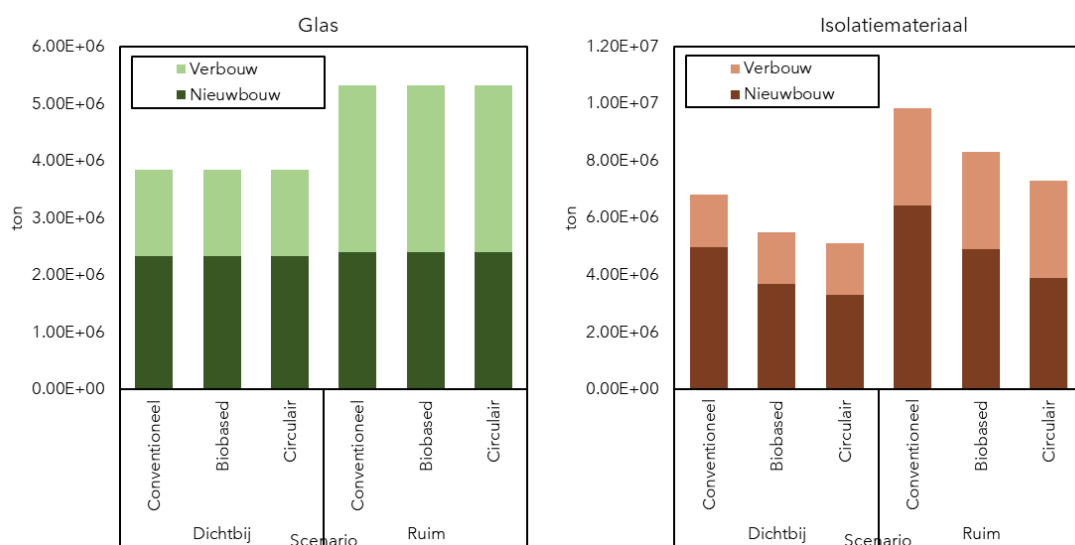
3.3. Materiaalvraag gerelateerd aan verbouwwerkzaamheden

3.3.1. Materiaalvraag gerelateerd aan verduurzaming gebouwen

Isolatiemateriaal

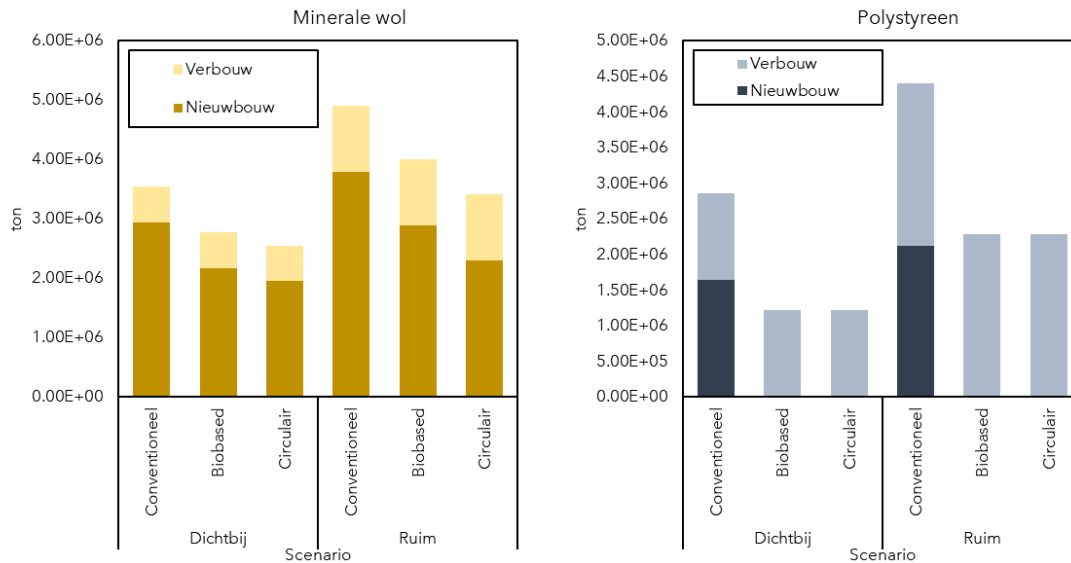
In scenario WLO Hoog Dichtbij omvat de aan verduurzaming gerelateerde vraag (2018-2050) naar glas 1.5 megaton en naar isolatiemateriaal 1.8 megaton. De vraag naar glas en isolatiemateriaal wordt daarmee 65% en 35% hoger dan wanneer naar alleen de aan nieuwbouw gerelateerde materiaalvraag wordt gekeken (Figuur 4).

De materiaalvraag is hoger voor scenario WLO Hoog Ruim, omdat een groter deel van de huidige bouwvoorraad blijft staan en dus moet worden verduurzaamd. De aan verduurzaming gerelateerde vraag (2018-2050) naar glas is in dit scenario 2.9 megaton, en isolatiemateriaal 3.4 megaton. De totale aan bouw gerelateerde vraag naar glas en isolatiemateriaal neemt daarmee met 122% en 53% toe respectievelijk voor scenario Ruim. (Figuur 4).



Figuur 4. Materiaalvraag tussen 2018 en 2050 gerelateerd aan nieuwbouw en verduurzaming van gebouwen.

In de materiaalintensiteit-gegevens wordt een onderscheid gemaakt tussen minerale wol en polystyreen als isolatiemateriaal. Wanneer we deze uitsplitsing ook maken voor de isolatiematerialen in de instroom, zien we grotere verschillen tussen de materiaalvraag voor nieuwbouw en verduurzaming (Figuur 5). We kunnen een verder onderscheid maken voor minerale wol tussen glaswol en steenwol, en voor polystyreen tussen "expanded" en "extruded" polystyreen. Een dergelijk onderscheid is relevant in het kader van een circulaire economie, omdat de CO₂-emissies per isolatiemateriaal verschillen (Figuur 2). Daarnaast is de impact een stuk lager wanneer het materiaal secundair is. Naast voorgenoemde isolatiematerialen worden ook de materialen PUR en houtvezel doorgaans als isolatiemateriaal gebruikt. Houtvezel is vanuit een emissie perspectief verkiesbaar boven de andere isolatiematerialen, maar behoeft relatief veel land voor productie.



Figuur 5. Vraag naar minerale wol (links) en polystyreen (rechts) tussen 2018 en 2050 voor nieuwbouw en verduurzaming van de huidige gebouwvoorraad (verbouw).

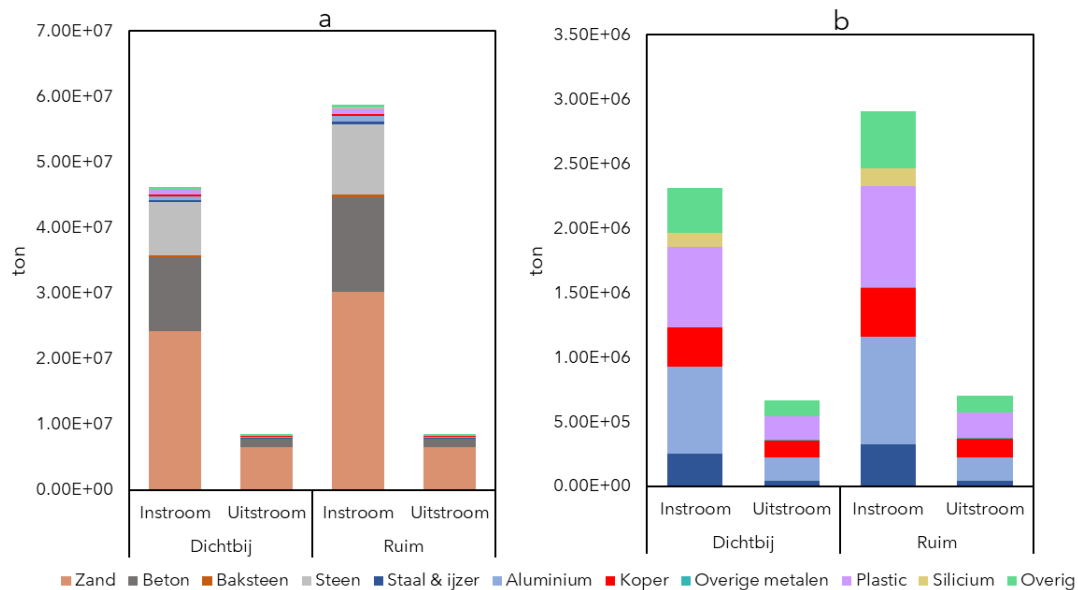
Warmtesysteem

De materiaalvraag voor veranderingen in warmtesystemen bestaat zowel uit constructiematerialen, metalen als kunststoffen (Figuur 6a). Constructiematerialen (zand, beton, baksteen en steen) vormen de grootste materiaalvraag (tussen de 44 en 56 megaton), benodigd voor vloerverwarming en transformatorgebouwen voor (hybride) warmtepompen. Daarnaast zijn ook significante hoeveelheden metalen, kunststoffen en overige materialen nodig (Figuur 6b). De totale materiaalvraag omvat 50 megaton in scenario Dichtbij en 62 megaton in scenario Ruim (WLO Hoog).

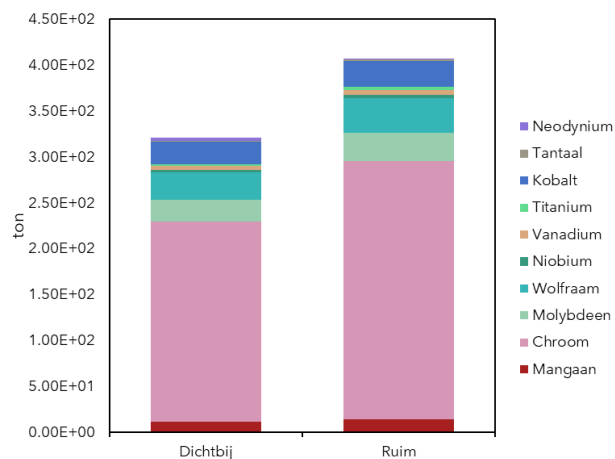
Daarnaast zijn er voor de elektriciteitsvoorziening ten behoeve van warmteproductie verschillende minor metalen nodig. De totale vraag naar deze grondstoffen tussen 2018 en 2050 ligt tussen de 321 (Dichtbij) en 407 (Ruim) ton. Het grootste deel van de vraag bestaat uit chroom, de toelevering van dit metaal is niet kritiek. Veel van de andere minor metalen vallen wel onder kritieke grondstoffen. De vraag naar kritieke materialen is klein ten opzichte van het elektriciteitssysteem of vervoer. Bijvoorbeeld, de vraag naar neodymium tussen 2018 en 2050 voor windturbines wordt geschat op meer dan 7.000 ton, terwijl de vraag voor de warmtetransitie in deze studie voor die periode tussen de 3 tot 5 ton ligt. Ook voor elektrisch vervoer wordt geschat dat in 2030 de vraag naar neodymium ongeveer 2% van de jaarlijkse wereldwijde productie omvat (142 ton) (Bosch et al., 2019). De vraag naar kobalt ligt in deze studie tussen de 25 en 29 ton (totaal voor 2018-2050), terwijl de jaarlijkse wereldwijde productie wordt geschat op 2537 ton. Vergelijkbaar wordt de jaarlijkse productie van wolfram geschat op 79 kiloton, terwijl de totale vraag in deze studie tussen de 30 en 38 ton ligt (2018-2050). Ook voor de andere kritieke grondstoffen blijkt de vraag relatief klein. Vanuit het perspectief van leveringszekerheid hebben daarom andere sectoren prioriteit, e.g. het elektriciteitssysteem en elektrisch vervoer.

De materiaaluitstroom in warmtesysteem is met ongeveer 9 megaton een stuk lager. De uitstroom bestaat voornamelijk uit zand, gevolgd door aluminium, koper en kunststoffen. Het grootste deel van de uitstroom bestaat uit warmtepompen en warmtenet systemen binnen het gebouw die voor 2018 zijn aangelegd, en tussen 2018 en 2050 moeten worden vervangen. Slechts een klein deel van de uitstroom bestaat uit het gas-gebaseerde warmtesysteem.

De materiaalvraag gerelateerd aan het warmtesysteem (exclusief isolatiemateriaal) in Verhagen et al. (2022) is 1,6 tot 2 keer zo groot als de materiaalvraag in deze studie (zie Appendix A voor details). Op het eerste gezicht is dat opmerkelijk, omdat in ons werk naast woningen ook utiliteitsgebouwen zijn meegenomen. Echter, de woningvoorraad vormt (in gebruiksoppervlak) het overgrote deel, 84%, van de totale gebouwvoorraad. Daarbij komt dat Verhagen de materiaalvraag voor de gehele woningvoorraad heeft berekend, terwijl wij ons in deze studie alleen richten op de gebouwvoorraad die niet wordt gesloopt tussen 2018 en 2050 (dus exclusief nieuwbouw). Als we de materiaalvraag voor warmtesystemen in nieuwbouw meenemen, wordt de materiaalvraag grofweg 30% hoger. Deze materiaalvraag is in onze vorige analyse wel meegenomen, en hier niet meegenomen om dubbeltelling te voorkomen.



Figuur 6. Warmtetransitie gerelateerde materiaalinstroom- en uitstroom tussen 2018 en 2050, voor alle materialen (a) en zonder constructiematerialen (zand, beton, cement, baksteen) (b)



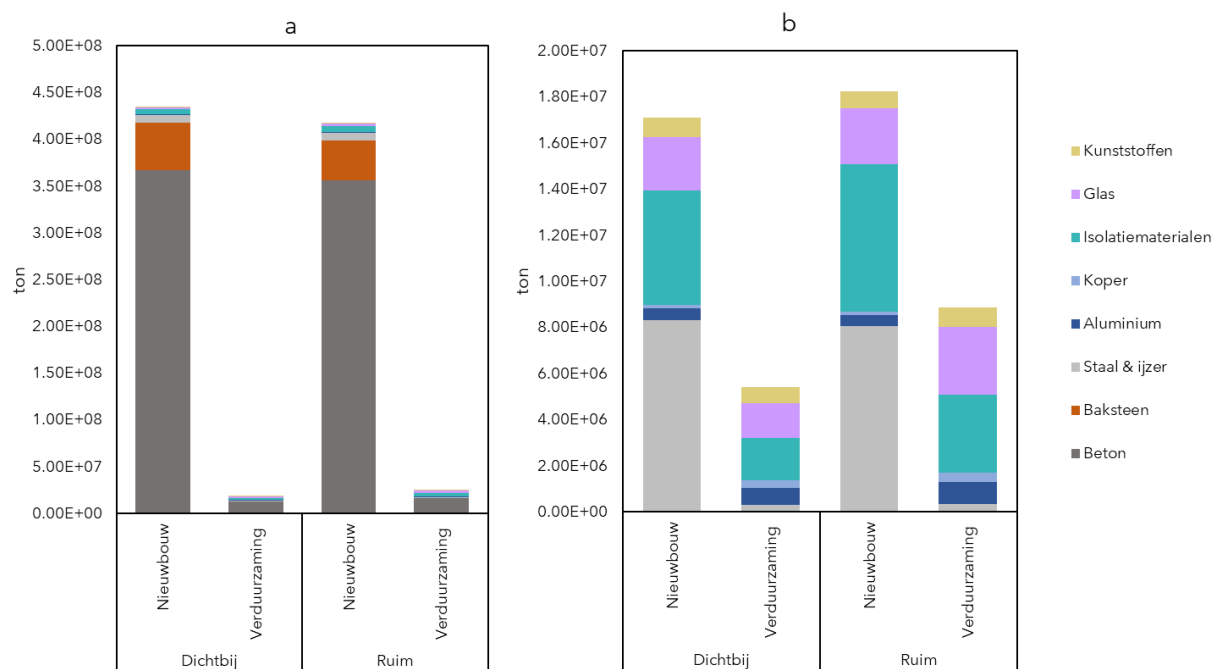
Figuur 7. Vraag naar minor metalen (waarvan sommigen kritieke grondstoffen) gerelateerd aan warmtetransitie van de bestaande gebouwvoorraad (2018-2050).

Vergelijking nieuwbouw en verbouwwerkzaamheden

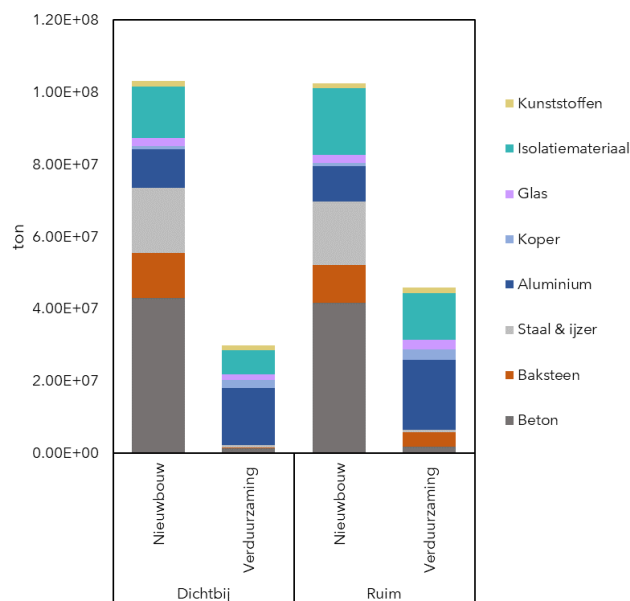
De totale materiaalvraag gerelateerd aan verduurzaming van de bestaande bouwvoorraad (isolatie en warmtesysteem) is kleiner dan de materiaalvraag voor nieuwbouw, maar niet irrelevant. In de vergelijking laten we materialen als zand, grind, steen, overige constructiematerialen buiten beschouwing, wegens verschil in de scope van materialen tussen de analyse naar nieuwbouw en verbouwwerkzaamheden. Wanneer we naar de overeenkomende materialen kijken, zien we met name verschillen voor beton (Figuur 7a). De vraag naar beton is 22 tot 29 keer groter voor nieuwbouw dan voor verduurzaming. Wanneer we constructiematerialen buiten beschouwing laten, zijn de verschillen veel minder groot (Figuur 7b). De materiaalvraag, constructiematerialen buiten beschouwing gelaten, neemt toe met 33% (Dichtbij) tot 50% (Ruim) wanneer we verduurzaming van de bestaande bouwvoorraad meenemen. Met name de vraag naar isolatiemateriaal en glas is substantieel, maar ook de vraag naar koper en aluminium. De materiaalvraag voor verduurzaming is groter in scenario's waarbij meer van de huidige bouwvoorraad blijft staan (scenario Ruim). De resultaten laten zien dat een afweging gemaakt moet worden tussen verduurzaming door vervanging van energie slecht presterende gebouwen naar energiezuinige varianten, of verduurzaming door renovatie van de bestaande bouwvoorraad.

De omvang van de aan verduurzaming gerelateerde materiaalvraag vormt dus een belangrijk deel van de totale materiaalvraag in de bouw tussen 2018 en 2050, en is daarom belangrijk om mee te nemen in de analyse van de stedelijke mijn. Dit wordt verder benadrukt wanneer we kijken naar de milieu-impact gerelateerd aan de productie van de materialen. Figuur 8 laat de BKG-emissies gerelateerd aan de productie van de belangrijkste materialen voor nieuwbouw en verduurzaming zien. Wanneer we uitgaan van 100% primaire productie, blijken de emissies gerelateerd aan materiaalproductie voor verduurzaming van de bouwvoorraad substantieel. Tussen de 22% (Dichtbij) en 31% (Ruim) van de totale uitstoot gerelateerd aan de materiaalvraag in de bouw komt van verduurzaming van de bouwvoorraad. Met name de productie van aluminium veroorzaakt hoge emissies, gevolgd door isolatiematerialen.

De materiaalvraag voor nieuwbouw is vergelijkbaar in omvang en samenstelling in scenario Ruim en Dichtbij (dit lijkt niet het geval in Figuur 7 omdat een selectie aan materialen is weergegeven). Voor verduurzaming zijn de verschillen in materiaalvraag tussen de twee scenario's groter. De materiaalvraag en gerelateerde emissies zijn hoger voor scenario Ruim omdat een groter deel van de bouwvoorraad uit 2018 blijft staan, en dus moet worden verduurzaamd.



Figuur 8. Materiaalvraag gerelateerd aan nieuwbouw (2018-2050) en verduurzaming van gebouwvoorraad (2018-2050) voor alle materialen (a) en zonder beton en baksteen (b)



Figuur 9. Broeikaseffect gerelateerd aan materiaalproductie in ton CO₂ equivalent voor nieuwbouw en verduurzaming bestaande bouw (onder aanname 100% primaire productie).

3.3.2. Inventarisatie data gebouw-transformatie en uitbouw

Eventueel dit hoofdstuk verplaatsen naar appendix.

In dit hoofdstuk maken we een eerste inventarisatie van data die gebruikt kan worden voor

gebouw-transformatie en uitbouw. Dit vormt een startpunt voor de analyse volgend jaar. Verbouw activiteiten kunnen bijdragen aan gebouwlevensduurverlenging, en daarmee het verminderen van de materiaalvraag.

Gebouwtransformaties

Het CBS beschikt over data voor het aantal woningtransformaties in het verleden, uitgesplitst naar oorspronkelijke hoofdgebruiksfunctie van het pand (CBS, 2020). Op basis van deze gegevens kan een inschatting worden gemaakt van jaarlijkse transformaties in de toekomst. Het CBS geeft ook informatie over het oppervlak van de door transformatie gevormde woningen. Deze zijn typisch klein: "In 2019 heeft 45 procent van deze woningen een oppervlakte van 15 tot 50 m² en 28 procent een oppervlakte van 50 tot 75 m²."

Op basis van gegevens voor gebouwrenovaties van de website Casadata (nd) kan een inschatting worden gemaakt van de materiaalvraag gerelateerd aan transformatie. Zo beschikt de website over gegevens voor renovatie van een keuken, toilet en badkamer. De data moet nog wel worden "vertaald" naar kilogram materialen.

Naast energie en transformatie gerelateerde renovaties worden gebouwen ook om andere redenen gerenoveerd. Denk aan vervanging badkamers en keukens bij nieuwe bewoners, onderhoudswerkzaamheden, of het verplaatsen of bijplaatsen van muren binnen het pand. Ook hier biedt Casadata mogelijk een ingang voor materiaalgegevens. Naast Casadata zou is vormen woningcorporaties en aannemers mogelijk een ingang voor materiaalgegevens. Echter geldt ook hier dat waarschijnlijk een vertaalslag gemaakt moet worden naar materialen, omdat de materialenlijst vaak gerapporteerd is op productniveau (e.g. x potten verf, x grenen latten, x platen isolatiemateriaal van merk y). Ook moet een inschatting gemaakt worden van de frequentie van dergelijke werkzaamheden. Mogelijk bieden statistieken naar adreswijzigingen een ingang voor dergelijke verbouwingen. Over de frequentie van onderhoudswerkzaamheden beschikken woningcorporaties en aannemersbedrijven mogelijk informatie.

	2018		2019	
	aantal	%	aantal	%
Hoofdfunctie pand				
Kantoorfunctie	5.310	43,5%	5.730	45,9%
Woonfunctie	1.715	14,0%	2.085	16,7%
Winkelfunctie	1.440	11,8%	1.455	11,7%
Industriefunctie	840	6,9%	1.125	9,0%
Bijeenkomstfunctie	825	6,8%	795	6,4%
Onderwijsfunctie	915	7,5%	500	4,0%
Gezondheidszorgfunctie	330	2,7%	390	3,1%
Overige gebruiksfunctie	200	1,6%	240	1,9%
Logiesfunctie	170	1,4%	115	0,9%
Sportfunctie	465	3,8%	50	0,4%
Totaal	12.210	100,0%	12.480	100,0%

Gebouw uitbouw

In het werk van Lederer et al. (2020) worden de materiaal in- en uitstroom gerelateerd aan dak-uitbreiding (attic-extension) geanalyseerd (Tabel 4). Hierbij worden de volgende materialen onderscheiden: beton, glas, isolatiemateriaal (minerale wol en polystyreen), baksteen, staal & ijzer, hout en zand.

Tabel 4. Materiaalinstroom- en uitstroom gerelateerd aan dakuitbouw (Lederer et al., 2020)

Material type	MI _{input,GVeaves} (kg/m ² NFA _{condition})	MI _{output,GVeaves} (kg/m ² NFA _{condition})
	residential	residential
Concrete	920.3	-
Brickwork	224.2	175.4
Gravel and sand	3.6	76.8
Wood	23.0	30.5
Iron/Steel	58.9	-
Glas	2.9	1.0
Mineral wool	6.7	0.0
Polystyrene	2.4	-

Op basis van gegevens van Casadata kan een inschatting worden gemaakt van de materialen gerelateerd aan een aanbouw of dakopbouw. De materialenlijst van Casadata niet meteen bruikbaar, maar moet worden vertaald naar kilogram per materiaaltype. Tabel 5 geeft de omgerekende materiaalvraag in massa (kg) weer voor een totale aanbouw (24 m²) en per vierkante meter.

Tabel 5. Materiaalvraag gerelateerd aan een uitbouw van 24m² en omgerekend naar materialen per m².

	Kg/ aanbouw (24 m ²)	kg/m ²
Staal	692.12	28.83819
Hout	757.30808	31.5545
Lood	29.70	1.2375
Bitumen	203.54286	8.480952
Aluminium	20	0.833333
Gips	306.64	12.77667
PE	13.060184	0.544174
EPS	231.3	9.6375
Beton, cement, mortel	15,506.61	646.1086
Lijmsteen	4644	193.5
Lijm en verf	971.00	40.45833
Baksteen	2223	92.625
Glas	196.0	8.166667

3. Conclusie & aanbevelingen

In deze studie breidden we de analyse naar materiaalstromen in en uit de Nederlandse gebouwvoorraad (2018-2050) uit van nieuwbouw en sloop naar de daaraan gerelateerde milieu-impact, en maakten we een detailleringstag met betrekking tot end-of-life recyclingpercentages en recycled content van de materiaaluitstroom. Daarnaast hebben we een eerste inschatting gemaakt van de materiaalvraag- en de daaraan gerelateerde broeikasgasemissies voor de verduurzaming van de bestaande gebouwvoorraad. Tot slot hebben we een voorstel gemaakt voor een uitgebreidere analyse naar verbouwwerkzaamheden, en bekeken daarvoor bruikbare bronnen.

Onze resultaten laten kansen en uitdagingen zien met betrekking tot het verlagen van de milieu impact van bouwmaterialen. Aanzienlijke emissiereducties kunnen worden bereikt door alternatief materiaalgebruik (Biobased en Circulair) en hogere recycling percentages. Implementatie van circulaire bouw strategieën vermindert de uitstoot direct door lichtere constructies en faciliteert materiaalrecycling en hergebruik aan het einde van de levensduur van het gebouw. Het laatste zal echter pas na 2050 zichtbaar worden als gevolg van de lange levensduur van het gebouw. Gebruik van biobased materialen vermindert de uitstoot van broeikasgassen, maar neveneffecten kunnen verwacht worden door het aanzienlijke oppervlak dat nodig is voor de productie van hout.

Het sluiten van materiaalkringlopen blijft beperkt tot ten minste 2050 omdat de gebouwvoorraad blijft groeien, en de end-of-life recycling percentages nog laag zijn. Gebruik van biobased materialen en circulaire bouwconstructies verminderen de kloof tussen vraag en uitstroom. Verder blijft het belangrijk dat andere strategieën, zoals efficiënter gebruik van gebouwoppervlak, en verlenging van de gebouw levensduur (bijvoorbeeld door renovatie, transformatie en uitbouw) ook worden onderzocht. Dit staat op de agenda voor volgend jaar.

Uit een eerste inventarisatie blijkt dat niet alleen nieuwbouw, maar ook verduurzaming van de bestaande gebouwvoorraad leidt tot een aanzienlijke materiaalvraag, met name voor niet-minerale materialen (i.e. glas, isolatiemateriaal, metalen en kunststoffen). In scenario's waarbij een groter deel van de gebouwvoorraad blijft staan (scenario Ruim), zijn ook meer materialen nodig voor verduurzaming. Aan deze materiaalvraag hangen ook substantiële emissies (21% (Dichtbij) tot 30% (Ruim) ten opzichte van de totale aan bouw materiaal gerelateerde uitstoot), met name voor de productie van aluminium en isolatiematerialen. Gebruik van secundair aluminium, en keuze voor een ander soort isolatiemateriaal of grotere inzet van gerecycled isolatiemateriaal kan de emissies verminderen.

Er moet een zorgvuldige keuze gemaakt worden tussen vervangen en renoveren van oudbouw. Vernieuwen van de gebouwvoorraad zal over het algemeen leiden tot een grotere materiaalvraag dan verduurzamen van de gebouwvoorraad met een slechte energieprestatie. Echter, levensduurverlenging van gebouwen zal ook leiden tot een grotere materiaalvraag gerelateerd aan onderhoud van het gebouw. Ook aan transformatie van gebouwen (e.g. van kantoor naar woonfunctie) en extensie van gebouwen (e.g. dakopbouw) hangt een materiaalvraag. Vervolgonderzoek is daarom nodig om de materiële implicaties van gebouwlevensduurverlenging beter in kaart te brengen.

4. Referenties

ASBP (2021). Recycled plastics in construction – Is it a good thing? <https://asbp.org.uk/asbp-news/think-piece-recycled-plastics>

BDA (2014). BDA comment on the use of Reclaimed Clay Bricks.
<https://www.brick.org.uk/admin/resources/g-reclaimed-brickwork.pdf>

Betonakkoord (2018). Betonakkoord voor duurzame groei. <https://www.betonakkoord.nl/>

Bosch, S., van Exter, P., Sprecher, B., de Vries, H., Bonenkamp, N. (2019). Metaalvraag van elektrisch vervoer. Metabolic, Copper8, Universiteit Leiden.

Bouw fysica (2018). De circulariteitsprestatie van isolatiematerialen.
https://nvbv.org/l/library/download/urn:uuid:01978c2a-35de-4e92-85c4-6d21d0a69c0e/de+circulariteitsprestatie+van+isolatiematerialen.pdf?format=save_to_disk&ext=.pdf

Bowyer, J., Bratkovich, S., Fernholz, K., Frank, M., Groot, H., Howe, J., & Pepke, E. (2015). Understanding steel recovery and recycling rates and limitations to recycling. Dovetail Partners Inc.: Minneapolis, MN, USA, 1-12.

CBS (2022). Warmtepompen; aantallen, thermisch vermogen en energiestromen.
<https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82380NED/table>

EPS Industry Alliance (2016). Recycled Content in Expanded Polystyrene Foam Protective Packaging.
<http://www.epsindustry.org/sites/default/files/Recycled%20Content%20In%20Expanded%20Polystyrene%20Foam%20Protective%20Packaging.pdf> EuRIC (2018a).

Metal Recycling Factsheet. <https://www.euric-aisbl.eu/position-papers/download/591/335/32>
EuRIC (2018b).

Plastic Recycling Factsheet. https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/euric_-_plastic_recycling_fact_sheet.pdf

Isover (2018). ISOVER Recycling. <https://www.isover.fr/presse/isover-recycling>

ISOVER St. Gobain (2018) ISOVER Recycling - les déchets de laine de verre ont désormais une filière de recyclage – Dossier de presse

KNB (n.d.). Hergebruik en Recycling. <https://www.knb-keramiek.nl/themas/duurzaamheid/hergebruik-en-recycling/> KNB (2022, 1 March).

KNB. Personal communication

Mehr, J., Vadenbo, C., Steubing, B., & Hellweg, S. (2018). Environmentally optimal wood use in Switzerland—Investigating the relevance of material cascades. Resources, Conservation and Recycling, 131, 181-191.

Metabolic (2021). Toekomstscenario's voor de materialisering van gebouwen. Mogelijke implicaties van de circulaire en energietransitie op het materiaalgebruik in gebouwen tot 2050

Rockwool (n.d.). Rockcycle. <https://www.rockwool.com/nl/downloads-tools-en-services/services/rockcycle/>

Segers, R., Niessink, R., van de Oever, R., Menkveld, M. (2020). Warmtemonitor 2019. In opdracht van Rijksdienst Ondernemend Nederland (RVO). TNO 2020 P11264.

Van Dijk, K., van der Zwan, J., Fraaij, A.L.A., Mulder E., & Hendriks, F. (2001). Closing the clay-brick cycle, options for the recycling or reuse of masonry debris. In CIB world building congress 2001 (pp. 1-12). CIB.

Verhagen, T. J., Sauer, M. L., van der Voet, E., & Sprecher, B. (2021). Matching Demolition and Construction Material Flows, an Urban Mining Case Study. Sustainability, 13(2), 653.

Vlakglas Recycling Nederland (2020). Jaarverslag 2020.

<https://www.vlakglasrecycling.nl/uploads/jaarverslagen/Jaarverslag%202020.pdf>

Warmtepompnet (n.d.). Vermogen warmtepomp berekenen.

<https://www.warmtepompverwarming.net/warmtepompen/vermogen-warmtepomp/>

Wiprächtiger, M., Haupt, M., Heeren, N., Waser, E., & Hellweg, S. (2020). A framework for sustainable and circular system design: Development and application on thermal insulation materials. Resources, Conservation and Recycling, 154, 104631.

Zhang, C. (2021). Chapter 2: Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling. Bouwen met Staal (n.d.). Recycling en hergebruik.

<https://www.bouwenmetstaal.nl/themas/duurzaam/recycling-en-hergebruik/>

5. Appendix

Appendix A: zie Excel bestand: [Appendix A energierenovatie.xlsx](#)

Appendix B: zie Excel bestand: [Appendix B bouw sloop.xlsx](#)