Scenario's voor circulaire industrialisatie bouw en infra

Samen op reis naar een toekomstbestendige gebouwde omgeving in 2050



TOEKOMST LEEF OMGEVING

BOUW EN TECHNIEK

Route Circulair

TNO innovation for life

Colofon

Publicatie
Augustus 2026

Auteurs

Mike van Hamersveld

Alexander Bletsis
Trijntje Verschuuren

Annemiek Jansen
Jaimy Nijnens
Sil Penders

Deze publicatie is een uitgave vanuit het Nationaal Groeifonds programma Toekomstbestendige Leefomgeving. Dit document is een oplevering van het Ecosysteem Consortium in fase 1 van het programma.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	**4**
Voorwoord	**8**
Inleiding	**9**
1. De uitdagingen van de sector	**11**
2. Doelen & Spanningen	**13**
3. De kans: Circulariteit en Industrialisatie in combinatie	**16**
4. Drie beelden van 2050	**25**
5. Zelf routes uitzetten naar 2050	**34**
Bijlagen	**36**
Bronnen	**48**

Managementsamenvatting

Nederland staat voor de opgave van een generatie. In de woningbouw, utiliteitsbouw en civiele infrastructuur moeten nieuwbouw, renovatie, verduurzaming en vervanging gelijktijdig worden gerealiseerd, met investeringen die oplopen tot honderden miljarden euro's. Met de huidige manier waarop dit alles georganiseerd is, blijven de benodigde schaal, snelheid en duurzaamheid met elkaar botsen.

Door industrialisatie en circulariteit doelgericht te combineren, ontstaat een perspectief waarin productiviteit, betaalbaarheid en duurzaamheid elkaar kunnen versterken. Om een systeem te realiseren waarin dat werkelijkheid wordt, is het nodig een verbinding tussen de uitdagingen van vandaag en de ambities voor morgen vaker met elkaar te maken. Dit rapport reikt daarvoor de bouwstenen aan: een beeld van de uitdagingen, de knoppen van industrialisatie en circulariteit, en drie toekomstbeelden die de afwegingen zichtbaar maken. Zodat die verbinding straks vanzelfsprekend is.

In de civiele infrastructuur naderen wegen, bruggen, viaducten, sluizen, kades en riolering het einde van hun technische levensduur. TNO raamt de vernieuwingskosten op circa €260 miljard tot 2100, waarbij de jaarlijkse uitgaven dit decennium al ruim moeten verdubbelen. Meer dan 80% van die infrastructuur is in handen van decentrale overheden, wat de druk op met name gemeentebegrotingen sterk vergroot, terwijl het ontbreken van landelijk inzicht in de staat van assets de opgave verder compliceert.

In de woningbouw is de ambitie 981.000 woningen tot en met 2030, goed voor circa €98,1 miljard, maar met 69.000 gerealiseerde woningen in 2025 ligt het tempo te laag.
Tegelijk vraagt de bestaande voorraad van circa 8,3 miljoen woningen om versnelde verduurzaming, waarvoor het Nationaal Isolatieprogramma inzet op 2,5 miljoen woningen.

Dit alles moet gebeuren onder toenemende schaarste aan grondstoffen, vakmensen, ruimte, en bij een achterblijvende arbeidsproductiviteit. De opgave is daarmee een samenhangend systeemvraagstuk waarvoor de huidige, versnipperde en projectmatige werkwijze onvoldoende toereikend is.

Wat nodig is voor snelheid en schaal sluit niet vanzelf aan op de aangescherpte circulaire en klimaatdoelen. Dat leidt tot vijf spanningen:

1. Snelheid en schaal botsen met de zorgvuldigheid en voorbereiding die hoogwaardig hergebruik vraagt.

2. Sturing op voorspelbaarheid en risicobeheersing botst met de onzekerheid en het leerproces dat circulaire toepassingen nu nog met zich meebrengen.

3. Betaalbaarheid op korte termijn botst met waarde op lange termijn, versterkt door een mismatch waarin kosten in het ene project vallen en baten pas elders worden gerealiseerd.

4. Sturing op CO_2-reductie in de gebruiksfase botst met het beperken van materiaalgebruik en milieudruk op lange termijn.

5. Projectoptimalisatie botst met optimalisatie op systeemniveau, waar keuzes in de ene opgave direct doorwerken in de beschikbaarheid van grondstoffen en capaciteit in een andere.

Er is een kans om die spanningen te doorbreken. Niet door circulariteit óf industrialisatie, maar door de combinatie van beide. Industrialisatie maakt het mogelijk om circulaire principes niet langer per project af te wegen, maar structureel te verankeren in processen en systemen. Andersom versterkt circulair werken industrialisatie: hernieuwbare en secundaire grondstoffen vergroten de leveringszekerheid en losmaakbaar en modulair ontwerpen dwingt standaardisatie af.

De sector heeft ook een antwoord in ontwikkeling. Binnen het Nationaal Groeifonds-programma Toekomstbestendige Leefomgeving (TBL) worden ruim honderd innovaties via zes opschalingsketens naar opschaling gebracht. De complementariteit tussen industrialisatie en circulariteit wordt in de praktijk echter zelden expliciet gemaakt. Innovaties worden meestal vanuit één perspectief ontwikkeld, terwijl de kans juist ligt in de combinatie.

Die combinatie is de kern van dit rapport. Industrialisatie wordt daarbij opgevat als de reorganisatie van (delen van) de bouw- en infrasector, gericht op het verminderen van het projectmatige en vraaggedreven karakter, om procesgerichte technologieën structureel te kunnen implementeren en zo schaalvoordelen, lagere transactiekosten en duurzame productiviteitsverhoging te realiseren.

Die reorganisatie wordt gedragen door vijf principes: continuïteit en herhaalbaarheid, specialisatie, kenniscodificatie, pre-engineering en sociotechnische afstemming. Ze krijgt vorm in vier kernkarakteristieken: vraag-aanbodafstemming, sectorniveau innovatie en kennisontwikkeling, geïntegreerde digitale systemen en geïntegreerde productiesystemen.

Circulariteit wordt concreet gemaakt in vier strategieën: minder materiaal in de keten brengen (narrow), vervangen van schaarse en schadelijke materialen (substitutie), levensduur maximaliseren (slow) en kringlopen sluiten via hoogwaardige recycling (close).

Beide bewegingen versterken elkaar. Zo maken standaardisatie en pre-engineering bijvoorbeeld hergebruik voorspelbaar en schaalbaar, specialisatie maakt gerichte investeringen mogelijk, en digitalisering levert de materiaaldata die het effectief gebruik van paspoorten en grootschalige hergebruikstromen mogelijk maken.

Dat betekent niet dat elke interventie snelheid, betaalbaarheid en duurzaamheid tegelijk maximaliseert, maar wel dat eenzijdige focus niet houdbaar is: duurzaamheid zonder betaalbaarheid is moeilijk opschaalbaar, en productiviteit zonder duurzaamheid houdt op lange termijn geen stand.

Om bespreekbaar te maken welke lineaire denkpatronen en vanzelfsprekendheden in de huidige praktijk we moeten doorbreken maken we een sprong naar de toekomst. Er worden drie scenario's geschetst die tastbaar maken wat er kan gebeuren wanneer in het systeem op verschillende onderwerpen wordt ingezet, zoals industrialisatie, hergebruik of informatiesturing. Deze scenario's maken zichtbaar waar bestaande structuren en werkwijzen de transitie belemmeren, en waar juist versnelling mogelijk is.

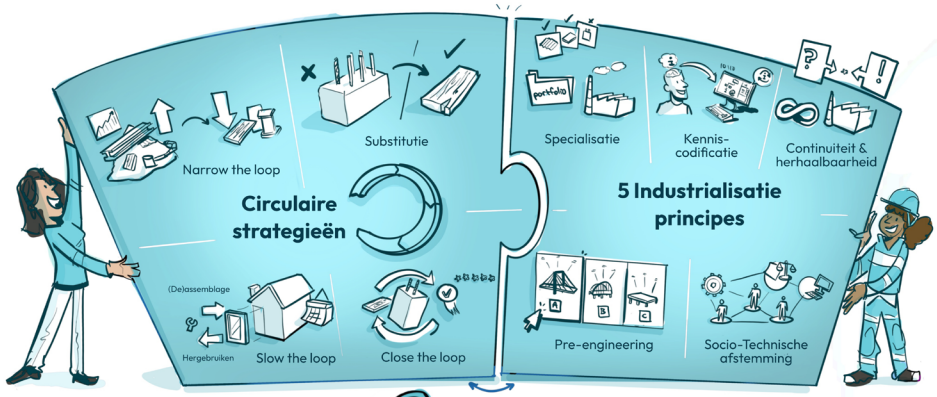
De Georganiseerde Bouwmachine
De sector kiest voor standaardisatie, schaal en fabrieksmatige precisie. De bouwplaats wordt assemblagelocatie, biobased bouwsystemen worden de industriële norm en de MKI maakt die keuze ook financieel logisch, maar de bestaande voorraad blijft onderbenut en na de ontwerpfase is bijsturen vrijwel onmogelijk.

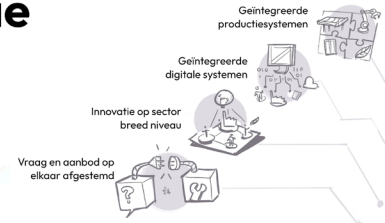
De Adaptieve Hergebruiksector
Benutten van wat er al is staat centraal. Demontage, certificering, regionale hubs en transformatie zijn de norm en nieuwbouw is de uitzondering, met veel behoud van materiaalwaarde en werkgelegenheid, maar met beperkte schaalbaarheid en snelheid omdat het aanbod afhangt van wat vrijkomt.

De Slimme Materiaalketen
Informatie stuurt de keten. Materiaalpaspoorten zijn levende documenten, een gedeeld ketenintegratieplatform verbindt vraag en aanbod van secundaire materialen en het systeem berekent continu de meest waardevolle bestemming, met minimale verspilling maar met maximale afhankelijkheid van data, standaarden en digitale infrastructuur die nu nog ontbreekt.

De scenario's zijn geen voorspellingen maar denkgereedschap, mede gevoed door werksessies met partijen uit beide sectoren. Ze zijn bedoeld om de toekomst dichterbij te halen, om op voort te bouwen, aan te passen en te gebruiken als aanleiding voor het gesprek over wat er in de eigen keten moet veranderen. Want de grootste opgave ligt in het op schaal anders organiseren van de sector. Dit biedt de handvatten om zelf aan de slag te gaan met het opstellen (en regelmatig bijstellen) van de routekaart voor jouw organisatie en de keten waar je deel van uitmaakt.

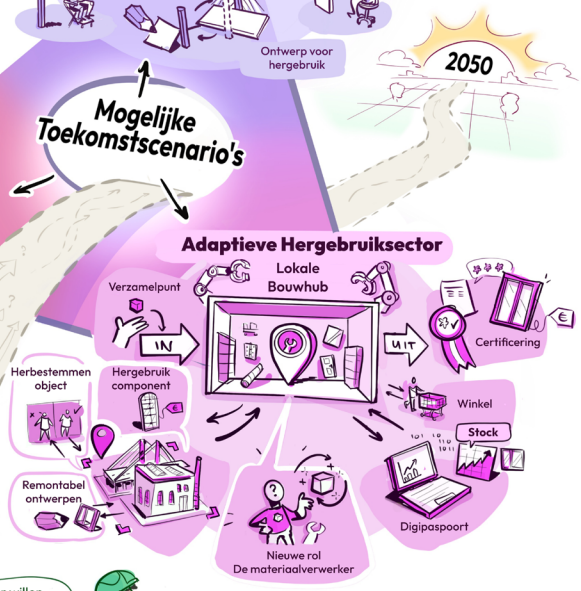
Scenario's voor circulaire industrialisatie in bouw en infra

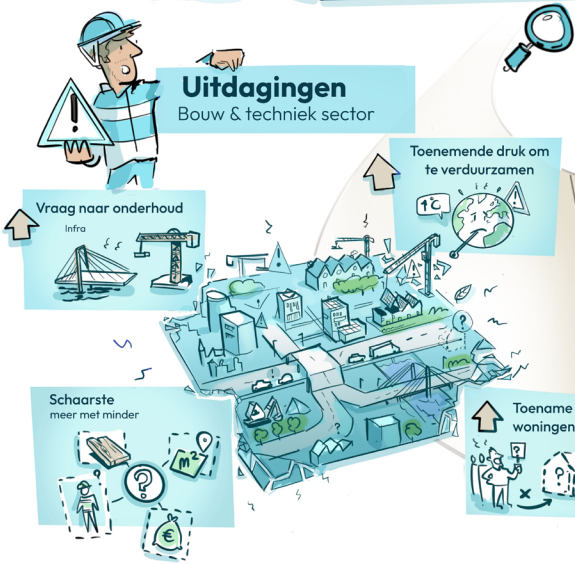


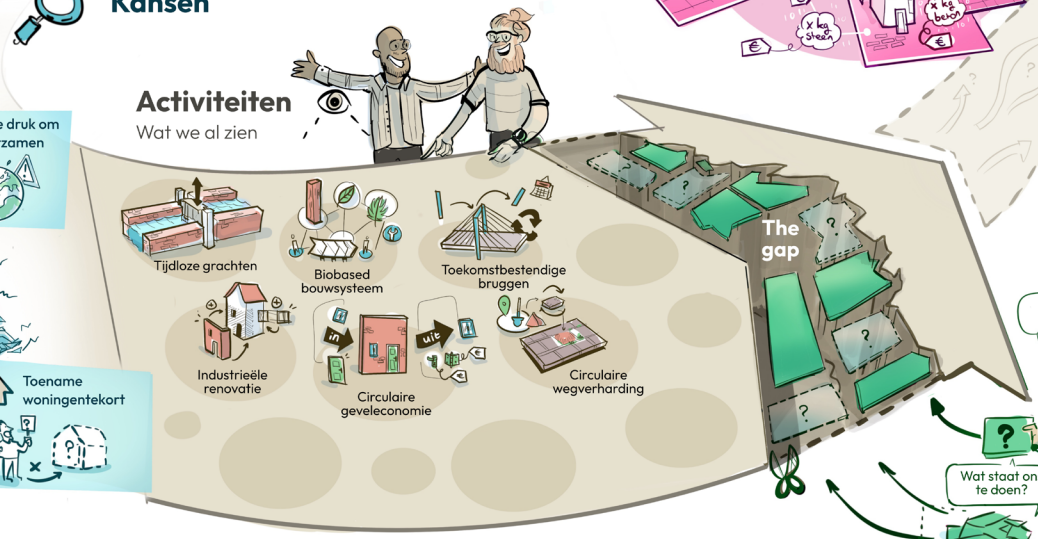














Voorwoord

De woningbouwopgave, de verduurzaming van de gebouwde omgeving en de vernieuwing van de infrastructuur vragen de komende decennia om een forse schaalsprong in de woningbouw, de emissiereductie van de bestaande gebouwde omgeving en de instandhouding van bruggen en viaducten. Tegelijkertijd neemt de schaarste aan mensen, middelen en grondstoffen toe, terwijl de arbeidsproductiviteit in de sector achterblijft. Met deze uitdagingen wordt het steeds belangrijker om de sector van vandaag te koppelen met de ambities voor de lange termijn.

Om ons heen zien we binnen en buiten het Nationaal Groeifonds programma Toekomstbestendige Leefomgeving (TBL) een groeiende groep marktpartijen, overheden en kennisinstellingen die zich elke dag inzetten voor een toekomstbestendige leefomgeving. Wat we zien, stemt hoopvol. Juist omdat we dit met zijn allen steeds meer in samenwerking oppakken.

Industrialisatie en circulariteit zijn belangrijke routes naar een toekomstbestendige leefomgeving en het is belangrijk deze in samenhang te zien. Om die samenhang te duiden en gericht te versnellen, analyseert dit rapport de uitdagingen, de kansen van circulariteit en industrialisatie en drie scenario's van een 2050 waarin we onze doelen behaald hebben. Gezamenlijk bieden zij een denkkader waarmee we de routes naar succes in 2050 met elkaar kunnen aanscherpen en vervolgstappen kunnen zetten.

Dit rapport biedt iedereen die zich inzet voor een toekomstbestendige leefomgeving handvatten om de kansen van circulair én industrieel werken samen nog slimmer te benutten.

We nodigen je uit om samen met jouw keten (binnen en buiten TBL) aan de slag te gaan met de handvatten uit dit rapport, zodat je de specifieke routes naar een toekomstbestendige leefomgeving in 2050 voor jullie kunt plotten en blijven bijstellen.

In de kennisbank van TBL vind je naast dit rapport ook begeleidende documenten die je helpen die route te bepalen, zodat je direct effectief aan de slag kan.

Op naar een toekomstbestendige leefomgeving!



Bart Brink
Boegbeeld TBL
Directeur TKI Bouw en Techniek



Liselore Havermans
Penvoerder TBL Ecosysteem consortium
Senior programmamanager TKI Bouw en Techniek

Inleiding

Nederland staat op een kantelpunt in de ontwikkeling van de gebouwde omgeving. De komende jaren vraagt de bouw- en infrasector om een forse opschaling: meer woningen bouwen, bestaande gebouwen verduurzamen en verouderde infrastructuur vernieuwen. Dit kan alleen met een hoger tempo, minder belemmeringen en een verhoogde arbeidsproductiviteit.

Tegelijkertijd wordt steeds duidelijker dat deze opgave niet langer kan worden ingevuld volgens de bestaande spelregels. De beschikbaarheid van mensen en grondstoffen staat onder druk, prijzen zijn onzeker en afhankelijkheden in internationale ketens nemen toe, terwijl de arbeidsproductiviteit in de sector achterblijft. Het huidige lineaire systeem, waarin grondstoffen worden gewonnen, toegepast en afgedankt, bereikt zijn grenzen en veroorzaakt milieudruk. Een fundamentele omslag is nodig naar een circulaire economie, waarin grondstoffen worden verminderd, hergebruikt en hun waarde behouden.

De kernvraag is daarom: hoe organiseren we de bouw- en infrasector zó, dat snelheid, betaalbaarheid, duurzaamheid en productiviteit elkaar versterken binnen een nieuw toekomstbestendig industrieel en circulair systeem?

Die vraag vraagt om een verbinding tussen de uitdagingen van vandaag en de ambities voor morgen. De keuzes die we nu maken in ontwerp, materiaalgebruik, productie en samenwerking bepalen immers in hoge mate of toekomstige knelpunten worden voorkomen of juist versterkt. De opgave vraagt daarom niet alleen om méér en sneller bouwen, maar ook om een andere inrichting van de bouwketen, waarin industrialisatie en circulariteit hand in hand gaan. Door deze opgaven in samenhang te beschouwen, komen industrialisatie en circulariteit naar voren als strategische hefbomen. Industriële principes bieden kansen voor voorspelbaarheid, schaal en hogere productiviteit. Circulaire strategieën maken het mogelijk materialen efficiënter te gebruiken, afhankelijkheden te verkleinen en de druk op klimaat en milieu te verminderen. Samen bieden zij perspectief om de opgave uitvoerbaar te houden.

Het programma Toekomstbestendige Leefomgeving (TBL) is in het leven geroepen om met deze uitdaging aan de slag te gaan. Zodoende zijn binnen fase 1 van TBL al diverse innovaties ontwikkeld die raken aan circulariteit en industrialisatie.

Een analyse van deze innovaties (Bijlage 4) laat zien dat binnen zowel de bouw- als infrasector intensief is gewerkt aan oplossingen op het gebied van digitalisering, standaardisatie, prefabricage, robotisering, datagedreven beheer en onderhoud levensduurverlenging, hergebruik en de toepassing van circulaire en biobased materialen en bouwsystemen. Veel van deze innovaties hebben de potentie om tegelijkertijd bij te dragen aan hogere productiviteit én een meer circulaire sector. In de praktijk werd deze verbinding echter niet altijd expliciet gemaakt, innovaties werden vaak primair ontwikkeld vanuit een circulair of juist industrialisatie perspectief.

De komende jaren staat de sector in het teken van opschaling, zo ook fase 2 van het programma TBL. Dat vraagt om een bouw- en infrasector die anders is georganiseerd: minder versnipperd, meer gericht op samenwerking in ketens, en met ruimte voor standaardisatie, innovatie en nieuwe rollen. Daarnaast vraagt het van overheden zowel

Nationaal Groeifonds-programma Toekomstbestendige Leefomgeving
Wat is Toekomstbestendige Leefomgeving (TBL)? Met het programma Toekomstbestendige Leefomgeving willen we met schaalbare innovaties een zodanige impuls geven aan de sector, dat de nodige versnelling, opschaling en productiviteitsverhoging plaatsvindt. Dit doen we door het ontwikkelen en implementeren van zowel sociale als technologische innovaties. Het programma is een samenwerking tussen meer dan 100 marktpartijen, kennisinstellingen en overheden in de ontwerp-, bouw- en techniekssector.

Wat zijn de opschalingsketens? Binnen het programma TBL wordt gewerkt met zogenoemde opschalingsketens: samenwerkingsverbanden waarin overheden, bedrijven en kennisinstellingen in de keten werken aan de ontwikkeling en opschaling van innovatieve oplossingen in de bouw- en infrasector.

Rol in de sector opgaves De opschalingsketens richten zich op het versnellen van de toepassing van industriële en circulaire werkwijzen. Zij brengen innovaties verder dan experimenten en pilots, en maken deze geschikt voor toepassing op grotere schaal.

Van innovatie naar opschaling Binnen de opschalingsketens worden nieuwe technieken, materialen en werkwijzen ontwikkeld, getest en doorontwikkeld richting praktische toepassingen. Tegelijkertijd wordt gewerkt aan de randvoorwaarden voor opschaling, zoals standaardisatie, ketensamenwerking en nieuwe vormen van opdrachtgeverschap.

Waarom dit rapport? De combinatie van industrialisatie en circulariteit biedt mogelijkheden die in dit programma bij elkaar komen kunnen. Tegelijkertijd ontbreekt het aan tastbaarheid van die mogelijkheden. Dit rapport zet een stap hierin, zodat er in de opschalingsketens vanuit het perspectief van zowel industrialisatie als circulariteit naar de oplossingen die opgeschaald worden binnen de opschalingsketens. De innovaties en ervaringen uit de opschalingsketens vormen dan ook een belangrijke basis voor de toekomstscenario's in dit rapport.

Rijk als decentraal om belemmeringen weg te nemen en actief voorwaarden te creëren voor versnelling en opschaling. Alleen zo kunnen partijen die willen ontwikkelen en investeren daadwerkelijk stappen zetten.

Dit rapport geeft duiding aan de combinatie van industrialisatie en circulariteit, en schetst drie mogelijke scenario's waarin deze combinatie heeft geleid tot een toekomstbestendige bouw- en infrasector.

Daarnaast reikt dit rapport de lezer de middelen aan om zelf aan de slag te gaan met het samenbrengen van innovaties op het gebied van industrialisatie en circulariteit en zo de oplossingen van vandaag dichter bij de ambities voor morgen te brengen.

Het doet dat langs drie stappen: een helder beeld van de uitdagingen waar de bouw- en infrasector voor staat, de kansen die de combinatie van industrialisatie en circulariteit biedt om die uitdagingen aan te gaan, en drie scenario's van een geïndustrialiseerde en circulaire sector in 2050.

De scenario's zijn gebaseerd op de innovaties die nu in de praktijk worden ontwikkeld, onder andere binnen de opschalingsketens van het programma Toekomstbestendige Leefomgeving. Het slothoofdstuk vertaalt de scenario's naar aanknopingspunten waarmee opdrachtgevers, marktpartijen en beleidsmakers hun eigen route naar 2050 kunnen uitstippelen.

1. De uitdagingen van de sector

Dit hoofdstuk schetst de omvang van de opgaven in de woningbouw, utiliteitsbouw en civiele infrastructuur, en plaatst deze vervolgens in het perspectief van de beleidsdoelstellingen. Het mondt uit in vijf spanningen die laten zien waarom de huidige manier van werken niet volstaat.

1.1 De opgave: meer, sneller én anders

In zowel de woningbouw als de civiele infrastructuur vereist de opgave omvangrijke en structurele investeringen van tientallen tot honderden miljarden euro's (Rijksoverheid, 2025), met een realisatiehorizon tot 2030 en doorlopend richting 2050. Het gaat daarbij niet om één opgave, maar om een samenloop van opgaven: nieuwbouw, renovatie, verduurzaming en vervanging moeten gelijktijdig gerealiseerd worden.

Tegelijkertijd moeten klimaatdoelstellingen worden gehaald, met een forse reductie van CO_2-uitstoot in 2030 en een volledig circulaire economie en klimaatneutrale gebouwde omgeving in 2050. Uitstel verergert de opgave, verhoogt de kosten en vergroot risico's voor veiligheid en continuïteit.

De uitvoering van beide opgaven vindt plaats onder toenemende schaarste aan grondstoffen, vakmensen en ruimte. Beperkingen in netcapaciteit, stikstofruimte en arbeidsproductiviteit versterken elkaar en vertragen onder andere vergunningverlening, wat doorwerkt in de voortgang van projecten. Hierdoor ontstaat druk op planning, betaalbaarheid en haalbaarheid.

Daarmee is de opgave geen optelsom van afzonderlijke projecten, maar een samenhangend systeemvraagstuk. De huidige manier van werken (overwegend versnipperd, projectmatig georganiseerd en gericht op korte termijn optimalisatie) sluit onvoldoende aan op de schaal, snelheid en samenhang die nodig zijn. Dit vormt een knelpunt dat opschaling belemmert.

De belangrijkste feiten en cijfers zijn hieronder samengevat; de uitgebreide cijfermatige onderbouwing is opgenomen in bijlage 3.

1.2 De vernieuwingsopgave binnen de civiele infrastructuur

In de civiele infrastructuur zijn veel wegen, bruggen, viaducten, sluizen, stuwen, kades en riolering verouderd en naderen het einde van hun technische levensduur. Het intensieve gebruik van deze infrastructuur benadrukt het belang van de instandhouding van betrouwbare en veilige infrastructuur (TNO, 2023).

De omvang van de civiele infrastructuur opgave
TNO raamt de jaarlijkse vernieuwingskosten tot 2030 op €2,4 miljard, oplopend naar €2,9 miljard in de periode 2031–2040 en meer dan €3 miljard daarna, met een verwachte piek van €3,8 miljard rond 2080. Opgeteld gaat het om circa €260 miljard aan vernieuwingskosten tot 2100 (TNO, 2023). Dit is exclusief regulier onderhoud, de nieuwbouwopgave uit het MIRT en de GWW-werkzaamheden binnen gebiedsontwikkelingen. Er zijn bovendien signalen dat de werkelijke omvang hoger uitvalt, doordat deelopgaven en assettypen in de raming nog ontbreken en door prijsstijgingen.

De jaarlijkse uitgaven aan de vernieuwingsopgave moeten dit decennium (2021-2030) met € 2,4 miljard al ruim verdubbelen ten opzichte de € 1,1 miljard van 2021 (TNO, 2023). De toenemende kosten deze eeuw zorgen voor een nieuw normaal dat serieuze implicaties heeft op de capaciteitsvraag in de sector.

Decentralisatie en het ontbreken van landelijk beleid bemoeilijken de uitvoering
Decentrale overheden (provincies, gemeenten en waterschappen) zijn verantwoordelijk voor meer dan 80% van de infrastructuur; gemeenten dragen circa 55% en volgt de landelijke toenemende trend in de komende decennia (TNO, 2023). Dit verhoogt de druk op de begrotingen van decentrale overheden en met name die van gemeenten aanzienlijk. Dit beeld wordt bevestigd in verdiepend onderzoek door Arcadis en Berenschot (2026) waarin gekeken is naar de vernieuwingsopgave alsook de reguliere beheer en onderhoudsopgave.

Gebrek aan inzicht in staat van assets compliceert opgave
De haalbaarheid van de uitvoering wordt gecompliceerd door het gebrek aan inzicht in de staat van deze assets op landelijk niveau. Daarnaast hebben ook beheerders zelf soms niet een volledig beeld van de opgave, dit is vooral het geval bij gemeenten (Arcadis & Berenschot, 2026). Assets kunnen in betere of slechtere staat zijn dan gedacht en het inzichtelijk maken van de staat is momenteel een kostbaar en tijdrovend proces, hierdoor gaan veel beheerders vaak uit van een-op-een vervanging in plaats van renovatie of levensduurverlenging. De omvang en tijdsdruk van de opgave vraagt van de decentrale overheden, Rijkswaterstaat en ProRail om een andere aanpak in het beoordelingsproces van hun assets.

1.3 De nieuwbouw- en verduurzamingsopgaven binnen de woningbouw

Nieuwbouw realiseren in een verhoogd tempo
Nederland zet in op de bouw van 981.000 woningen tot en met 2030, een investering van circa €98,1 miljard (VRO, 2023; Aedes, z.d.). Het tempo ligt echter te laag om dit in 2030 te behalen: in 2025 zijn 69.000 woningen gerealiseerd (CBS, 2026). Ook na 2030 resteert daardoor een publieke opgave, met geraamde tekorten van in totaal bijna €12 miljard voor woningbouw en de daaraan verbonden infrastructuurontwikkeling (Rebel, 2025).

Verduurzamen van de bestaande woningvoorraad
Nieuwbouwwoningen voldoen in toenemende mate aan strenge prestatie-eisen die bijdragen aan de klimaatdoelstellingen. Tegelijkertijd vraagt dit ook een versnelde verduurzaming van de bestaande woningvoorraad, die met circa 8,3 miljoen woningen een groot deel van de totale opgave vormt. Ondanks een groeiend aantal renovaties blijft het tempo achter bij wat nodig is (VRO, 2022).

Het Nationaal Isolatieprogramma (NIP) zet daarom in op het isoleren van 2,5 miljoen woningen tot en met 2030, met prioriteit voor 1,5 miljoen woningen met label E, F en G. Voor de uitvoering is een budget van €3,3 miljard beschikbaar gesteld om huishoudens te ondersteunen bij energiebesparing (VRO, 2022).

2. Doelen & Spanningen

Zonder aanpassing van het systeem blijven schaal, snelheid en duurzaamheid met elkaar botsen. De bouw- en infrasector is verantwoordelijk voor circa de helft van het nationale grondstoffengebruik en heeft daarmee directe invloed op broeikasgasemissies, milieudruk en leveringszekerheid. Met de huidige manier van bouwen, gebaseerd op primaire (fossiele) grondstoffen en lineaire processen, is de verwachting dat de huidige uitdagingen in de sector zal leiden tot een hogere materiaalvraag, meer broeikasgasemissies en meer milieu impact (EIB & Structural Collective, 2026).

2.1 Nieuwe circulaire doelen en uitvoeringsplannen

Circulariteit is geen doel op zich, maar een middel om doelen op het gebied van CO_2-emissies, milieudruk, economie en leveringszekerheid te behalen (PBL, 2025). Het circulaire beleid is de afgelopen jaren aangescherpt. Waar eerder werd gestuurd op een halvering van het gebruik van primaire abiotische grondstoffen in 2030, stelt het Nationaal Programma Circulaire Economie 2023–2030 nu tussendoelen voor 2035. Deze tussendoelen zijn: minimaal 82% van het Nederlandse afval recyclen en minimaal 15% hoogwaardig recyclen, het aandeel duurzame biogrondstoffen en secundaire grondstoffen binnen ons grondstoffengebruik is minimaal 55% en ons grondstoffengebruik is 15% lager dan in 2016. Einddoel blijft een volledig circulaire economie in 2050 (NPCE, 2025).

Het Transitieteam Circulaire Bouweconomie vertaalt de doelen sinds 2019 samen met markt en overheid naar uitvoering voor de bouwsector. Onder meer via de Uitvoeringsagenda 2025/26. Binnen het uitvoeringsplan wordt gericht op vier thema's; Narrow the loop, beheer en onderhoud, hoogwaardig hergebruik, en installaties in bouwwerken. Voor infrastructuur concretiseert de KCI-agenda van het ministerie van IenW de doelen langs verschillende routekaarten in samenwerking met RWS, IPO, UvW en gemeenten (Duurzame Infra, 2026). Daarmee verschuift de nadruk van beleidsvorming naar uitvoering.

2.2 Spanningen tussen opgaven en circulaire doelen

Wat nodig is voor snelheid en schaal in woningbouw en infrastructuur sluit niet altijd aan bij wat beleidsdoelstellingen vragen. Productiviteits- en circulaire ambities brengen andere keuzes met zich mee in ontwerp, materiaalgebruik en organisatie van projecten. Dit leidt in de praktijk tot spanning. Waar snelheid en voorspelbaarheid op korte termijn vragen om standaardisatie en doorontwikkeling van bestaande werkwijzen, vraagt circulariteit juist om voorbereiding, extra onderzoeken, nieuwe ketens en andere afwegingen.

Het expliciet maken van deze spanningen helpt om te begrijpen waar de huidige aanpak tekortschiet en waar gericht kan worden bijgestuurd. Ze maken zichtbaar waar ambities elkaar raken of tegenwerken, en waar gerichte innovaties nodig zijn om verder te komen.

De volgende spanningen hangen nauw met elkaar samen en laten zien waar bestaande werkwijzen en circulaire ambities nog niet op elkaar aansluiten.

Spanning 1: Snelheid en schaal ⟷ Zorgvuldigheid en voorbereiding

De noodzaak om snel woningen te realiseren en infrastructuur te verbeteren vraagt om voorspelbare, efficiënte processen. Circulariteit vraagt juist om voorbereiding en zorgvuldigheid. Hoogwaardig hergebruik vereist dat materialen worden geïnventariseerd, gedemonteerd, opgeslagen en opnieuw toegepast. Daarvoor zijn nieuwe schakels nodig, zoals demontagebedrijven en bouwhubs, die nog onvoldoende beschikbaar zijn.

Daarnaast vragen hergebruikte materialen om certificering en kwaliteitsborging. Dit vertraagt processen die juist zijn ingericht op snelheid en zekerheid. Daarmee ontstaat een spanning tussen het opschalen van productie en de extra stappen die circulariteit vraagt.

Spanning 2: Voorspelbaarheid en risicobeheersing ⟷ Onzekerheid en leerproces

Projecten worden gestuurd op beheersing van risico's, kwaliteit en planning. Circulaire toepassingen brengen momenteel vaker onzekerheden met zich mee, bijvoorbeeld over de kwaliteit van hergebruikte materialen of de toepasbaarheid van nieuwe biobased oplossingen. Tegelijkertijd is kennis en ervaring in de sector nog in ontwikkeling.

Hierdoor ontstaat een spanningsveld waarin circulaire keuzes worden gezien als minder voorspelbaar, terwijl projecten juist vragen om zekerheid. Circulariteit vraagt daarmee om ruimte voor leren en ontwikkelen, binnen een sector die primair is ingericht op beheersing.

Spanning 3: Betaalbaarheid op korte termijn ⟷ Waarde op lange termijn en ketenniveau

Circulair en biobased bouwen vraagt investeringen in een fase waarin betaalbaarheid onder druk staat. Circulaire en duurzame materialen zijn vaak initieel duurder en brengen leerkosten met zich mee. Tegelijkertijd worden projecten beoordeeld op directe kosten, niet op waarde over de levensduur.

Daarbij speelt een mismatch in de verdeling van kosten en baten. De kosten van demontage en voorbereiding vallen vaak in het ene project, terwijl de waarde van vrijkomende materialen pas wordt gerealiseerd in een ander project, bij een andere partij. Hierdoor ontstaat een kloof tussen maatschappelijke waarde en projectmatige businesscases, waarin circulaire keuzes financieel minder aantrekkelijk zijn.

Spanning 4: Korte termijn verduurzaming en CO_2-reductie ⟷ Lange termijn grondstofgebruik en CO_2-uitstoot

Veel verduurzamingsmaatregelen sturen op CO_2-reductie gedurende de gebruiksfase van het gebouw, bijvoorbeeld via isolatie, elektrificatie en installaties. Deze leveren klimaatwinst op in de gebruiksfase, maar gaan vaak gepaard met een hoge materiaalvraag, gebruik van moeilijk herbruikbare materialen en extra CO_2-uitstoot doordat deze materialen en producten geproduceerd worden.

Circulariteit vraagt juist om een bredere afweging, waarin ook grondstoffengebruik, herbruikbaarheid, levensduur en leveringszekerheid worden meegenomen. Hierdoor ontstaat een fundamentele spanning tussen sturen op directe emissiereductie en het beperken van materiaalgebruik en milieudruk op de lange termijn.

Spanning 5: Projectoptimalisatie ⟷ Systeemoptimalisatie

De bouw- en infrasector is sterk projectmatig georganiseerd. Beslissingen worden genomen binnen de grenzen van individuele projecten, met bijbehorende budgetten, planningen en risico's. De twee oplossingsrichtingen zoals Industrialisatie en Circulariteit vragen echter om optimalisatie over projecten heen en over de levenscyclus van materialen.

Keuzes in de ene opgave zoals versnelling van woningbouw, verduurzaming van de bestaande woningvoorraad of het vernieuwen van infrastructuur, hebben directe gevolgen voor de beschikbaarheid van grondstoffen,

oplossingen en personele capaciteit in andere opgaven. Vaak worden er keuzes gemaakt per project logisch lijken te zijn, maar op systeemniveau de circulaire ambitie onder druk zetten.

Het antwoord in ontwikkeling

De sector heeft op deze opgaven en spanningen al een antwoord in ontwikkeling. Binnen het programma TBL alleen al worden in fase 2 ruim honderd innovaties uit fase 1 via zes opschalingsketens, drie voor de civiele infrastructuur en drie voor de woningbouw, naar opschaling gebracht. Een analyse van deze innovaties laat zien dat 79 van de ruim 100 innovaties potentieel bijdragen aan zowel circulariteit als aan industrialisatie (zie ook bijlage 4 voor een uitgebreidere analyse).

Tegelijkertijd wordt die complementariteit nog niet altijd expliciet gemaakt en worden de innovaties vaak ontwikkeld vanuit één perspectief, terwijl de kansen juist liggen in het combineren van beide transities. De innovaties binnen TBL vormen daarmee niet alleen afzonderlijke oplossingen voor de afzonderlijke opgaven, maar ook bouwstenen voor een toekomst waarin circulariteit en industrialisatie elkaar versterken. Het volgende hoofdstuk werkt dit perspectief verder uit en laat zien hoe de combinatie van beide kan bijdragen aan het wegnemen van de spanningen die de sector vandaag ervaart.

3. De kans: Circulariteit en Industrialisatie in combinatie

Het vorige hoofdstuk liet zien waar de uitdaging zit: vijf spanningen tussen snelheid, betaalbaarheid en circulariteit. Dit hoofdstuk beschrijft de kans om die spanningen te doorbreken.

Niet door circulariteit óf industrialisatie, maar door de combinatie van beide. Het introduceert de knoppen waaraan gedraaid kan worden; de scenario's in het volgende hoofdstuk laten zien wat er gebeurt als je dat doet.

De druk op de woning- utiliteitsbouw en civiele infrastructuur neemt snel toe: de opgave groeit, de arbeidsproductiviteit groeit onvoldoende, de kosten lopen op en de footprint moet omlaag. Het huidige, projectmatige systeem loopt daarmee tegen zijn grenzen aan. Tegelijkertijd biedt deze gecombineerde opgave ook een uitweg.

Door industrialisatie en circulariteit doelgericht te combineren, ontstaat een perspectief waarin productiviteit, betaalbaarheid en duurzaamheid elkaar kunnen versterken.

De voorgaande hoofdstukken laten zien dat deze opgaven in de praktijk vaak botsen, maar ook waar aanknopingspunten liggen voor verandering. Onder andere in de organisatie van beheer en onderhoud, ontwerp-, productie- en bouwprocessen, ketensamenwerking, opdrachtgeverschap, en daarnaast ook het beter benutten van digitalisering.

Vanuit het perspectief van complementariteit: industrialisatie maakt het mogelijk om circulaire principes niet langer per project af te wegen, maar structureel te verankeren in processen en systemen.

Industrieel bouwen laat zien dat circulariteit schaalbaar kan zijn

In 2025 is ongeveer 30% van de prefab woningen biobased, waarbij minimaal 30% van het materiaalgebruik (op gewicht) uit biobased grondstoffen bestaat. 21,2% van de nieuwbouwwoningen is prefab of industrieel gerealiseerd, het aandeel volledig industrieel bouwen ligt lager (circa 10-15%) (Roland Berger, 2025). Door op industriële wijze prefab nieuwbouwwoningen te bouwen, kan het percentage biobased materiaal ook opgeschaald worden.

Deze hogere mate van circulariteit hangt samen met de manier van bouwen. Waar materiaalkeuzes in de traditionele bouw vaak projectspecifiek zijn, worden deze in industriële bouwprocessen grotendeels bepaald door het gekozen bouwsysteem. Biobased materialen worden daarbij toegepast in lichte, modulaire constructies, zoals houtbouw en prefab panelen, die goed aansluiten op gestandaardiseerde productie.

Tegelijkertijd blijft deze ontwikkeling grotendeels beperkt tot de woningbouw. In de GWW wordt industrialisatie voornamelijk nog project- en componentgericht toegepast. Dit hangt samen met de aard van de sector, waarin assets en vernieuwingsprojecten nu nog gezien worden als uniek en sterk locatie specifiek. Hierdoor wordt er nog te beperkt gewerkt aan standaardisatie en industriële opschaling over individuele assets heen. Met als gevolg dat er nog weinig wordt ingezet op bouwsystemen, modulaire constructies en het gebruik van circulaire materialen.

Andersom versterkt circulair werken de industrialisatie langs meerdere lijnen: het vergroot de leveringszekerheid door secundaire en hernieuwbare stromen, het dwingt via losmaakbaar en modulair ontwerpen standaardisatie af, het levert via materiaalpaspoorten de data die kenniscodificatie mogelijk maakt, en het maakt van de bestaande voorraad een continue, planbare werkvoorraad, mits vraag en aanbod van hernieuwbare en vrijkomende materialen actief worden gestuurd.

Dit hoofdstuk introduceert een conceptueel kader dat inzicht geeft in de manier waarop industrialisatie en circulariteit elkaar versterken. Daarbij staan industrialisatie en circulariteit centraal als samenhangende oplossingsrichtingen om de opgaven in samenhang aan te pakken en de transitie naar een schaalbare, duurzame sector te versnellen. Dit kader wordt in volgende hoofdstukken gebruikt om systematisch scenario's te creëren die gebruikt kunnen worden om tot handelingsperspectieven en aanbevelingen te komen.

3.1 Industrialisatie als oplossingsrichting: de transitie naar een geïndustrialiseerde bouw- en infrasector

De bouw- en infrasector zet zich in ten behoeve voor de sociaaleconomische behoeften aan huisvesting, leefbaarheid en bereikbaarheid. Echter staat, zoals eerder genoemd, de maakbaarheid van deze maatschappelijke opgaven onder druk. Dit heeft te maken met de manier waarop productie in de bouw- en infrasector is georganiseerd en de productiviteitsverhoging die nodig is om deze toenemende opgaven met dezelfde of zelfs minder (personele) capaciteit te volbrengen.

Industrialisatie biedt een antwoord op de groeiende opgave, toenemende arbeidskrapte en stijgende kosten, door de productiviteit structureel te verhogen en het productieproces minder afhankelijk te maken van schaarse capaciteit. Industrialisatie in de bouw- en technieksector wordt gedefinieerd als de defnitie in blauw onderaan deze pagina.

Industrialisatie vraagt namelijk niet alleen prefab/off-site productie of slechts de inzet van procesgerichte technologieën zoals digitalisering, automatisering, mechanisering, robotisering. Industrialisatie vraagt onder andere ook om de herinrichting van vraag, aanbod, processen, data en informatie, en samenwerking in de sector. Zonder het perspectief dat een reorganisatie nodig is, raakt het feit dat industrialisering (en daarmee productiviteitsverhoging) om een systeemverandering vraagt vaak onderbelicht. Terwijl dat juist de essentie is en gedeeltelijk verklaart waarom de sector nog niet geïndustrialiseerd is.

Definitie: "De reorganisatie van (specifieke delen van) de bouw- en infrasector, gericht op het verminderen van het inherente projectmatige en vraaggedreven karakter, teneinde procesgerichte technologieën structureel te kunnen implementeren en versterken, met als doel schaalvoordelen te realiseren, transactiekosten te verlagen en uiteindelijk een duurzame productiviteitsverhoging te bewerkstelligen."

Principe	Definitie
Continuïteit en herhaalbaarheid	Het waarborgen van continue operaties over tijd, op een manier die de ontwikkeling van herhaalbare producten en processen ondersteunt.
Specialisatie	Het richten van middelen en expertise op een specifieke, afgebakende scope van assets of diensten, door werkstromen te vereenvoudigen en de complexiteit van het portfolio te verminderen.
Kenniscodificatie	Het formaliseren en verankeren van impliciete kennis in gestructureerde systemen, zodat deze behouden blijft, hergebruikt kan worden en continue verbetering mogelijk maakt over organisaties, projecten en individuen heen.
Pre-engineering	Het ontwikkelen van herbruikbare producten en processen via standaardisatie en voorafgaande technische uitwerking, waarmee schaalbaarheid wordt bevorderd en de afhankelijkheid van maatwerk per project wordt verminderd.
Sociotechnische afstemming	Het realiseren van afstemming tussen sociale en technische systemen, zodat middelen gecoördineerd worden ingezet en samenhangend functioneren binnen een breder operationeel kader.

Tabel 1: De vijf principes van industrialisatie

3.1.1 Vijf principes van industrialisatie

Industrialisatie heeft niet één dominant of wenselijk eindbeeld. Het betreft een reorganisatie die wordt gestuurd door vijf principes die ten grondslag liggen aan industrialisatie. Deze principes kunnen op verschillende manieren structuur bieden in de reorganisatie van verschillende ketens en marktsegmenten in de bouw en infra. De vijf principes van industrialisatie zijn omschreven in tabel 1. In bijlage 1 is een uitgebreidere toelichting te vinden over deze principes, dit is gebaseerd op een recent TNO-onderzoek (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

3.1.2 Kernkarakteristieken van een geïndustrialiseerde bouw- en infrasector

Industrialisatie kent geen eenduidig eindbeeld en de ontwikkeling van de sector laat zich niet exact voorspellen. Het doel is daarom niet om één toekomstbeeld vast te leggen, maar om generieke eigenschappen te identificeren die relevant zijn binnen verschillende scenario's.

Op basis van bestaande 'best practices' en literatuur kunnen de kernkarakteristieken van een toekomstige geïndustrialiseerde bouw- en infrasector worden afgeleid.

Een dergelijke sector onderscheidt zich in de basis door het vermogen om de eerder beschreven reorganisatie van de sector daadwerkelijk te realiseren en de vijf principes van industrialisatie te operationaliseren (zie definitie en paragraaf 3.1.1).

De reorganisatie om duurzame productiviteitsverhoging te bewerkstelligen, betreft met bredere institutionele, economische, organisatorische en technische veranderingen in de sector; zoals nieuwe regelgeving, beleid, processen en vormen van ketensamenwerking, datagedreven werken, standaardisatie, productplatforms, ontwerpconfiguratie, automatisering en robotisering.

Deze veranderingen dienen uiteindelijk doorgevoerd te worden op sector-, keten- en organisatieniveau.
Op basis hiervan onderscheiden we vier kernkarakteristieken van een geïndustrialiseerde bouw- en infrasector. Deze worden samengevat in tabel 2. Een uitgebreide uitwerking is opgenomen in bijlage 2.

Kernkarakteristiek	Omschrijving
Vraag-aanbod afstemming	Structurele afstemming van vraag en aanbod op basis van functionele eisen, standaarden en productplatformen, dat continuïteit, herhaalbaarheid en minder maatwerk mogelijk maakt. • sectorniveau: Inrichting van een productplatform-ecosysteem met clustering op basis van typologieën, betrouwbare vraagprognoses en beleid dat standaardisatie en opschaling ondersteunt. • ketenniveau: Bundeling van vraag (bijv. in portfolio) rond bestaande productplatformen en afstemming tussen partijen over ontwikkeling, configuratie en toepassing van platform oplossingen. • Organisatieniveau: werken met productfamilies en gestandaardiseerde elementen, met interne afstemming tussen afdelingen over vraag, specificaties en levering.
Sectorniveau innovatie, kennisontwikkeling en optimalisatie	Continu verbeteren en doorontwikkelen van systemen en processen op basis van herhaalbare volumes, data, KPI's en overstijgende leerprocessen. • Sectorniveau: Ontwikkeling van innovatieplatforms, sectorstandaarden en richtlijnen die kennisdeling, interoperabiliteit en gezamenlijke investeringen ondersteunen. • Ketenniveau: Organisatie-overstijgend leren rond KPI-gedreven productplatforms, met gezamenlijke optimalisatie en kennisuitwisseling tussen ketenpartners. • Organisatieniveau: Ontwikkeling en verbetering van KPI-gedreven productfamilies, met gebruik van data en verbetercycli voor prestaties en efficiëntie.
Geïntegreerde digitale systemen	Digitale integratie van data, systemen en processen via standaarden, gedeelde databronnen en levenscyclusbrede informatie-uitwisseling. • sectorniveau: Opbouw van een schaalbare data-infrastructuur met open standaarden, data spaces en repositories als basis voor consistente sectorbrede informatie-uitwisseling. • Ketenniveau: Koppeling van digitale systemen tussen organisaties, waardoor informatiestromen over ontwerp, productie en uitvoering integraal verbonden raken. • Organisatieniveau: Implementatie van geïntegreerde systemen en enabling technologies, waardoor kennis wordt gecodificeerd en processen intern beter afgestemd en herhaalbaar zijn.
Geïntegreerde productiesystemen	Productie wordt georganiseerd als samenhangend systeem van productie, logistiek en configuratie, gericht op schaalbaarheid, flexibiliteit en efficiëntie. • Sectorniveau: Nieuwe businessmodellen maken flexibele en gedeelde productieconfiguraties mogelijk, passend binnen bredere Construction 4.0/5.0-ontwikkelingen. • Ketenniveau: Afstemming tussen ketenpartners over productiestrategieën, logistiek en langdurige relaties om platformgestuurde en schaalbare productie mogelijk te maken. • Organisatieniveau: Inrichting van een productiestrategie die aansluit op productplatforms, met inzet van enabling technologies zoals prefabricage, automatisering, robotisering, AI en circulaire ontwerpprincipes.

Tabel 2: De vier kernkarakteristieken van een geindustrialiseerde bouw- en infrasector

3.2 Circulariteit in de bouw- en infrasector

Circulariteit biedt een antwoord op de toenemende schaarste van grondstoffen, klimaatimpact en het behalen van (duurzame) beleidsdoelstellingen. Het maakt het mogelijk om materialen efficiënter te gebruiken, afhankelijkheden te verkleinen en milieudruk te verminderen. In dit document bouwen we voort op de definitie van circulair bouwen zoals opgesteld door De Transitieagenda van het Transitieteam Circulaire Bouweconomie (2018):

"*Circulair bouwen betekent het ontwikkelen, gebruiken en hergebruiken van gebouwen, gebieden en infrastructuur, zonder natuurlijke hulpbronnen onnodig uit te putten, de leefomgeving te vervuilen en ecosystemen aan te tasten.*
Bouwen op een wijze die economisch verantwoord is en bijdraagt aan het welzijn van mens en dier. Hier en daar, nu en later".

Dit gebeurt door ontwerp- en proceskeuzes, een andere risicoverdeling, andere bouwvoorschriften en -eisen, en andere bouwmethodes en logistieke processen, die leiden tot minder of schoner materiaalgebruik, langere levensduur, gesloten kringlopen en de inzet van hernieuwbare en secundaire grondstoffen. Circulariteit zorgt zo voor een toekomstbestendige, veerkrachtige en binnen planetaire grenzen functionerende gebouwde omgeving.

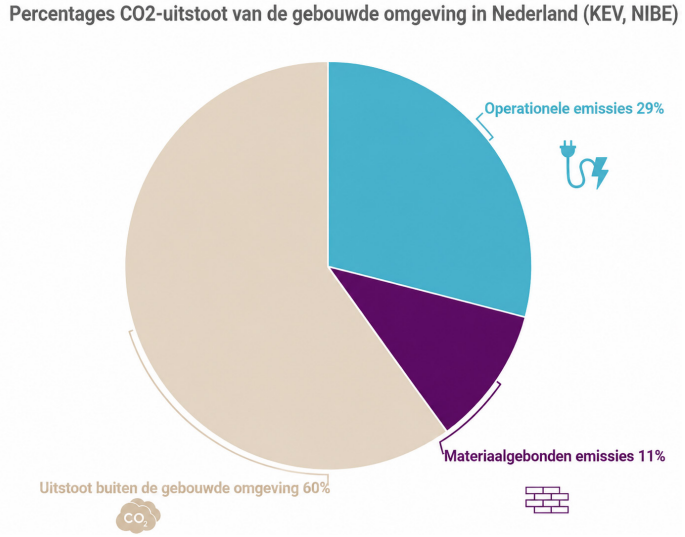
3.2.1 Hoe circulair zijn we nu?

De bouw- en infrasector is nog in sterke mate georganiseerd rond lineair materiaalgebruik. Hoewel hergebruik en recycling op papier hoog lijken, blijft de inzet van secundaire en hernieuwbare materialen

Materiaalgebruik bepaalt de ruimte binnen de CO_2-opgave

Binnen de gebouwde omgeving ligt de nadruk momenteel vooral op emissies in de gebruiksfase. Tegelijkertijd blijft een belangrijk deel van de klimaatimpact onderbelicht: circa 11% van de CO_2-uitstoot is materiaalgebonden, aangevuld met een aanzienlijk aandeel emissies in de keten buiten de directe bouwsector. Zie afbeelding 1 (DGBC, 2023). Materiaalgebruik is een bepalende factor in het realiseren van de klimaatdoelen.

Het resterende CO_2-budget voor de bouw, de hoeveelheid uitstoot die nog mogelijk is om binnen klimaatdoelen te blijven, is daarbij beperkt. Bij voortzetting van de huidige lineaire bouwpraktijk raakt dit budget binnen enkele jaren uitgeput (Copper8, 2025). Deze ontwikkeling wordt versterkt door nieuwe rekenmethoden. Waar de huidige MPG nog deels stuurt op afzonderlijke componenten, dwingt de opkomende Whole Life Carbon (WLC)-methodiek tot het integraal meenemen van alle materiaalgebonden emissies, van grondstofwinning tot sloop. Daarmee wordt de klimaatimpact van materiaalkeuzes zichtbaar en direct relevant voor ontwerp- en investeringskeuzes.



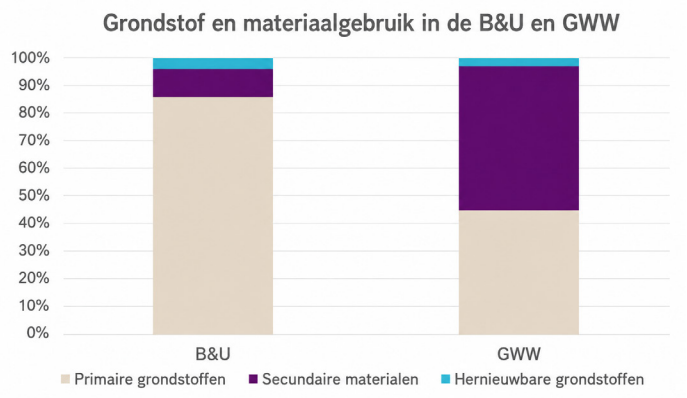
Afbeelding 1: CO_2-emissies in Nederland (DGBC, 2023). Circa 40% vindt plaats in de gebouwde omgeving, verdeeld over operationele emissies en materiaalgebonden emissies (11%) (DGBC, 2023).

in de praktijk beperkt en is de sector nog onvoldoende ingericht op een circulaire werkwijze.

Schijnbare circulariteit: veel recycling, weinig hergebruik
De omvang van de materiaalstromen maakt dit scherp zichtbaar. In de woningbouw en utiliteitsbouw bedroeg de totale materiaalvraag in 2023 ruim 26 Mton, waarvan 84% primair van oorsprong is (zie afbeelding 2, EIB & Structural Collective, 2026). Beton domineert met afstand en bestaat vrijwel volledig uit primaire grondstoffen, waardoor het de grootste bijdrage levert aan de totale milieu-impact. In de civiele infrastructuur ligt het aandeel secundaire materialen met circa 52% hoger, mede door de inzet van gerecycled asfalt en menggranulaat. Tegelijkertijd blijft ook hier het aandeel primaire grondstoffen substantieel: circa de helft (EIB & Structural Collective, 2026).

Achter deze cijfers gaat een belangrijk structureel verschil schuil. Waar de civiele infrastructuur relatief veel werkt met uniforme bulkstromen die technisch eenvoudiger opnieuw inzetbaar zijn, is de materiaalvraag in de woning- en utiliteitsbouw complexer en minder goed aan te sluiten op het beschikbare aanbod. Dit wordt zichtbaar in de mate waarin vrijkomende materialen daadwerkelijk kunnen voorzien in de vraag: in de woning- en utiliteitsbouw kan momenteel slechts circa 19% van de materiaalvraag worden gedekt met materialen uit sloop en renovatie (EIB & Structural Collective, 2026).

Tegelijkertijd maskeert het hoge recyclingpercentage de werkelijke mate van circulariteit. Nederland recyclet circa 88% van het bouw- en sloopafval, maar het grootste deel hiervan wordt laagwaardig toegepast (Circle Economy, 2023). Materialen, met name beton, verliezen daarbij hun oorspronkelijke kwaliteit en waarde en worden ingezet als fundering of ophoogmateriaal. Daarmee blijft de behoefte aan nieuwe primaire grondstoffen vrijwel onverminderd hoog.



Afbeelding 2: Het aandeel primaire, secundaire en hernieuwbare materialen voor B&U en GWW (EIB & Structural Collective, 2026)

3.2.2 Circulaire Strategieën

De definitie van circulair bouwen is geen containerbegrip. Ze rust op vier concrete strategieën die gezamenlijk richting geven aan de circulaire opgave en aansluiten bij de R-ladder, Europese denkkaders en nationale transitieagenda's. Deze strategieën worden geoperationaliseerd met behulp van relevante meet- en regelkaders (bijv. de Milieu Kosten Indicator (MKI) en Digitale Product Paspoorten (DPP)) en door middel van circulaire oplossingen die invulling geven aan deze strategieën. Tabel 3 geeft een omschrijving van de vier strategieën.

3.3 Versnellen van de circulaire economie door middel van industrialisering

Industrialisering in de bouw- en infrasector richt zich primair op het verhogen van productiviteit en efficiëntie en is daarmee niet per definitie gericht op circulariteit of duurzaamheid. Tegelijkertijd zijn beide bewegingen sterk complementair. De principes van industrialisering kunnen juist een belangrijke bijdrage leveren aan de reorganisatie van de sector richting meer duurzame en circulaire werkwijzen. Daarmee biedt de combinatie van industrialisering en circulariteit een kans om de vijf spanningen uit het vorige hoofdstuk weg te nemen en daarmee te komen tot mogelijke oplossingsrichtingen voor de gecombineerde opgave.

Dit betekent niet dat iedere interventie altijd gelijktijdig zowel productiviteit als circulariteit en/of duurzaamheid maximaliseert. In de praktijk kunnen er

Strategie	Omschrijving
Narrow the loop: minder materiaal in de keten brengen	Narrow the loop richt zich op het terugdringen van grondstoffengebruik aan de voorkant van de keten. Dit heeft de grootste impact op het beperken van de druk op milieu, klimaat en leveringsrisico's. In de bouw en infra gaat het om: • slimmer ontwerpen met minder materiaal; • het weglaten van overcapaciteit (meer materiaal toepassen dan functioneel nodig is); • delen en meervoudig gebruik van ruimte en voorzieningen; • efficiëntere productieprocessen.
Substitutie: vervangen van schaarse en schadelijke materialen	Waar materiaalgebruik niet verder kan worden voorkomen, biedt substitutie een tweede route. Substitutie betekent het vervangen van eindige en milieubelastende primaire grondstoffen door: • hernieuwbare materialen (bijv. hout, hennep, biobased composieten); • hoogwaardig hergebruikte of gerecyclede materialen (bijv. gerecycled asfalt of secundair staal/metaal); • alternatieven met duidelijk lagere milieudruk.
Slow the loop: levensduur maximaliseren	Slow the loop gaat over het verlengen van de levensduur van gebouwen, infrastructuur, producten en materialen. Hoe langer iets functioneert, hoe langer nieuwe grondstoffen worden uitgesteld. Elementen hiervan zijn: • adaptief vermogen en flexibiliteit in ontwerp; • onderhoud, reparatie en refurbishment; • hergebruik van componenten en bouwelementen in dezelfde of nieuwe functie; • opwaarderen of transformeren in plaats van slopen.
Close the loop: kringlopen sluiten door hoogwaardige recycling	Als een bouwwerk of product uiteindelijk aan het einde van zijn levenscyclus komt, is recycling de route om materialen opnieuw in te brengen in de keten. Close the loop draait om: • hoogwaardige recycling van materialen; • voorkomen van downcycling; • scheiden van stromen door losmaakbaar ontwerpen; • voorkomen van verbranding en storten.

Tabel 3: De vier strategieën die circulariteit concreet maken

spanningen blijven bestaan tussen beide doelen (zie de vijf spanningen in het vorige hoofdstuk).

Toch draagt het combineren van industrialisatie en circulariteit bij aan de haalbaarheid van beide doelen. Een eenzijdige focus op duurzaamheid en circulariteit zonder aandacht voor betaalbaarheid en productiviteit is moeilijk opschaalbaar. Omgekeerd is een focus op productiviteit en kostenreductie zonder aandacht voor duurzaamheid op de lange termijn evenmin houdbaar. De meerwaarde ligt daarmee in de integrale benadering waarin oplossingsrichtingen voor beide doelstellingen in samenhang worden ontwikkeld.

Een concreet voorbeeld hiervan is hergebruik van materialen en componenten. Hergebruik vraagt vaak om extra inspecties, demontage, transport en bewerking, wat kan leiden tot hogere kosten en complexiteit. Industrialisering kan deze nadelen mitigeren door inzet van gestandaardiseerde processen, modulaire ontwerpen en efficiënte logistieke systemen. Hierdoor wordt hergebruik beter voorspelbaar, schaalbaar en kostenefficiënt. Daarnaast kunnen efficiëntieverbeteringen in andere delen van het proces kostenbesparingen opleveren, waardoor circulaire oplossingen binnen het totale systeem ook economisch haalbaar worden.

Strategie	Koppeling tussen circulariteit en industrialisering
Narrow the loop: minder materiaal in de keten brengen	Narrow the loop richt zich op het terugdringen van grondstoffengebruik aan de voorkant van de keten. Dit zorgt voor een prikkel voor meer pre-engineering en stimulans voor sociotechnische afstemming. Vanuit industrialisatie kan op twee manieren bijgedragen worden aan deze strategie: • met behulp van data-gedreven typologie-aanpakken kan de noodzaak voor vervanging worden voorkomen door de bestaande voorraad beter te benutten. Te denken valt aan het herberekenen van constructies, effectievere inzet van alternatieve materiaal-besparende interventies zoals transformatie, optoppen etc. • het vermogen van industrialisering om vraag te bundelen, ontwerpvrijheid gericht te begrenzen en herhaalbare product- en procesoplossingen te ontwikkelen. Hierdoor kan materiaalgebruik worden teruggedrongen (o.a. door minder overdimensionering en procesverliezen).
Substitutie: vervangen van schaarse en schadelijke materialen	Substitutie wordt ondersteund doordat industrialisering inzet op expliciete ontwerpregels, standaardisatie en kennisvastlegging, wat het toepassen van alternatieve materialen betrouwbaarder en opschaalbaar maakt. Daarnaast wordt een geïndustrialiseerde sector gekenmerkt door afstemming tussen vraag-aanbod en geïntegreerde productiesystemen waardoor de toepassing van gesubstitueerde producten geoptimaliseerd wordt.
Slow the loop: levensduur maximaliseren	Slow the loop sluit aan op industrialisering via (pre-engineered) modulaire, losmaakbare en geprefabriceerde oplossingen die (toekomstig) onderhoud, aanpassing/renovatie, refurbishment en hergebruik eenvoudiger maken. Waardoor de levensduur van componenten en objecten kan worden verlengd. Ook bestaande objecten en elementen kunnen worden voorzien van een pre-engineered aanpak, zoals bijvoorbeeld renovatieconcepten voor standaard typologieën. Met behulp van sociotechnische afstemming zijn processen, contracten en samenwerkingsvormen beter afgestemd zodat deze nieuwe werkwijze gemeengoed kan worden, wat de levensduur van assets verlengt. Door middel van geïntegreerde digitale systemen is het ontsluiten van benodigde data en informatie vereenvoudigd.
Close the loop: kringlopen sluiten door hoogwaardige recycling	Close the loop vraagt om nieuwe (logistieke) processen waardoor continuïteit in kringloop en goede afstemming tussen aanbod en vraag kan plaatsvinden. Dit vereist betere gebouw- en/of productpaspoorten (gecodificeerde materiaal- en objectdata). Door middel van geïntegreerde digitale systemen is het ontsluiten van benodigde data en informatie vereenvoudigd. Ook vraagt dit om andere contractvormen, ketenafstemming en wetgeving om materiaalstromen efficiënt te organiseren (sociotechnische afstemming).

Tabel 4: De koppeling tussen de circulaire strategieën en industrialisering

Hoewel de principes van industrialisering primair zijn ontwikkeld vanuit een productiviteits- en opschalingsperspectief (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026), sluiten zij inhoudelijk sterk aan op de vier circulaire strategieën narrow the loop, substitutie, slow the loop en close the loop.

De vijf principes beschrijven immers de condities waaronder herhaalbare, gestandaardiseerde en schaalbare oplossingen kunnen ontstaan. Daarmee vormen zij niet alleen een basis voor hogere productiviteit, maar ook voor de organisatie van circulariteit.

Tot slot zijn de vier kernkarakteristieken ook ondersteunend aan een circulaire inrichting van de sector.

Tabel 4 beschrijft per circulaire strategie op welke manieren industrialisatie een bijdrage kan leveren en vice versa.

Samengevat versterken beide transities elkaar over de volle breedte. Continuïteit en herhaalbaarheid maken het mogelijk om materiaalstromen systematisch te organiseren en hergebruik te schalen, waarmee circulariteit economisch en organisatorisch haalbaarder wordt.

Standaardisatie, modulariteit en off-site productie leiden tot gecontroleerde productieomstandigheden, efficiënter materiaalbeheer en betere demonteerbaarheid, en dragen bij aan een constantere kwaliteit en langere levensduur van bouwproducten.

Specialisatie maakt het mogelijk gerichter te investeren in de ontwikkeling en toepassing van circulaire producten en materialen. En digitalisering levert de transparante materiaal- en productdata die essentieel is voor materiaalpaspoorten en voor het grootschalig organiseren van hergebruik- en recyclingstromen. De scenario's in het volgende hoofdstuk laten zien hoe deze combinaties in 2050 kunnen uitpakken.

4. Drie beelden van 2050

De uitdagingen zijn geschetst, de kansen vanuit de combinatie van industrialisatie en circulariteit zijn benoemd. Dit hoofdstuk toont drie beelden van een geïndustrialiseerde en circulaire sector in 2050 en daarbij de knoppen waar je aan kunt draaien. Ze dienen voornamelijk als denkgereedschap: door ze naast elkaar te leggen ontstaat zicht op de afwegingen die iedere organisatie en (opschalings-)keten binnen haar eigen route zal moeten maken.

De toekomstvisie schetst een kort algemeen beeld van hoe de bouw- en infrasector er in 2050 uit kan zien wanneer de opgaven daadwerkelijk worden waargemaakt. Het is een beeld dat helpt om te begrijpen wat er nodig is om de stap te maken van de huidige praktijk naar een structureel functionerend systeem.

Om van deze toekomstvisie naar handelingsperspectief te komen, werken we dit uit in drie samenhangende scenario's. Ze maken tastbaar wat er kan gebeuren wanneer in het systeem op verschillende onderwerpen centraal wordt ingezet, zoals industrialisatie, hergebruik of informatiesturing.

Door deze scenario's naast elkaar te zetten, ontstaat inzicht in:

- de systeemgevolgen van verschillende scenario's;
- de spanningen en trade-offs die optreden tussen schaal, circulariteit en flexibiliteit;
- wat dit vraagt van beleid, marktpartijen en investeringskeuzes.

Daarmee helpen de scenario's om lineaire denkpatronen en vanzelfsprekendheden in de huidige praktijk te doorbreken. Ze maken zichtbaar waar bestaande structuren en werkwijzen de transitie belemmeren, en waar juist versnelling mogelijk is.

De drie scenario's vormen geen losse beelden, maar complementaire perspectieven die samen richting geven aan de vraag: wat moeten we vandaag doen om de toekomstvisie waar te maken?

Totstandkoming van de scenario's

De scenario's zijn mede gebaseerd op een analyse van meer dan 100 innovaties uit TBL, inzichten uit werksessies met partijen uit zowel de infrastructuursector als de bouw- en utiliteitsbouw en de expertise van betrokken partijen in dit project. Deze praktijkkennis zorgt ervoor dat de geschetste ontwikkelpaden niet alleen conceptueel zijn, maar ook aansluiten op de realiteit van de sector en de keuzes waar partijen vandaag voor staan. Voor meer informatie, neem contact op met de auteurs.

4.1 Toekomstvisie 2050: De opgave waargemaakt

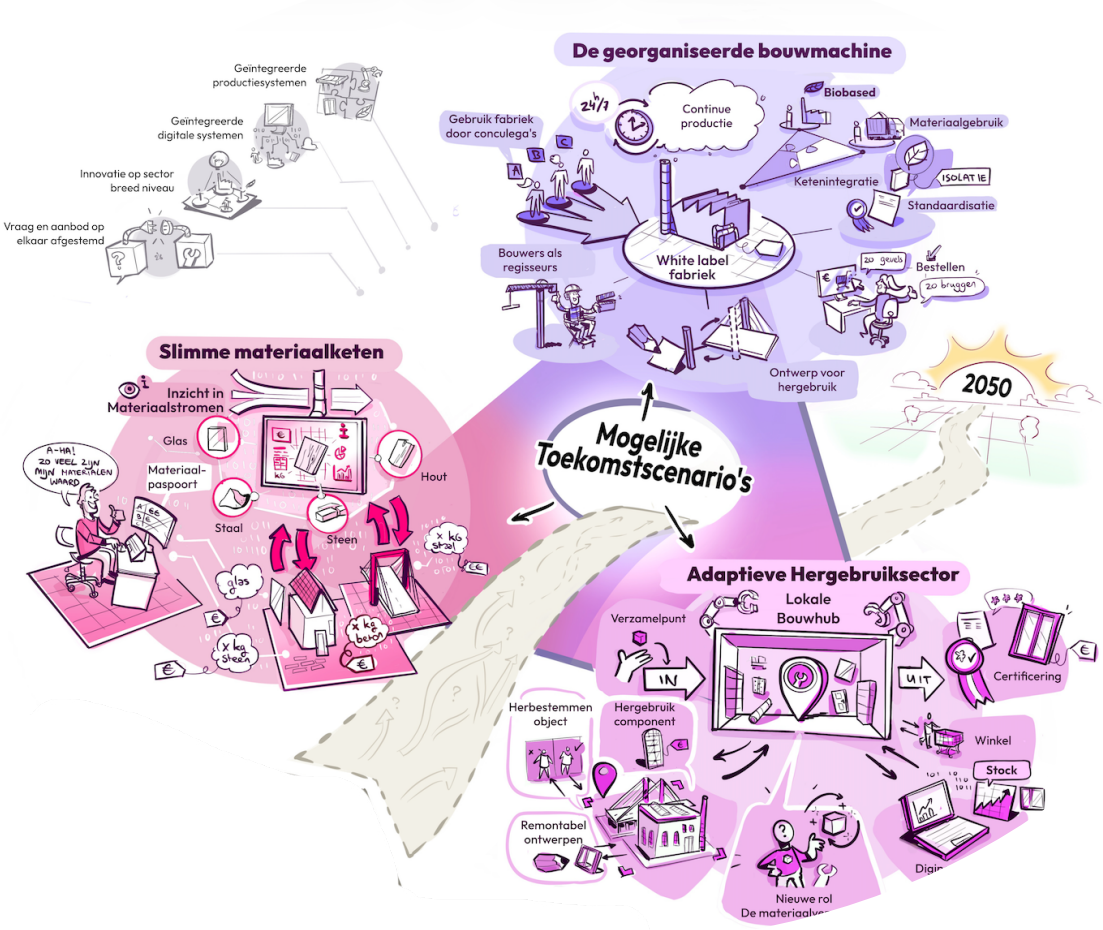
Nederland heeft de opgave van een generatie waargemaakt.
Een kwart eeuw geleden stapelden de uitdagingen zich op: een groot woningtekort, een verouderde infrastructuur die het einde van haar technische levensduur naderde, klimaatdoelstellingen die buiten bereik leken en een bouwsector die door haar versnippering de opgave niet aankon. Het systeem was toe aan verandering.

Het is 2050. Nieuwe woningen zijn gerealiseerd op een schaal die een generatie geleden ondenkbaar leek. Het woningtekort is ingelopen en woningen staan in doordachte, groene leefomgevingen, gebouwd voor de lange termijn. Bruggen, sluizen en wegen die jarenlang op het randje van hun technische levensduur werden beheerd, zijn vervangen en structureel vernieuwd. Biobased en hergebruikte materialen hebben fossiele grondstoffen als industriële norm vervangen.

De bestaande voorraad wordt niet langer als kostenpost beschouwd, maar als grondstoffenbron: gebouwen en infrastructuur worden zorgvuldig gedemonteerd, materialen gecertificeerd en opnieuw ingezet. Wat gebouwd en beheerd wordt, is ontworpen om mee te bewegen met de behoeften van de samenleving, en om aan het einde van zijn functie geen waarde te verliezen.

Dit vergde een fundamenteel andere organisatie van de bouwketen, een andere rol van de overheid als opdrachtgever en normsteller, en een sector die bereid was over projectgrenzen en kortetermijnbelangen heen te kijken. De spanning tussen snelheid, betaalbaarheid en duurzaamheid is verminderd doordat industrialisering, demontabel bouwen en informatiesturing niet als afzonderlijke ambities zijn behandeld, maar als één samenhangende strategie.

De mensen die de sector dragen, hebben zich mee ontwikkeld: van uitvoerder naar regisseur. Vakmanschap is niet verloren gegaan, maar heeft een andere vorm gekregen. Er is een gebouwde omgeving gecreëerd die functioneert, meebeweegt en toekomstbestendig is.



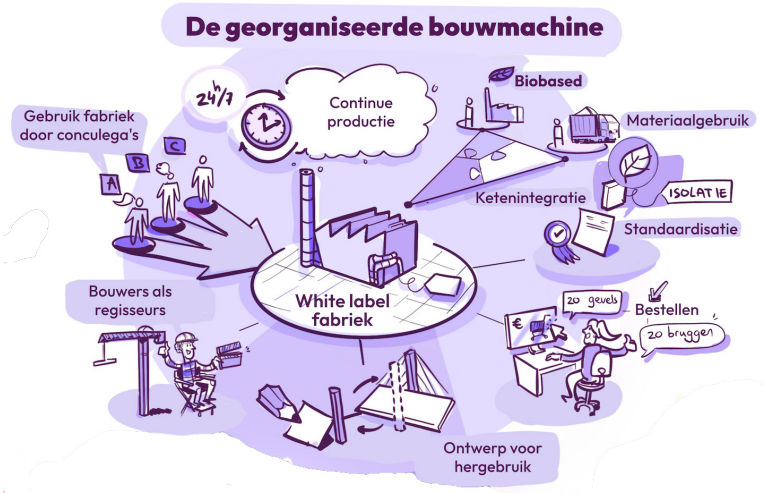
4.2 Scenario 1 - De Georganiseerde Bouwmachine

In dit scenario wordt volledig ingezet op industrialisering van de productie: standaardisatie, schaal en fabrieksmatige precisie. Dit scenario laat zien wat er gebeurt wanneer de sector primair kiest voor voorspelbaarheid, schaal en efficiëntie, en welke consequenties dat heeft voor flexibiliteit en hergebruik.

Dominant in dit scenario: de circulaire strategieën narrow the loop en substitutie, gedragen door de industrialisatieprincipes pre-engineering en continuïteit en herhaalbaarheid.

De bouwsector heeft zich ontwikkeld tot een hoog-geïndustrialiseerde productieketen gebaseerd op programmatische planning en samenwerking op lange termijn. Bouwelementen en infrastructuuronderdelen zijn gebaseerd op herbruikbare en geoptimaliseerde ontwerpen en worden fabrieksmatig geproduceerd. De bouwplaats is geen werkplaats meer, maar een assemblagelocatie van modulaire elementen en onderdelen.

De nadruk ligt ook op minder materiaal in de keten brengen en het vervangen van schaarse en schadelijke materialen. Materiaalhoeveelheden worden aan de voorkant teruggebracht door fabrieksmatige productie en geoptimaliseerde ontwerpen, terwijl biobased bouwsystemen als industriële standaard fossiele grondstoffen op schaal vervangen. De nadruk ligt binnen dit scenario minder op het maximaliseren van de levensduur en het sluiten van kringlopen, omdat ze in de praktijk minder voorkomen.



De georganiseerde bouwmachine in de praktijk

Het industriële systeem

De fabriek als nieuwe bouwplaats

De kern van dit scenario is een hoge mate van standaardisatie en herhaalbaarheid. In de woningbouw worden gebouwen niet meer ontworpen als unieke projecten, maar samengesteld uit gestandaardiseerde elementen die in fabrieken zijn geproduceerd: gevelelementen, vloermodules en geïntegreerde installatiesystemen.

In de infrastructuur geldt hetzelfde principe: brugdelen, verhardingscomponenten en kunstwerken worden fabrieksmatig geproduceerd en op locatie geassembleerd.

White label fabrieken fungeren als knooppunt tussen vraag en aanbod. Zij produceren voor

Toekomstbeeld - De Georganiseerde Bouwmachine
Het is 2050. In een fabriekshal op een industrieterrein worden gevelelementen, vloeren en installatiemodules geproduceerd: uniform, herhaalbaar en elk voorzien van een digitaal materiaalpaspoort. Een gemeente die een school nodig heeft, bestelt de benodigde lokaalmodules uit een catalogus en krijgt deze binnen enkele weken geleverd. Op de bouwplaats worden ze met een kraan geplaatst en gemakkelijk gemonteerd. Brugliggers worden volgens een landelijke norm geassembleerd en binnen een aantal dagen geplaatst, zodat de brug snel weer in gebruik is. Een wooncomplex van tweehonderd woningen is in minder dan twee jaar gereed, waar dat voorheen gemiddeld zeven jaar duurde. Bij schade aan een gevelpaneel wordt het vervangen door een identiek exemplaar; het materiaalpaspoort geeft aan welke. De bouwvakker bewaakt het proces, bedient de kranen en robots en werkt volgens een digitaal ontwerp dat in de ontwerpfase definitief is vastgelegd.

meerdere opdrachtgevers tegelijk volgens uniforme standaarden en maken schaal mogelijk die individuele partijen nooit zouden kunnen realiseren.

Schaal door samenwerking en standaardisatie
Standaarden en normen op kwaliteit, kleur en formaat maken componenten van verschillende fabrikanten uitwisselbaar. Classificeren in standaarden is daarmee een strategische activiteit geworden en bepaalt toegang tot de markt. Nieuwe coördinatiemechanismen voor vraagarticulatie verbinden vraag en aanbod. Transparantie en open standaardisatie zijn geen belemmeringen maar de voorwaarde voor innovatie.

Digitalisering
Digitalisering als ruggengraat van het systeem
Digitalisering is geen hulpmiddel, maar de basis waarop het industriële systeem draait. Van ontwerp tot oplevering lopen alle informatiestromen door gedeelde systemen, maar de beslissende fase is het ontwerp. Het digitale materiaalpaspoort legt achteraf vast wat een element van een object bevat, hoe het is samengesteld en hoe het later demontabel is, daarmee vormt het de basis voor toekomstig hergebruik. In dit geval legt het materiaalpaspoort vast, maar stuurt deze het systeem niet aan. Wijzigingen vinden uitsluitend in de ontwerpfase plaats, daarna is het maken van aanpassingen vrijwel onmogelijk. Dat geeft controle en constante kwaliteit, maar dit maakt het systeem wel star: wat eenmaal vastligt, ligt vast.

Circulariteit
Standaardisatie maakt circulariteit op schaal mogelijk
Circulariteit is ingebouwd in ontwerp en productie aan de voorkant. Biobased bouwsystemen zijn uitgegroeid tot een nieuwe industriële standaard: hernieuwbare materialen van Nederlandse bodem en hout uit duurzaam beheerde Europese bossen worden op grote schaal verwerkt in gestandaardiseerde bouwelementen, die zowel betaalbaar als kwalitatief hoogwaardig zijn. De verwerkende industrie voor biobased grondstoffen in Nederland vervult een cruciale rol als schakel tussen grondstof en bouwproductie. Door deze verwerking en productie te organiseren in samenhangende biobased ketens ontstaat de schaal, voorspelbaarheid en kostenefficiëntie die nodig is voor industrialisatie. Daarmee kunnen biobased bouwsystemen uitgroeien tot een dominante en economisch logische keuze in de sector.
De Milieu Kosten Indicator (MKI) maakt de werkelijke milieukosten zichtbaar in de prijs, waardoor het gestandaardiseerde biobased product de goedkoopste keuze wordt: de financiële logica van de sector is daarmee fundamenteel verschoven. De keerzijde hiervan is dat de bestaande voorraad onderbenut blijft. Levensduurverlenging en hergebruik van wat er al staat zijn ondergeschikt aan de logica van nieuw produceren: het systeem kiest voor de voorspelbare lijn.

Arbeid en rollen
Van vakman naar procesregisseur
De afhankelijkheid van vakmensen op de bouwplaats en langs de weg is sterk afgenomen. De rol van de bouwvakker is verschoven van ambachtelijk bouwen naar assemblage en procesregie: het werk is procesmatiger, minder fysiek belastend en sterker gestuurd door digitale ontwerpen en machines. Dat brengt ook uitdagingen met zich mee: het ambachtelijke vakmanschap en de impliciete kennis van het unieke gebouw neemt sterk af, terwijl de nieuwe digitale en industriële vaardigheden die ervoor in de plaats komen nog ontwikkeld moeten worden.

De keten als collectief
De samenwerking is geïntegreerd vanaf de start, en de rol van de opdrachtgever is daarin veranderd: van een partij die losse projecten aanbesteedt naar een partij die vraag bundelt en zich programmatisch en langjarig verbindt. Die gebundelde vraag geeft de fabriek de ruimte om als regisseur het ritme van productie, logistiek en assemblage te bepalen. Risico's en opbrengsten worden gedeeld, wat andere contractvormen vraagt dan de sector gewend was. Langdurige partnerschappen zijn de norm, waarbij project- en gemeentegrenzen worden doorbroken. Dat versnelt en stroomlijnt, maar concentreert ook macht en beperkt de lokale grip op maatwerk.

4.3 Scenario 2 - De Adaptieve Hergebruiksector

In dit scenario wordt volledig ingezet op het benutten van wat er al is: hergebruik, transformatie en levensduurverlenging zijn de norm. Dit scenario laat zien wat er gebeurt wanneer de sector primair kiest voor waardebehoud en levensduurverlenging en welke consequenties dat heeft voor snelheid en schaalbaarheid.

Dominant in dit scenario: de circulaire strategie slow the loop, gedragen door de industrialisatieprincipes specialisatie en sociotechnische afstemming.

De bouw- en infrasector richt zich primair op het zo lang mogelijk benutten van bestaande objecten, materialen en structuren, mede door het gebruik van modulaire elementen. Gebouwen, kunstwerken en infrastructuur worden gezien als tijdelijke configuraties van materialen die op enig moment weer gedemonteerd en opnieuw ingezet kunnen worden. Nieuwbouw is de uitzondering geworden.
Het maximaliseren van de levensduur staat centraal. Levensduurverlenging, transformatie en het hergebruik van componenten zijn de norm; nieuwbouw is de uitzondering. De kringloop wordt in de eerste plaats via hergebruik gesloten. Recycling tot grondstof komt pas in beeld wanneer hergebruik niet langer mogelijk is.

Adaptief hergebruik in de praktijk
Het industriële systeem

Van bouwen naar beheren
De bouw is van karakter veranderd: het is een beheer- en aanpassingssector geworden.



Gebouwen, kunstwerken en infrastructuur worden ontworpen als tijdelijke configuraties. Het zijn samenstellingen van materialen die op enig moment weer gedemonteerd en opnieuw ingezet kunnen worden. Dit vereist een nieuwe logistieke infrastructuur: circulaire hubs die als onderdeel van een (Europees) netwerk met elkaar schakelen voor het in balans brengen van vraag en aanbod, die grootschalig inzamelen, industrieel schoonmaken, opknappen en hersorteren. Een digitale marktplaats helpt hierbij en koppelt vraag en aanbod van hergebruikte materialen en maakt de waardeketen transparant voor alle partijen in de keten.

Classificatie, registratie en true pricing
Waarde geven door classificatie is een kernactiviteit geworden: elk materiaal krijgt bij demontage een kwaliteitsoordeel dat zijn toepassingsmogelijkheden en restwaarde bepaalt. Goede assetregistratie is daarvoor de basis. True pricing via de MKI maakt de werkelijke milieuwaarde van hergebruikte materialen zichtbaar, waardoor hergebruik ook financieel aantrekkelijker wordt dan nieuw produceren.

Toekomstbeeld - De Adaptieve Hergebruiksector
Het is 2050. In een leeggekomen kantoorpand demonteert een gespecialiseerd team de systeemwanden, vloeren en kozijnen onderdeel voor onderdeel. Elk element gaat naar een regionale bouwhub, waar het wordt schoongemaakt, opnieuw beoordeeld en gecertificeerd. Bij die beoordeling blijft het oordeel van een ervaren inspecteur belangrijk, naast de digitale gegevens. Verderop wordt een woonblok gebouwd dat voor een groot deel bestaat uit materialen van een getransformeerd winkelcentrum; het digitale paspoort van dat centrum maakte duidelijk wat herbruikbaar was. Een leegstaand kantoor wordt omgebouwd tot woningen in plaats van gesloopt, en een verouderde brug wordt versterkt in plaats van vervangen. Nieuwbouw bestaat nog, maar is de uitzondering geworden. De sector werkt vooral met wat er al is.

Digitalisering
Data maakt het bestaande inzichtelijk
Digitalisering is een voorwaarde om hergebruik op grote schaal mogelijk te maken. Digitale materiaalpaspoorten vormen de kern en werken hier als een catalogus. Deze leggen vast wat een element bevat, hoe het is samengesteld en hoe het gedemonteerd kan worden. Met die kennis verandert een bestaand gebouw in een lijst van inzetbare materialen. Onderhoud wordt gepland op basis van werkelijke toestand in plaats van vaste schema's, wat materiaal en capaciteit bespaart.

Circulariteit
Hergebruik krijgt de hoogste prioriteit
De vraag naar nieuw materiaal is laag. De hoogste prioriteit ligt bij levensduurverlenging en hergebruik, materiaalverwerking tot grondstof vindt pas plaats als hergebruik niet meer mogelijk is. Daarmee blijft materiaalwaarde zo lang mogelijk behouden en wordt de instroom van nieuwe materialen beperkt.
Waar aanvullend materiaal nodig is, wordt ingezet op secundaire en hernieuwbare grondstoffen. De keuze voor materiaal wordt daarbij niet primair bepaald door herkomst (biobased of niet), maar door de mate waarin het zijn waarde behoudt en opnieuw kan worden ingezet.

Door de sterke focus op hergebruik blijft de inzet van biobased materialen in dit scenario aanvullend en wordt de materiaalvraag primair gedekt door de bestaande gebouwde omgeving. Hierdoor verschuift de rol van nieuwe materiaalproductie. Er ontstaat een relatief kleinere biobased industrie in Nederland, gericht op het aanvullen van materiaalstromen waar hergebruik en recycling onvoldoende voorzien.

Industriële renovatiesystemen maken het mogelijk om bestaande gebouwen snel en schaalbaar aan te passen: plug-and-play renovatieconcepten worden toegepast in de gehele renovatieketen, ondersteund door digitale materiaalpaspoorten die de kwaliteit van materialen borgen. Structuren worden ontworpen voor flexibiliteit: zowel de functie als de inrichting van een gebouw of infrastructuur kan veranderen zonder dat de draagstructuur hoeft te worden aangepast.

Arbeid en rollen
Vakmanschap transformeert en nieuwe beroepen ontstaan
Nieuwe beroepen zijn ontstaan rond inspectie, certificering, demontage en herconfiguratie. Robots ondersteunen het zware en repetitieve werk, maar menselijk oordeel blijft onmisbaar bij classificatie, herconfiguratie en de beoordeling van materialen. De transitie naar een hergebruiksector vraagt gerichte ontwikkeling van nieuwe vaardigheden: opleidingen moeten worden bijgestuurd op inspectie, digitale registratie en het werken met hergebruikte materialen.

Een nieuwe markt vraagt nieuwe spelers
Nieuwe logistieke partners hebben een prominente en structurele plek in de keten gekregen. Naast aannemers en ontwerpers zijn er ketenspelers die gespecialiseerd zijn in de verwerking, opslag en distributie van secundaire materialen.

Gemeenten, regio's en marktpartijen kunnen de opgave gezamenlijk organiseren
Gedeelde standaarden en langdurige samenwerkingsverbanden tussen publieke opdrachtgevers en de markt maken het mogelijk om te investeren in gedeelde voorzieningen voor inzameling, sortering en hergebruik. Regionale dienstverlening voor assetmanagement vormt een belangrijke markt: partijen bieden beheer, inspectie en onderhoud als dienst aan.

4.4 Scenario 3 - De Slimme Materiaalketen

In dit scenario wordt volledig ingezet op informatiesturing. Data over materialen vormt het fundament voor elke beslissing in de keten. Dit scenario laat zien wat er gebeurt wanneer de sector primair stuurt op data en optimalisatie, en welke afhankelijkheden en systeemrisico's dat met zich meebrengt.

Dominant in dit scenario: de datagedreven afweging tussen alle vier de circulaire strategieën, gedragen door het industrialisatieprincipe kenniscodificatie en de kernkarakteristiek geïntegreerde digitale systemen.

De bouwsector wordt volledig geleid door informatiestromen die de traditionele grenzen tussen ontwerp, realisatie en demontage doorbreken. Niet alleen de digitale dimensie van deze informatiestromen overstijgt de traditionele grenzen, maar dit gebeurt ook op organisatorische en contractuele dimensies. Hierdoor sluiten vraag en aanbod van secundaire materialen automatisch en naadloos op elkaar aan.

De dominante circulaire logica is hier niet één strategie, maar de datagedreven afweging tussen alle vier. Het systeem optimaliseert continu de meest waardevolle bestemming voor een materiaal en weegt daarbij het maximaliseren van de levensduur af tegen het sluiten van de kringloop via hoogwaardige recycling. Het verminderen van de materiaalinzet komt terug in de materiaalraming die al in de ontwerpfase plaatsvindt, en het vervangen van schaarse



en schadelijke materialen door biobased alternatieven vormt een geïntegreerd onderdeel van de materiaalstrategie.

De slimme materiaalketen in de praktijk

Het industriële systeem

Digitalisering vormt de basis voor alle belangrijke beslissingen in de keten

De kern van dit scenario is een informatielaag die boven op de fysieke materiaalstromen ligt en die voortdurend de meest waardevolle bestemming voor elk materiaal berekent. Urban mining is verankerd in de sector: de bestaande stad is een grondstoffenbron geworden waarvan de voorraad nauwkeurig in kaart is gebracht. Beslissingen over hergebruik of verwerking worden gestuurd door real-time data, niet door gewoonte of ervaring alleen.

Materialisering en materiaalpaspoorten borgen vanaf de voorkant

Ontwerpers en opdrachtgevers weten al in de ontwerpfase wat een gebouw of

Toekomstbeeld - De Slimme Materiaalketen

Het is 2050. Een materiaalmanager ziet op een dashboard in real time waar elk materiaal van een te transformeren ziekenhuis naartoe gaat; de gevelelementen zijn al geclaimd nog voor de eerste sloophamer viel. Elk gebouw en infrastructuurobject heeft een digitale identiteit die zijn toestand doorgeeft: een viaduct meldt zelf dat het nog acht jaar meegaat, en het systeem weet al waar zijn liggers daarna naartoe gaan. In een ontwerpstudio schuift een architect aan een parametrisch model dat is gekoppeld aan de landelijke materiaaldatabase en live doorrekent wat elke keuze betekent voor beschikbaarheid, impact en restwaarde, AI voorspelt daarbij welke materialen wanneer vrijkomen. De Rotterdamse haven brengt als Europees knooppunt de materiaalstromen samen en herverdeelt ze. Verspilling is vrijwel onmogelijk geworden: het systeem weet altijd meer dan de individuele partij alleen.

infrastructuurobject aan materiaalwaarde bevat, wat het kost om het te demonteren en wat de restwaarde is aan het einde van de levensduur. Die raming wordt gevoed door dezelfde data die de rest van de keten gebruikt.

Digitalisering

Elk materiaal heeft een digitale identiteit

Digitalisering is het fundament waarop alle beslissingen rusten; zowel ecologische als monetaire stromen zijn daardoor continu meetbaar en stuurbaar. Het materiaalpaspoort is een levend document: het wordt continu bijgewerkt en is precies de informatie waarop het systeem zijn afwegingen baseert.

Dataplatform maakt de keten stuurbaar

Om de ketens te verbinden is een gezamenlijke digitale infrastructuur ontwikkeld. Het platform standaardiseert de data-uitwisseling tussen partijen en sluit aan op de Europese regelgeving rond materiaalpaspoorten en bouwproducten. Monitoring is onmisbaar: sensoren, digitale tweelingen en registratiesystemen houden continu bij wat de toestand van een materiaal is, zodat ingrijpen op het juiste moment mogelijk wordt. Goede assetregistratie is daarvoor de basis. Besparingen worden continu gemonitord als sturingsinstrument in real time. Nieuwe coördinatiemechanismen in de sector verbinden vraag en aanbod van secundaire materialen structureel.

Circulariteit

Optimalisatie van materiaalverwerking en -gebruik

Circulaire prestaties worden continu geoptimaliseerd omdat het systeem altijd de meest waardevolle bestemming voor een materiaal kan berekenen. Hoogwaardige recycling wordt gecombineerd met selectief hergebruik: wat niet meer te hergebruiken is, gaat naar de best beschikbare verwerkingsroute.
Biobased materialen maken onderdeel uit van de mogelijke oplossingsrichtingen, waarbij het systeem continu bepaalt wanneer inzet de meest waardevolle keuze is ten opzichte van hergebruik of recycling.

Circulaire besluitvorming is evidence-based: keuzes over gebruik, hergebruik, recycling of verwerking worden gemaakt op basis van data over milieu-impact, kosten en kwaliteit. Het systeem stuurt daarbij niet op één afzonderlijke doelstelling, maar optimaliseert continu de totale waarde van materialen over de levenscyclus. Milieu-impact, kosten, beschikbaarheid en restwaarde worden integraal afgewogen, waarbij instrumenten zoals de MKI de werkelijke milieukosten inzichtelijk maken en direct meewegen in de keuze voor de meest waardevolle bestemming. Hierdoor valt de meest duurzame keuze in veel gevallen samen met de economisch optimale uitkomst op systeemniveau.

Arbeid en rollen

De bouwer wordt analist

Handmatige arbeid neemt af; analytische en regierollen nemen toe. Materiaalmanagers en -makelaars zijn nieuwe beroepen die vraag en aanbod van secundaire materialen bij elkaar brengen en de waardeketen optimaliseren. Onderwijs en opleidingen zijn fors bijgestuurd op het digitale component. Via regionale innovatiehubs worden nieuwe vaardigheden ontwikkeld die aansluiten op de datagedreven en geïndustrialiseerde werkwijzen van de sector.

Institutionele samenwerking als randvoorwaarde

Partijen werken structureel samen en delen informatie, sluiten hun systemen op elkaar aan en investeren gezamenlijk in de infrastructuur die datagedreven ketensturing mogelijk maakt. Gedeelde standaarden en langdurige samenwerking tussen publieke opdrachtgevers en de markt zijn daarbij de norm geworden.Gemeenten fungeren als hub orchestrator. Waar het platform en de materiaalmakelaars de allocatie en optimalisatie van materiaalstromen verzorgen, borgen gemeenten de fysieke knooppunten: zij wijzen plekken toe voor circulaire hubs, coördineren de stromen in hun regio en zorgen dat die hubs als onderdeel van een Europees netwerk goed functioneren. Daarmee blijft de logistieke keten neutraal en in publieke handen, terwijl de matching via de markt verloopt.

Zie tabel 5 voor een vergelijking van de scenaior’s

Scenario	Voordelen	Keerzijden
1. De Georganiseerde Bouwmachine	• Kortere bouwtijden door productiviteitsgroei, lagere faalkosten en een hogere, constante kwaliteit door gecontroleerde productie. • Verminderde fysieke belasting voor bouwmedewerkers. • Kostenefficiëntie door grote schaal. • Minder materiaalgebruik aan de voorkant door geoptimaliseerd ontwerp. • Substitutie van fossiele grondstoffen door biobased systemen op industriële schaal.	• Minder ruimte voor lokale oplossingen en maatwerk. Na de ontwerpfase is bijsturen vrijwel onmogelijk. • Hoge investeringsdrempels en risico op lock-in in standaarden. Wie de norm bezit, bezit de markt. • Vakmensen hebben nieuwe vaardigheden nodig die de sector nog moet ontwikkelen. • Gedeelde risico's en opbrengsten vragen om nieuwe samenwerkings- en contractvormen.
2. De Adaptieve Hergebruiksector	• Maximaal behoud van materiaalwaarde door levensduurverlenging en hergebruik vóór recycling. • Lokale en regionale economische activiteit door hubs en nieuwe beroepen. • Hoge werkgelegenheid met ruimte voor vakmanschap. • Flexibele structuren die meegroeien met veranderende behoeften.	• Grote afhankelijkheid van menselijk handelen en gedrag. Het arbeidsintensieve en oordeelsgebonden werk laat zich moeilijker automatiseren en standaardiseren. • Maximaal hergebruik botst met snelheid en schaalbaarheid. Het aanbod hangt af van wat er vrijkomt bij demontage en transformatie, waardoor de sector lastig kan opschalen wanneer de vraag naar woningen en infrastructuur hoog blijft. • Nieuwe logistieke ketens en certificeringssystemen vragen forse investeringen en institutionele afstemming. • Het opslaan, sorteren en industrieel verwerken van vrijgekomen materialen vraagt om veel fysieke ruimte, die schaars is.
3. De Slimme Materiaalketen	• Minder verspilling door evidence-based besluitvorming over materiaalstromen. • Continu geoptimaliseerde circulaire prestaties door real-time datasturing. • Nauwkeurige raming van materialisering direct vanaf de ontwerpfase. • Urban mining als volwassen bedrijfstak: de bestaande stad als grondstoffenbron.	• Optimale sturing staat tegenover maximale afhankelijkheid. De hele keten draait op data, standaarden en digitale infrastructuur; een storing, datalek of uitval raakt niet één project, maar meteen de hele keten. • Vereist omvangrijke investeringen in digitale infrastructuur en institutionele samenwerking die nu nog ontbreekt. • Goede assetregistratie is een randvoorwaarde die nu nog lang niet overal op orde is. • Nieuwe digitale vaardigheden zijn nodig die de huidige beroepsbevolking grotendeels nog niet heeft.

Tabel 5: Vergelijking tussen de scenario's

5. Zelf routes uitzetten naar 2050

Wie de uitdagingen kent, de knoppen begrijpt en de drie beelden van 2050 heeft gezien, kan aan de slag met het maken van routekaarten om zo effectief mogelijk toe te werken naar het oplossen van onze grote opgaven. Dit slothoofdstuk reikt daarvoor de aanknopingspunten aan: de kern van de opgave, hoe om te gaan met de scenario's en welke belangrijke vragen centraal staan om zelf mee aan de slag te gaan, en erachter te komen hoe en of je bijdraagt aan de sector die we in 2050 bereikt willen hebben.

Na afloop van het Nationaal Groeifonds programma Toekomstbestendige Leefomgeving richting 2030, zijn we er nog niet. Als we die plannen weten te volbrengen zoals we ze nu voor ogen hebben, dan is er nog een aardige weg te gaan. Met dit document proberen we een aantal van de mogelijkheden na afloop te schetsen als referentiekader om over die vervolgstappen na te denken.

De grootste opgave ligt niet in het ontwikkelen van nieuwe oplossingen, maar in het op schaal (anders)organiseren van de sector. Veel oplossingen zijn al beschikbaar, maar blijven versnipperd en kleinschalig zolang de voorwaarden voor opschaling ontbreken. Zie hieronder een aantal aanbevelingen om aan de slag te gaan met hetgeen we in dit document presenteren.

1. Zet de scenario's in om in jouw keten te toetsen hoe het ideale scenario er voor jullie uit ziet: Bespreek met ketenpartners en omringende organisaties welk van de scenario's je aanspreekt en waarom. In bijlage 5 vind je een canvas die je kunt gebruiken hiervoor. Welke elementen uit een scenario vind je vanuit jouw rol belangrijk om naar toe te werken? Probeer ook scherp te krijgen wat er moet veranderen om een scenario uit te laten komen. Wie is aan zet voor welke stappen? Wat als een van de scenario's volgend jaar uitgekomen is, wat heeft er voor gezorgd dat dit lukte?
2. De scenario's zijn geen voorspelling, maar bieden een tastbare vorm van mogelijkheden waar je het mee eens, of oneens kan zijn. Probeer te duiden met welke elementen je het eens of oneens bent en bespreek dat met je ketenpartners. Hiermee kun je het gesprek voeren over uitbreidingen of varianten op de scenario's. Hoe dragen activiteiten bij aan het waarmaken van deze karakteristieken? Door met elkaar de mogelijkheden te doorleven, elkaars perspectief te begrijpen kun je gericht oplossingen realiseren die voor de keten werken.
3. Probeer met elkaar een ritme te vinden waarin je dit soort scenario's, de consequenties van de keuzes die daartoe leiden en de routes er naartoe bespreekt. Denk aan kleinere aanpassingen die je elke 6 maanden of elk jaar bespreekt en de grote lijnen elke paar jaar herijkt. Zo blijft de keten in staat om, om te gaan met veranderingen.
4. Een rechte lijn naar de toekomst bestaat niet. Sommige activiteiten zullen zich richten op het optimaliseren van de huidige operatie en sommige juist op het optuigen van een nieuw soort ketensamenwerking. Door hier onderscheid in te maken kun je keuzes maken over waar de focus moet zijn, en werk je niet ontzettend hard aan het oude systeem in stand houden terwijl je daarvan af wilt.

Zoals aan het begin van dit document staat, levert dit document de middelen om aan de slag te gaan met jouw route naar de toekomst. Dit rapport heeft de bouwstenen voor routekaarten aangereikt: een beeld van de uitdagingen, de knoppen van circulariteit en industrialisatie, en drie beelden van 2050 die de afwegingen zichtbaar maken.

Dit biedt de handvatten om zelf aan de slag te gaan met het opstellen (en regelmatig bijstellen) van de routekaart voor jouw organisatie en de keten waar je deel van uitmaakt. Opdrachtgevers, marktpartijen en beleidsmakers kunnen met deze bouwstenen hun eigen route naar 2050 uitstippelen. Dat is niet eenmalig, maar is juist een oefening die we vaker kunnen doen, om onszelf te blijven afvragen; zijn we het juiste aan het doen? Wat dat juiste is, is antwoord op de kernvraag: hoe organiseren we de bouw- en infrasector zó, dat snelheid, betaalbaarheid, duurzaamheid en productiviteit elkaar versterken binnen een nieuw toekomstbestendig industrieel en circulair systeem?

Bijlagen

Bijlage 1: De vijf principes van industrialisatie

De principes die ten grondslag liggen aan de transitie van industrialisatie manifesteren zich op meerdere niveaus en bieden ruimte voor contextuele interpretatie en implementatie. Ze werken niet los van elkaar, maar versterken elkaar juist. De principes zijn als volgt: Continuïteit en herhaalbaarheid, Specialisatie, Kenniscodificatie, Pre-engineering en Sociotechnische afstemming (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

Deze principes kunnen worden gebruikt om de volgende transitie in de bouwsector te operationaliseren: van een traditionele design-to-product perspectief, waar ieder project als uniek wordt gezien, naar product-to-design perspectief, wat een nadruk legt op systeemdenken (Van Ee, 2022). De focus op systeemdenken is ook van belang in de praktische toepassing van de aan de principes verbonden methodes en technologieën. Deze moeten gecoördineerd en in samenspel met elkaar worden toegepast, om zo condities te creëren voor effectieve adoptie en opschaling van productiviteitsverhogende activiteiten in de keten (Brouwer, 2024).

Continuïteit en herhaalbaarheid
De bouwsector functioneert gefragmenteerd en projectmatig, wat leidt tot hogere kosten, inefficiënties en vertraagde oplevering (Dubois & Gadde, 2002). Terwijl de markt het meest optimaal functioneert bij een constante vraag (EIB, 2022). Een continue aanvoer van gestandaardiseerde vraag zorgt voor een stabiele en voorspelbare omgeving wat ruimte biedt voor het opschalen van werkstromen en ketens (EIB, 2022).

Het principe van continuïteit en herhaalbaarheid sluit aan op de behoefte van een constante vraag en wordt gedefinieerd als volgt: een focus op continue operaties en het ondersteunen van hergebruik van gegevens, methoden, producten en processen (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

In de praktijk vertaalt zich dit in het bundelen van de vraag, bijvoorbeeld door middel van programmatische en portfolio-gebaseerde planning en contracten om voorspelbare werkbelastingen te creëren die de industriële activiteiten in stand houden (Eriksson et al., 2014; EIB, 2022; van Groesen, 2022). Daarnaast omvat het langetermijnintegratie van de keten, waarbij langetermijnsamenwerkingen, (team) continuïteit en gesynchroniseerde processen op locatie en buiten de fabriek voor het handhaven van een constante productiestroom (Vrijhoef en Koskela, 2005; Söderholm, 2010; Lessing, 2015; Pottachola, 2024). Continuïteit is niet alleen gericht op de operationele keten maar vraagt ook vraagarticulatie, bundeling en passende beleids- en contractkaders.

In essentie draait het om een transitie van gefragmenteerde en eenmalige projecten naar een procesmatige aanpak waarin de productie en logistiek losstaat van een individueel project (Eriksson et al., 2014). Dit resulteert in het realiseren van schaalbare en voorspelbare processen, optimaliseren van middelenallocatie, reduceren van kosten en doorlooptijden. Daarnaast stimuleert het innovatie, hergebruik van data en modulaire oplossingen binnen projecten (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).
Specialisatie
Door continuïteit in werkstromen te realiseren wordt er ruimte gecreëerd voor het versimpelen van werkstromen. Dit houdt in dat diversiteit en complexiteit verminderd moeten worden. Hierdoor kunnen de focus en middelen verschuiven naar specifieke producten of

diensten (Vrijhoef & Koskela, 2005). Dit betekent niet dat partijen minder waarde leveren, maar dat zij gerichter kiezen waar zij binnen een keten en productplatform onderscheidend en efficiënt kunnen zijn. Met als gevolg verhoogde efficiëntie en verbeteren van functioneren. Specialisatie wordt gedefinieerd als: het richten van middelen en expertise op een specifieke, beperkte scope van assets of diensten door werkstromen te vereenvoudigen en de complexiteit van het portfolio te verminderen (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026). Dit omvat een verschuiving van een generalistisch en projectmatig perspectief naar een product- en procesgeoriënteerd perspectief. Praktisch gezien ligt de focus op het strategisch limiteren van oplossingsrichtingen (Stout, 2016), marktsegmentatie en het ontwikkelen van specialistische oplossingen die aansluiten bij een herhaalbaar productieproces (Vrijhoef & Koskela, 2005). Op organisatieniveau wordt specialisatie getekend door het opzetten van permanente teams en een verschil tussen sleutel- en ondersteunende competenties (Vrijhoef & Koskela, 2005; Lessing, 2015).

Op ketenniveau ligt de focus op een verschuiving van projectmatig subcontractueel werken naar strategische langetermijnsamenwerkingen, om zo opbouwende kennisontwikkeling en vroegtijdige implementatie van gespecialiseerde kennis te faciliteren (van Ee, 2022; van Groesen, 2022; Pottachola, 2024).

In de basis zorgt specialisatie voor het verbeteren van de organisatie-technische vaardigheden, het versimpelt portfoliomanagement en maakt het mogelijk om kwalitatief hoogwaardige en maatwerkoplossingen te leveren voor type interventies of assets (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

Kenniscodificatie
Door de gefragmenteerde en projectmatige cultuur van de bouw- en infrasector techniekssector gaat er vaak kennis verloren doordat teams na afronding van projecten opgeheven worden (Dubois & Gadde, 2002). Veel van deze kennis is impliciet en ervaringsdeskundigheid, waardoor kansen gemist worden om te leren van fouten en te verbeteren (Pottachola, 2024). Daarnaast gaat veel van deze kennis en ervaring verloren wanneer mensen naar andere organisaties of met pensioen gaan (Pottachola, 2024).

Het principe van kenniscodificatie focust op het overbrengen van impliciete- en ervaringsdeskundigheid en het omzetten naar expliciete, herbruikbare kennis wat binnen de organisatie blijft. Het wordt gedefinieerd als: het formaliseren en vastleggen van impliciete kennis in gestructureerde systemen om ervoor te zorgen dat deze behouden blijft, hergebruikt wordt, en continue verbetering mogelijk maakt binnen organisaties, projecten en individuen (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

Denk bij kenniscodificatie aan het formaliseren van keuzelogica, om heruitvinding te verminderen (Stout, 2016; Andersson & Lessing, 2007). Het omvat het structureren van informatie over interoperabiliteit en machine-leesbaarheid door middel van gestandaardiseerde dataformats, taxonomieën, en gedeelde data-infrastructuur (Van Ee, 2022; Pottachola, 2024). Daarnaast zijn feedback loops van belang voor een continu leerproces. Ook omvat kenniscodificatie het gebruik van digitale tools zoals semantische modellen, BIM en design configuratoren, hier ligt de focus op gecodificeerde kennis in projecten te behouden, toe te passen en verder te ontwikkelen (Cao et al., 2021; van Ee, 2022; Pottachola, 2024).

Dus kenniscodificatie zorgt ervoor dat organisaties systematisch voort kunnen bouwen op opgedane kennis en ervaring, het verbeteren van besluitvorming, uitvoering en langetermijnplanning. Dit verzekert het behoud van kennis en expertise wanneer individuen vertrekken, faciliteert snellere onboarding en voorkomt herhaling van problemen of het heruitvinden van oplossingen (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

Pre-engineering
In een sector die wordt getekend door uniekheid van projecten worden overeenkomsten

tussen projecten vaak nog over het hoofd gezien (Bletsis, 2020; EIB, 2022). Dit heeft als gevolg dat de sector standaardisatie niet optimaal benut en daarmee beperkt gebruik maakt van schaalbaarheid (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

Pre-engineering is het principe van het ontwikkelen van herbruikbare processen en producten door standaardisatie en vooraf gedefinieerde methoden, waardoor schaalbaarheid mogelijk wordt en de afhankelijkheid van op maat gemaakte project-specifieke inspanningen wordt verminderd (Pottachola, Bletsis & Verschuuren).

Praktisch gezien omvat pre-engineering vaak de decompositie van complexe systemen in modulaire componenten (Stout, 2016; van Groesen, 2022), de ontwikkeling van productplatformen (Knippenberg et al., 2019; van Ee, 2022) en bouwpakketten met onderdelen (Cao et al., 2021) als centrale mechanismen. Hierdoor worden configuratiegebaseerde oplossingen mogelijk, terwijl de variabiliteit expliciet wordt beperkt tot afzonderlijke modules of onderdelen van concepten waarop de markt dat wenst of eist. Het begrenzen van de variabiliteit is noodzakelijk, omdat maatwerk anders de standaard blijft. Tegelijkertijd maakt het meer herbruikbaarheid mogelijk.

Door pre-engineering vindt er een verschuiving plaats in het ontwerpproces, keuzes worden aan het begin van het proces genomen, ze staan vroeg definitief vast en leveranciers worden vroegtijdig in het ontwerpproces meegenomen (Wuni & Shen, 2020) om onzekerheid stroomafwaarts in de keten te verminderen. Ook omvat pre-engineering de verschuiving van engineer-to-order naar configure-to-order, dit vraagt om ontwerp en productie beter op elkaar aan te sluiten door ‘Design for Manufacture and Assembly’ (DfMA). Dit stimuleert de transitie van bouwen op locatie naar productiegerichte processen, met nadruk op offsite en hybride productie (Eriksson et al., 2014; Pottachola, 2024).

Dus pre-engineering versnelt het opleveren van projecten door minder op maat gemaakt werk te leveren en daarmee de ontwerp- en doorlooptijd te verkorten en het verbetert marktproductiviteit door herbruikbare en geoptimaliseerde ontwerpen en processen. Daarnaast stimuleert het de ontwikkeling van duurzame en circulaire methoden en processen (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

Sociotechnische afstemming
De bouwsector is verticaal (tussen projectfases), horizontaal (tussen expertises) en longitudinaal (tussen projecten) gefragmenteerd (Adriaanse, 2014). Dit heeft als gevolg dat er een mismatch is tussen het sociale systeem (mensen, contracten, organisaties) en het technische systeem (processen, technologie, hulpmiddelen) (Pottachola, 2024). Industrialisatie vraagt om een collectieve inspanning voor gezamenlijke doelen en het samenbrengen van de twee systemen (Pottachola, Bletsis, & Verschuuren, 2026).

Het principe van sociotechnische afstemming heeft het samenbrengen van deze twee systemen als doel. Het wordt als volgt beschreven: het bereiken van afstemming tussen sociale systemen (mensen, contracten en organisaties) en technische systemen (producten, processen en technologieën), zodat middelen gecoördineerd functioneren binnen een groter operationeel kader (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

In de praktijk vertaalt dit zich in het afstemmen van contractuele, organisatorische, culturele en digitale dimensies van industrialisatie (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026). Zowel de markt als overheid kunnen hier een rol in spelen met behulp van mechanismen zoals onder andere contracten, governance, datadeling, rolverdeling en KPI’s.

Contractuele raamwerken die samenwerking stimuleren, gedeelde risico’s vastleggen en stakeholder management structuren zijn essentieel om de doelstellingen over industrialisatie te behalen (Vrijhoef & Koskela, 2019; Bletsis, 2020). Mede omdat traditionele contracten vaak niet ten gunste komen van een industriële manier van werken (Eriksson et al., 2014; Bletsis, 2020). Naast formele overeenkomsten zijn informele overeenkomsten, zoals gedeeld

situationeel bewustzijn (Bletsis, 2020; Pottachola, 2024) of culturen gefocust op vertrouwen en transparantie belangrijk (Stout, 2016). Ook is het overeenstemmen van digitale systemen met organisatorische workflows belangrijk (Pottachola, 2024).

In het kort; door sociotechnische afstemming worden prioriteiten en middelen van stakeholders op elkaar afgestemd, wat effectieve samenwerking bij grootschalige opgaven mogelijk maakt. Tegelijkertijd wordt hiermee het volledige potentieel van productplatformen ontsloten (Pottachola, Bletsis & Verschuuren, 2026).

Bijlage 2: De vier kernkarakteristieken van een geïndustrialiseerde bouw- en infrasector

Methodologische onderbouwing kernkarakteristieken geïndustrialiseerde bouw- en infrasector

Het doel was om tot een omschrijving van de toekomstige bouw- en infrasector te komen die geïndustrialiseerd is. In de basis is dat een sector die in staat is om de reorganisatie zoals benoemd in de definitie van industrialisatie te komen.

De omschrijving van deze sector heeft geresulteerd in vier kernkarakteristieken van een geïndustrialiseerd bouw- en infrasector . Deze zijn bepaald tijdens vijf sessies met vijf TNO-experts, met diverse expertise op het gebied van industrialisatie in de woningbouw en infrastructuursector. Deze sessies waren iteratief van aard; nadat de karakteristieken bepaald waren zijn deze uitgewerkt op sector-, keten- en organisatieniveau. Op basis hiervan kunnen verschillende toekomstbeelden worden uitgewerkt voor zowel renovatie van bestaande woningen, woningbouw als de instandhouding en vernieuwing van infrastructuur.

Hiervoor is het raamwerk van Lessing (2015) voor 'industrialised house-building' en de adaptatie voor infrastructuur van Brouwer (2024) als basis genomen. Deze raamwerken omschrijven kenmerken van een geïndustrialiseerde bouw en infrasector, echter zijn deze niet specifiek en concreet genoeg. Om tot een betere interpretatie te komen van deze kenmerken, hebben we deze verrijkt op basis van andere literatuur. Beginnend bij het recente werk van Pottachola et al. (2026) en met name de EngD's van de collega's van Groesen (2022), Pottachola (2024) en van Ee (2022). Aangevuld met context uit overkoepelende concepten zoals 'construction 4.0/5.0' (zie bijv. From Construction 4.0 to Construction 5.0: Principles and Enabling Technologies) en het werk van collega's aan de Universiteit Twente op het gebied van platform innovatie.

Vraag-aanbod afstemming

In een toekomstige geïndustrialiseerde bouw- en infrasector vindt er goede afstemming tussen vraag en aanbod plaats. Dit zorgt ervoor dat er continuïteit en herhaalbaarheid is wat een essentieel principe is voor een geïndustrialiseerde werkwijze. Deze afstemming wordt ondersteund door goede beleidsstructuren en regelgeving die industrialisatie mogelijk maken. De afstemming tussen vraag en aanbod, als gevolg van vraagarticulatie in een specifieke context wordt daarbij gebaseerd op functionele eisen. Deze zijn zowel vast (niet veranderend) als variabel (veranderend afhankelijk van de context). Deze eisen maken expliciet aan welke voorwaarden een oplossing dient te voldoen en vormen heldere grenzen. Denk hierbij aan voorwaarden en grenzen zoals fysieke beperkingen, regelgeving, locatiecondities en technische specificaties. Deze kaders worden verder geconcretiseerd door standaarden, waaronder vastgelegde details en interfaces, componentbeschrijvingen en ontologieën, die zorgen voor een uniforme basis waarop vraag en aanbod op elkaar kunnen aansluiten zonder dat hier projectmatig maatwerk aan te pas gaat.

Vraag-aanbod afstemming wordt verder ondersteund door vraagprognoses en strategische matchmaking. Op basis van geprognosticeerde productievolumes en toenemende standaardisatie van de vraag worden coördinatiemechanismen ingericht die verder gaan dan traditionele inkoop- en aanbestedingsprocessen. Deze mechanismen faciliteren een meer structurele afstemming tussen vraag en aanbod over de keten heen.
Binnen deze context wordt de markt georganiseerd via segmentatie en aggregatie, waarbij productplatforms een centrale rol spelen. Door vraag te bundelen rondom deze

productplatforms ontstaan schaalvoordelen die bijdragen aan efficiëntere productiesystemen (economies of scale) en lagere transactiekosten. Door het vertalen van functionele eisen en standaarden naar oplossingen te ondersteunen, kunnen geprefabriceerde systemen worden ingezet die flexibiliteit kunnen bieden om variatie in de vraag te accommoderen.

De koppeling tussen vraag en aanbod krijgt concreet vorm via de relatie tussen productplatforms en ontwerpconfiguratie. De selectie van een platform leidt direct tot een specifieke designconfiguratie, waarbij systeem- en ontwerpkeuzes worden gemaakt binnen de kaders van het platform. Deze kaders zorgen voor beperkte keuzemogelijkheden, waardoor er een verschuiving kan plaatsvinden van engineer-to-order (EtO) naar, afhankelijk van de context, pick-/assemble-/configure-to-order. Oplossingen worden niet langer volledig projectspecifiek ontwikkeld, maar worden aangepast op basis van bestaande platforms.

Op sectorniveau resulteert dit in een productplatform-ecosysteem dat gebaseerd is op clusters. Deze clusters kunnen ingedeeld worden op basis van verschillende specificaties zoals vraag, typologieën, aanbieders of regio's. Om dit te realiseren zijn er beleid en mechanismen nodig die de vraagkant stroomlijnen met de aanbodkant. Op strategisch niveau is de vraagkant zo ingericht dat productplatforms ontwikkeld kunnen worden doordat er typologieën geïdentificeerd en gespecificeerd zijn. Een sector die functioneert vanuit een productplatform-ecosysteem vraagt om een methode/manier/tool waarop productplatforms geselecteerd kunnen worden. De vraag heerst hoe dit op een juiste manier gedaan kan worden.
Op ketenniveau krijgt vraag-aanbod afstemming vorm via het gebruik van productplatforms. De vraag vanuit projecten wordt daarbij gebundeld of expliciet afgestemd op bestaande productplatforms, waardoor een meer gestructureerde koppeling tussen vraag en aanbod ontstaat. Om oplossingen te bieden door middel van productplatforms is er tussen organisaties in de keten afstemming nodig over o.a. ontwikkeling, toepassing en configuratie van deze platformgebaseerde oplossingen.

Op organisatieniveau ligt de focus op het werken met elementen die passen binnen productfamilies, die aansluiten op bredere productplatforms. Binnen deze productfamilies worden keuzes aan de vraagzijde gemaakt in relatie tot de beschikbare oplossingen, terwijl organisaties aan de aanbodzijde de ontwikkeling en levering van deze elementen afstemmen op keuzes en specificaties van de vraagzijde. Deze manier van werken vraagt om afstemming tussen verschillende afdelingen binnen organisaties, zodat vraag en aanbod intern op elkaar aansluiten en consistent bijdragen aan productplatforms.

Sectorniveau innovatie, kennisontwikkeling en optimalisatie
Innovatie, kennisontwikkeling en optimalisatie krijgen vorm binnen een context van geborgde leveringszekerheid en continuïteit, waarin grote en herhaalbare volumes beschikbaar zijn. Deze schaal en herhaalbaarheid maken verschillende typen innovatieprikkels mogelijk en ondersteunen een meer structurele benadering van vernieuwing binnen de sector.

Kennisontwikkeling vindt daarbij onder andere plaats binnen productplatforms, die functioneren als integrale "volledige constructiesystemen". Binnen deze platforms wordt geleerd op systeemniveau, waarbij inzichten worden opgebouwd over de gehele levenscyclus en samenhang van bouwsystemen. Dit leren vindt projectoverstijgend plaats, waarbij data een belangrijke rol speelt. Door data uit verschillende projecten te verzamelen en te analyseren, ontstaat kennis die breder toepasbaar is binnen de sector.

De continue verbetering van processen en systemen wordt ondersteund door iteratieve verbetercycli, zoals de PDCA-cyclus (Plan-Do-Check-Act), waarmee systematisch wordt gewerkt aan optimalisatie. Deze verbeterprocessen worden gestuurd op basis van prestatie-indicatoren (KPI's), die richting geven aan zowel operationele als strategische keuzes binnen de sector.

Innovatie wordt daarnaast gefaciliteerd door gedeelde investeringen in innovatieve ontwikkelingen. Gezamenlijk investeren in de ontwikkeling van een productplatform is een voorbeeld hiervan. Gedeelde investeringen hangen samen met nieuwe prikkels voor sectorale innovatie, waaronder de ontwikkeling van gedeelde businessmodellen (Collaborative Business Models, ofwel CBM). Dit zijn samenwerkingsvormen waarbij partijen gezamenlijk waarde creëren via een gezamenlijk verdienmodel en risico verdelen.

Gezamenlijke investeringen bieden ook kansen voor de ontwikkeling van innovatieplatforms waarin partijen samenwerken aan de ontwikkeling en toepassing van nieuwe oplossingen. Binnen deze platforms worden kennis, middelen en ervaringen gedeeld, wat bijdraagt aan een collectieve leer- en innovatiecapaciteit.

Tot slot speelt de ontwikkeling en adoptie van sectorale standaarden een belangrijke rol in het faciliteren van innovatie en kennisdeling. Open standaarden, zoals IFC, bieden een gemeenschappelijke basis voor informatie-uitwisseling en interoperabiliteit, waardoor samenwerking tussen partijen wordt vereenvoudigd en opschaling van oplossingen binnen de sector wordt ondersteund.

Op sectorniveau ligt de focus op het realiseren van innovatieplatforms en het ontwikkelen en toepassen van sectorstandaarden en richtlijnen. Ketens kunnen deze standaarden en richtlijnen gebruiken om invulling te geven aan KPI-gedreven productplatforms. Daarnaast zijn ketens gefocust op het optimaliseren van organisatieoverstijgend leren. Organisaties (binnen de keten) houden zich bezig met de ontwikkeling en optimalisatie van KPI-gedreven productfamilies die passen binnen de productplatforms.

Geïntegreerd digitaal systeem (digitale integratie)
Data- en informatie-uitwisseling wordt georganiseerd op sectorniveau via gestandaardiseerde systemen die consistentie, betrouwbaarheid en herbruikbaarheid van data ondersteunen. Sectorstandaarden voor de uitwisseling en het gebruik van data, zoals IFC of beleidsmaatregel 22, vormen daarbij een belangrijke basis. Deze standaardisatie ontwikkeld zowel digitale interfaces — zoals datastandaarden en systeeminterfaces — als technische interfaces, waarin de fysieke objecten die digitaal worden beschreven, over verschillende productplatforms en productfamilies heen.

Binnen deze context wordt gebruikgemaakt van digitale platforms en data space-technologieën, zoals DSGO, die het delen en ontsluiten van data tussen partijen faciliteren. Data wordt daarbij georganiseerd rondom ‘single sources of truth’ voor primaire gegevens, waardoor één consistente en gevalideerde bron ontstaat die door verschillende actoren kan worden gebruikt. Daarnaast wordt gewerkt met betrouwbare open data repositories, gebaseerd op FAIR-principes, waarin data vindbaar, toegankelijk, interoperabel en herbruikbaar is.
De sector beweegt richting een datagedreven manier van werken, waarbij digitale processen en papierloze werkwijzen worden toegepast. Methodieken en technologieën zoals Model-Based Systems Engineering (MBSE), integraties van BIM en GIS, en andere digitale representaties van objecten en systemen (zoals F2F en DPP) ondersteunen deze werkwijze. Hierbij wordt informatie gedurende de gehele levenscyclus van objecten vastgelegd, gebruikt en hergebruikt.

Data speelt daarnaast een rol in processen rondom compliance en vergunningverlening, waarbij datagedreven benaderingen worden ingezet om te voldoen aan regelgeving en om processen efficiënter te organiseren. Tot slot worden configuratoren ingezet op verschillende ontwikkelstadia en schaalniveaus, zoals gebieds- en objectniveau, waarmee oplossingen kunnen worden samengesteld binnen de kaders van beschikbare data en gestandaardiseerde systemen.

Concreet betekent dit op sectorniveau een focus op het (door)ontwikkelen en toepassen van (open) standaarden zoals DPP, in combinatie met het inrichten van open data repositories en

het realiseren van data spaces. Deze elementen vormen de basis van een gestandaardiseerde en schaalbare data-infrastructuur, waarin informatie consistent kan worden uitgewisseld en gebruikt. Door deze gemeenschappelijke data-infrastructuur wordt samenwerking tussen ketens en organisaties ondersteund.

Doordat de sector dit faciliteert is het op ketenniveau mogelijk om digitale systemen te integreren en koppelen tussen organisaties. Hierdoor ontstaat een samenhangend netwerk van informatiestromen waarin data en processen over de keten heen met elkaar verbonden zijn. Dit maakt het mogelijk om informatie te delen en activiteiten tussen organisaties beter op elkaar aan te sluiten, waardoor bijvoorbeeld ontwerp, productie en uitvoering in toenemende mate geïntegreerd plaatsvinden binnen de keten.

Op organisatieniveau vertalen sectorale digitale systemen zich in de implementatie van geïntegreerde systemen, enabling technologies en koppelingen met bijvoorbeeld PLM-omgevingen. Doordat er gewerkt wordt met deze digitale systemen vinden werkzaamheden in toenemende mate plaats binnen samenhangende informatiestromen, waardoor kennis steeds meer wordt gecodificeerd. Kennis wordt expliciet vastgelegd in systemen, modellen en werkwijzen. Dit draagt bij aan herhaalbaarheid, interne afstemming en hergebruik van kennis binnen de organisatie.

Geïntegreerde productiesystemen
In een geïntegreerd productiesysteem is de focus verschoven van productie voor losse projectactiviteiten naar productie die georganiseerd wordt als een samenhangend systeem. Binnen deze systemen worden verschillende productiestrategieën toegepast, zoals massa-maatwerk en massaproductie, in combinatie met zowel op locatie- als fabrieksproductie, afhankelijk van de aard van de oplossing en de context van toepassing. De productie wordt ondersteund door geïntegreerde logistiek en ketens, waarin langdurige relaties tussen partijen een belangrijke rol spelen en waarin ook de logistiek op de bouwplaats zelf onderdeel is van het systeem. Daarnaast ondersteunen geavanceerde ERP-systemen de coördinatie en aansturing van deze geïntegreerde productiesystemen, doordat zij inzicht bieden in processen, middelen en informatiestromen over de gehele productieketen.

Binnen deze context ontstaan flexibele productiesystemen, waaronder vormen van gedeelde of white label manufacturing, waarin een organisatie generieke producten produceert voor verschillende organisaties. Tegelijkertijd maken circulaire processen onderdeel uit van deze productiesystemen, waarbij aandacht bestaat voor het hergebruik van materialen en componenten. Dit wordt ondersteund door principes zoals ontwerp voor productie en ontwerp voor hergebruik, waarmee producten en systemen vanaf de ontwerpfase worden afgestemd op productie en hergebruik.

Productplatforms vormen hierbij een belangrijk organiserend principe, doordat zij zorgen voor een consistente basis waarop productie en configuratie plaatsvinden. De ontwikkeling van deze geïntegreerde productiesystemen sluit aan bij bredere ontwikkelingen binnen Construction 4.0/5.0, waarin productie steeds meer plaatsvindt in mensgerichte, duurzame en cyber-fysieke systemen.

Op sectorniveau bieden nieuwe businessmodellen ruimte voor geïntegreerde productiesystemen, waarin flexibele configuraties in de keten mogelijk zijn, zoals diagonale productievariabiliteit bij white label productie. Dit vraagt op ketenniveau om afstemming over productie en logistiek tussen ketenpartners. Dit gebeurt enerzijds door het gezamenlijk selecteren van passende productiesysteemconfiguraties voor platforms. Hiermee kunnen productplatforms en productiestrategieën ondersteunen in het opvangen van de variabiliteit in de vraag. Anderzijds zorgt afstemming over geïntegreerde logistiek en het realiseren van langdurige ketenrelaties voor een samenhangend en schaalbaar productiesysteem. Op organisatieniveau vraagt dit om een productiestrategie die aansluit op het productplatform en inzet van enabling technologies, zoals prefabricage.

Bijlage 3: Feiten en cijfers bij de opgave

De omvang van de GWW-opgave
In het prognoserapport van TNO (2023) wordt geschat er voor de vernieuwingsopgave van 88.501 bruggen en viaducten, 2.550 tunnels en onderdoorgangen, 344.729 duikers, 29.826 damwanden, 7.973 gemalen, 63.238 steigers en 50.229 stuwen tot 2030 jaarlijks €2,4 miljard nodig is. Dit stijgt tussen 2031-2040 verder naar €2,9 miljard. Vanaf 2040 zullen de jaarlijkse kosten waarschijnlijk meer dan €3 miljard zijn. De piek met een jaarlijkse kosten van €3,8 miljard wordt verwacht in 2080. Dit komt neer op een additionele €260 miljard aan vernieuwingskosten die nodig zijn tot 2100 (TNO, 2023). Hier zijn reguliere instandhoudingskosten voor exploitatie en onderhoud, de nieuwbouwopgaven uit het Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport (MIRT) en GWW-werkzaamheden binnen gebiedsontwikkelingen en het ontsluiten van deze nieuwe gebieden niet meegenomen.

Deze schatting is inmiddels al een aantal jaar oud en er zijn signalen dat de daadwerkelijke omvang hoger zal zijn. Enerzijds doordat deelopgaven (zoals de vernieuwing van tunneltechnische installaties), assettypen (zoals sluizen) niet zijn meegenomen. Anderzijds omdat de kosten waarschijnlijk hoger uitvallen door prijsstijgingen.

Decentralisatie en ontbreken landelijk beleid bemoeilijkt uitvoering vernieuwingsopgave
De opgave is gedecentraliseerd en er ontbreekt landelijk beleid, wat tempo en slagvaardige uitvoering vertraagt. Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gaat slechts over een deel van de opgave en de andere opdrachtgevers zijn autonoom. Decentrale overheden zijn verantwoordelijk voor meer dan 80% van de infrastructuur, de verantwoordelijkheid over 20% ligt bij Rijkswaterstaat en ProRail (TNO, 2023). Dit verhoogt de druk op de kosten voor gemeenten aanzienlijk. Gemeenten nemen circa 55% van de kosten voor hun rekening, hierdoor wordt er geschat dat de jaarlijkse kosten voor gemeenten stijgen naar €1,32 miljard tot 2030. Dit bedrag stijgt tussen 2031-2050 naar €1,8 miljard. Dit terwijl gemeenten in 2021 maar €0,53 miljard aan de vernieuwingsopgave hebben uitgegeven (TNO, 2023).

Nieuwbouw realiseren in een verhoogd tempo
Nederland zet nationaal in op de bouw van in totaal 981.000 woningen tot en met 2030 in het programma Woningbouw (VRO, 2023). Voor deze periode wordt de totale investering geschat op ca. €98,1 miljard (Aedes, z.d.). Deze kosten zijn tot 2029 gedekt (via de realisatiestimulans, Wbi, gebiedsbudgetten en Beethovenmiddelen). In 2025 zijn er maar 69.000 woningen gebouwd (CBS, 2026). Het tempo ligt te laag om in 2030 het geplande aantal woningen te realiseren, dus ook na 2030 is er budget nodig. Tussen 2030-2035 is er een resterende publieke opgave en een tekort van ca. €3,9 miljard, daarbovenop komt nog eens een tekort van ca. €7,8 miljard voor aan woningbouw verbonden infrastructuurontwikkeling (Rebel, 2025).

Bijlage 4: analyse van innovaties binnen TBL fase 1
Binnen TBL zijn in totaal 79 relevante innovaties geïdentificeerd die bijdragen aan circulariteit en industrialisering. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen innovaties binnen de consortia Infra en Gebouwen, aangevuld met een beperkt aantal overstijgende innovaties. Digitalisering is een belangrijke en terugkerende ontwikkeling te zijn in vrijwel alle domeinen.

De innovaties concentreren zich rond specifieke objecten en fasen in de keten (beheer, productie, inspectie etc.). Binnen infrastructuur is de scope beperkt tot bruggen, kademuren en wegen. Binnen gebouwen ligt de focus op bouwelementen en bouwsystemen, digitalisering van de bouwketen en gevels.

Veel innovaties dragen aantoonbaar bij aan circulariteit, bijvoorbeeld door levensduurverlenging, hergebruik of toepassing van gerecyclede en biobased materialen. De relatie met industrialisering is minder expliciet beschreven. In veel gevallen lijkt industrialisering vooral voort te komen uit de wijze waarop innovaties worden toegepast, opgeschaald en geïntegreerd in bedrijfsprocessen en ketens.

Overkoepelende patronen:
De geanalyseerde innovaties laten drie dominante ontwikkelrichtingen zien:
1. Datagedreven beheer en onderhoud
Innovaties maken gebruik van sensoren, monitoring, inspectietechnologie, digitale modellen en data-platformen om de staat van objecten beter inzichtelijk te maken. Hierdoor kunnen onderhoudsinterventies beter worden gepland en kan vroegtijdige vervanging worden voorkomen.
2. Levensduurverlenging en hergebruik
Veel innovaties richten zich op het verlengen van de levensduur van bestaande assets of op het mogelijk maken van hergebruik van materialen en componenten. Deze innovaties dragen rechtstreeks bij aan circulaire strategieën zoals levensduurverlenging, hergebruik en recycling.
3. Standaardisatie, prefabricage en digitalisering
Met name binnen de gebouwde omgeving wordt ingezet op modulaire bouwconcepten, prefabricage, parametrisch ontwerpen en digitale ketenintegratie. Deze innovaties vormen belangrijke bouwstenen voor verdere industrialisering van ontwerp-, productie- en uitvoeringsprocessen.

Infrastructuur:
1. Bruggen
Binnen het thema bruggen zijn acht innovaties geïdentificeerd. Deze richten zich voornamelijk op beheer en onderhoud, levensduurverlenging en toekomstbestendige vervanging.
Een belangrijk deel van de innovaties bestaat uit digitale inspectie- en monitoringsinstrumenten. Voorbeelden zijn datagedreven veiligheidsbeoordelingen, inspectietechnologie voor funderingspalen en sensortechnologie voor vroegtijdige detectie van constructieve afwijkingen. Deze innovaties maken een betere beoordeling van de technische staat mogelijk en ondersteunen daarmee levensduurverlenging.
Daarnaast zijn er verschillende data-platformen ontwikkeld die kennis, objectgegevens en typologieën ontsluiten. Deze platforms bevorderen kennisdeling en standaardisatie en vormen een basis voor datagedreven beheer van grote aantallen vergelijkbare objecten.

Ten slotte zijn innovaties gericht op hergebruik en standaardisatie van brugcomponenten zichtbaar, zoals IFD-bruggen (Industrieel, Flexibel en Demontabel) en normontwikkeling voor circulaire bruggen. Deze innovaties verbinden circulariteit expliciet met industriële productieprincipes zoals standaardisatie, prefabricage en uitwisselbaarheid van onderdelen. De bruginnovaties laten zien dat digitalisering en standaardisatie belangrijke voorwaarden vormen voor zowel circulariteit als industrialisering. Vooral typologisering, herhaalbare beoordelingsmethoden en gestandaardiseerde brugconcepten bieden potentieel voor grootschalige toepassing.

2. Kademuren
Voor kademuren zijn dertien innovaties geïdentificeerd. Deze zijn grofweg onder te verdelen in innovaties voor toestandsbepaling en innovaties voor levensduurverlenging.
Bij toestandsbepaling spelen digitale technieken een belangrijke rol. Voorbeelden zijn geautomatiseerde monitoring, data-analyse, drone-inspecties en beslisondersteunende systemen. Deze innovaties maken het mogelijk om grote arealen efficiënter te beheren en onderhoudsmaatregelen beter te prioriteren.

Innovaties voor levensduurverlenging richten zich onder meer op funderingsversterking, groutinjecties, gespecialiseerde cementtoepassingen en biogebaseerde versterkingstechnieken. Door renovatie en vervanging uit te stellen wordt materiaalgebruik beperkt en neemt de circulariteit toe.

Binnen kademuren ligt de nadruk op het beheersbaar maken van een omvangrijke vervangingsopgave. Digitalisering ondersteunt schaalbare inspectie- en beheersprocessen, terwijl product- en procesinnovaties bijdragen aan levensduurverlenging. De relatie

met industrialisering is vooral zichtbaar wanneer toepassingen worden opgeschaald en gestandaardiseerd.

3. Wegen

Binnen het thema wegen zijn acht innovaties geïdentificeerd. De meeste innovaties richten zich op verduurzaming van asfalt en op efficiëntere aanleg- en hergebruikprocessen. Verschillende innovaties introduceren nieuwe asfaltmengsels met een hoog aandeel gerecyclede materialen of een lagere CO_2-uitstoot tijdens productie. Andere innovaties richten zich op circulaire verhardingsconcepten, zoals herbruikbare materialen en klimaatadaptieve verhardingen.

Daarnaast worden robots ontwikkeld die hergebruik van straatstenen ondersteunen door sorteren, stapelen en kwaliteitsborging te automatiseren.

Weginnovaties dragen in belangrijke mate bij aan circulariteit via recycling en hergebruik van materialen. De bijdrage aan industrialisering komt vooral voort uit robotisering en de mogelijkheid om materiaalstromen en uitvoeringsprocessen op grotere schaal te standaardiseren.

Gebouwen

1. Bouwelementen en bouwsystemen

Binnen dit cluster zijn innovaties gericht op zowel verduurzaming als industrialisering van woningbouw.
Een belangrijk deel bestaat uit prefab en modulaire bouwsystemen, waaronder biobased bouwconcepten, industriële woningbouwsystemen en remontabele bouwoplossingen. Deze innovaties combineren vaak circulaire ontwerpprincipes met industriële productie.

Daarnaast richten verschillende innovaties zich op de ontwikkeling van nieuwe biobased materialen en de professionalisering van de bijbehorende productieketens.

De innovaties laten zien dat circulariteit en industrialisering binnen woningbouw steeds vaker hand in hand gaan. Prefabricage, modulariteit, standaardisatie en robotisering maken opschaling mogelijk, terwijl biobased materialen bijdragen aan verduurzaming van de gebouwde omgeving.

2. Digitalisering van de bouwketen

Dertien innovaties richten zich op digitalisering van ontwerp-, beheer- en onderhoudsprocessen. Deze innovaties omvatten onder andere dataplatformen, productpaspoorten, objectregistratiesystemen, gekoppelde databronnen en parametrische ontwerptools. Daarnaast zijn er tools ontwikkeld voor het automatiseren van ontwerpkeuzes, duurzaamheidsevaluaties, vergunningprocedures en renovatievraagstukken.
Digitalisering vormt een belangrijke en terugkerende enabler voor industrialisering circulariteit. Door kennis, data en besluitvorming te standaardiseren ontstaan mogelijkheden voor automatisering, schaalvergroting en herhaalbaarheid. Circulariteit wordt vooral ondersteund wanneer digitale systemen informatie leveren over materialen, prestaties en hergebruiksmogelijkheden.

3. Gevels

Met negentien innovaties vormen gevels de grootste innovatiecategorie binnen het consortium gebouwen.

Een aanzienlijk deel van de innovaties richt zich op hergebruik van gevelcomponenten zoals kozijnen, deuren, glas en aluminium gevelsystemen. Daarnaast zijn innovaties gericht op biobased of gerecyclede materialen, modulaire geveloplossingen en circulaire ontwerpkaders. Ook worden normen, beoordelingsmethoden en data-instrumenten ontwikkeld die het grootschalig hergebruik van gevelcomponenten moeten faciliteren.

Binnen gevelinnovaties staat circulariteit centraal. Industrialisering is vooral zichtbaar bij

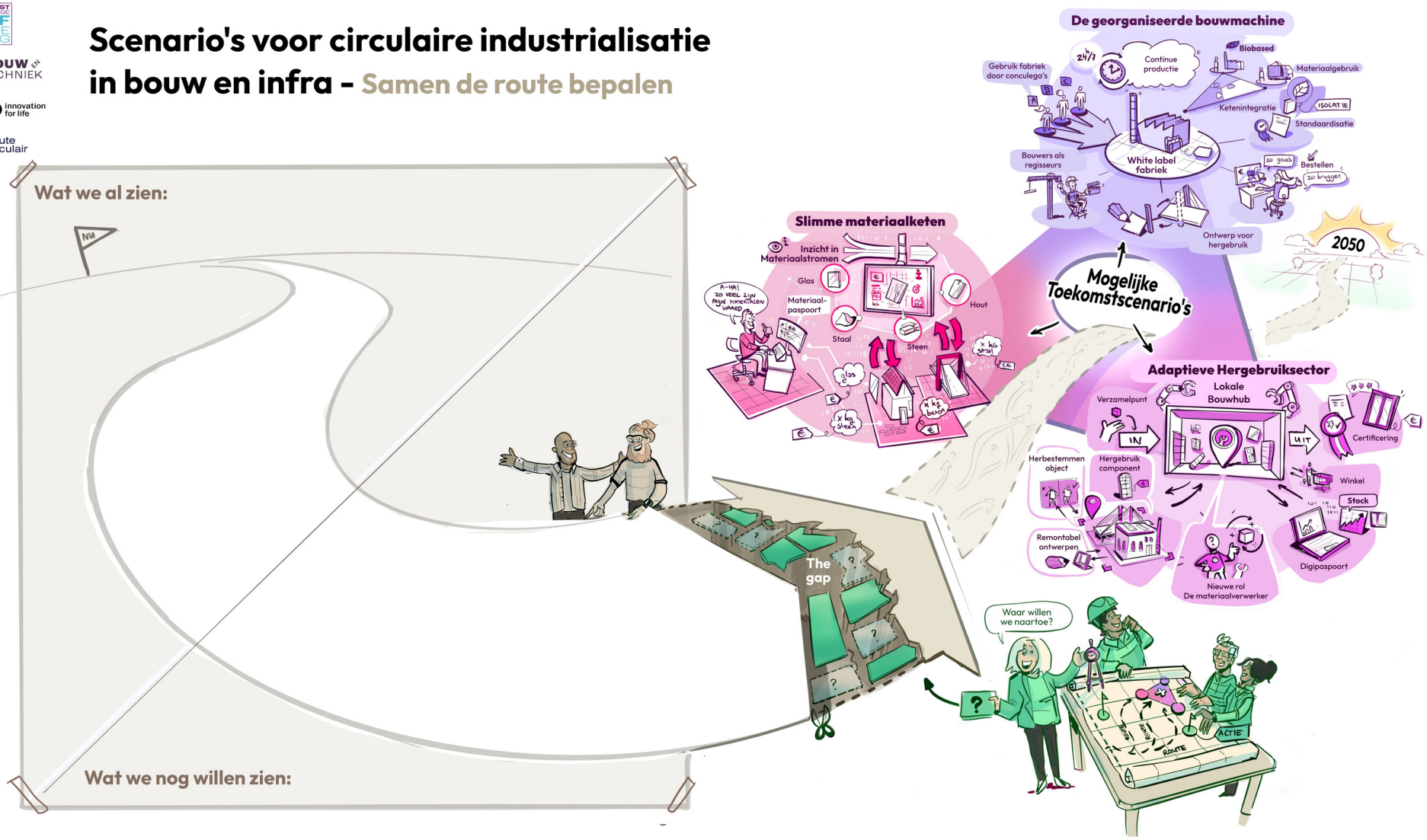
modulaire gevelconcepten, standaardisatie van processen en de ontwikkeling van uniforme werkwijzen voor grootschalig hergebruik. De grootste potentie ligt in het opschalen van deze oplossingen binnen de keten.

Conclusie
De analyse laat zien dat de TBL-innovaties gezamenlijk een substantiële bijdrage kunnen leveren aan zowel circulariteit als industrialisering binnen de gebouwde omgeving. Circulariteit wordt voornamelijk gerealiseerd via levensduurverlenging, hergebruik, recycling en toepassing van biobased materialen. Industrialisering komt vooral tot uiting via digitalisering, standaardisatie, prefabricage, robotisering en datagedreven werkwijzen.

De verbinding tussen beide transities is echter niet altijd expliciet zichtbaar. Veel innovaties dragen afzonderlijk bij aan circulariteit of industrialisering, terwijl de gecombineerde impact pas ontstaat wanneer innovaties op grotere schaal worden toegepast en in onderlinge samenhang worden georganiseerd. Juist die combinatie biedt perspectief op een toekomstbestendige aanpak van de infrastructuur en woningbouw opgaven.

Bijlage 5: Routekaart Canvas
Zie volgende pagina

Scenario's voor circulaire industrialisatie in bouw en infra - Samen de route bepalen



Bronnen

Adriaanse, A. (2014). Bruggen bouwen met ICT. Universiteit Twente. https://research.utwente.nl/en/publications/bruggen-bouwen-met-ict/

Aedes-datacentrum. (z.d.). Aedes-forecast: Financiën. https://aedesdatacentrum.nl/mosaic/stories--aedes-forecast/financien

Andersson, N., & Lessing, J. (2017). The interface between industrialized and project based construction. Procedia Engineering, 196, 220–227. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.193

Arnoldussen, J., Kok, J., Van Dooremolen, N., Thung, I., Papineau Salm, J., Louca, S., & Heida, H. (2026). Materiaalstromen en milieubelasting in de bouw en infra: Materiaalstromen, MKI en CO_2-emissies in 2023, 2030 en 2050. Economisch Instituut voor de Bouw & Structural Collective.

Bouwend Nederland. (2025, 3 december). Handen tekort: Samenwerking in Brainport als sleutel tot succes. https://www.bouwendnederland.nl/nieuws/regio-zuid/handen-tekort-samenwerking-in-brainport-als-sleutel-tot-succes

Brouwer, T. (2024). Exploring the transition to industrialisation in Dutch infrastructure construction (Master thesis). TU Delft. https://repository.tudelft.nl/record/uuid:7c559c40-37f1-4669-a04f-a0e0a9d3d640

Cao, J., et al. (2021). Cross-phase product configurator for modular buildings using kit-of-parts. Automation in Construction, 123, 103437. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103437

Centraal Bureau voor de Statistiek. (z.d.). CBS StatLine [Dataset]. https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/85276NED/table?dl=C43A2

Centraal Bureau voor de Statistiek. (2026). Derde jaar op rij met minder woningen erbij. https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2026/05/derde-jaar-op-rij-met-minder-woningen-erbij

Circle Economy Foundation. (2023). Circularity Gap Report 2023. https://circularity-gap.world/2023

Circulaire Bouweconomie. (2018). Transitieagenda circulaire bouweconomie. https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2019/07/1821700-01-Transitie-Agenda-Circulaire-Bouweconomie.pdf

Copper8. (2025). CO_2-impact van de Nederlandse bouw. https://www.copper8.com/wp-content/uploads/2025/12/CO_2-impact-van-de-Nederlandse-Bouw.pdf

DGBC (Dutch Green Building Council). (2023, 5 april). Whole Life Carbon: Introductie. https://mijn.co2-prestatieladder.nl/filestore/si/23181116/4589/23181122/20230405%20WLC%20DGBC%20introductie[7].pdf

Dubois, A., & Gadde, L.-E. (2002). The construction industry as a loosely coupled system: Implications for productivity and innovation. Construction Management and Economics, 20(7), 621–631. https://doi.org/10.1080/01446190210163543

Economisch Instituut voor de Bouw. (2022). IFD in de infrastructuur. https://www.eib.nl/wp-content/uploads/2023/01/EIB-Eindrapport-IFD-in-de-infrastructuur-web.pdf

Economisch Instituut voor de Bouw. (2023). Materiaalstromen in de bouw en infra. https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2026/02/EIB_Structural_Materiaalstromen_bouw_infra_2023_FINAL.pdf

Economisch Instituut voor de Bouw (EIB). (2026). Structurele materiaalstromen in de bouw en infra. https://www.eib.nl/wp-content/uploads/2026/02/EIB_Structural_Materiaalstromen_bouw_infra.pdf

Eriksson, P. E., et al. (2014). Managing short-term efficiency and long-term development through industrialized construction. Construction Management and Economics, 32(1–2), 97–108. https://doi.org/10.1080/01446193.2013.814920

Hanemaaijer, A., Muller, M., De Krom, M., Mangnus, A., Schotten, K., & In 't Veld, D. (2025). Integrale Circulaire Economie Rapportage 2025 (PBL-publicatienummer 5365). Planbureau voor de Leefomgeving. https://www.pbl.nl/publicaties/integrale-circulaire-economie-rapportage-2025

Knippenberg, S. C. M., et al. (2019). Development of a product platform for ship locks using DSM methods. In Proceedings of the 21st International DSM Conference. https://doi.org/10.35199/dsm2019.15

Lessing, J. (2015). Industrialised house-building: Conceptual orientation and strategic perspectives (Doctoral thesis). Lund University. https://lup.lub.lu.se/search/files/3873278/8145690.pdf

McKinsey & Company. (2019). Modular construction: From projects to products.

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2022, 2 april). Nationaal Isolatieprogramma. https://www.volkshuisvestingnederland.nl/documenten/2022/04/02/nationaal-isolatieprogramma

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2023, 12 juli). Kamerbrief over Primos-prognose en rapportage plancapaciteit. https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2023/07/12/kamerbrief-over-abf-rapportages-primos-en-plancapaciteit-en-betekenis-voor-de-bouwopgave

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (z.d.). Duurzame infra. Geraadpleegd op 7 augustus 2026, van https://www.duurzame-infra.nl/

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2025). Doelen 2035. Nederland circulair in 2050. https://www.nederlandcirculairin2050.nl/nationaal-programma-circulaire-economie/doelen-2035

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2025, 13 oktober). Nationaal Programma Circulaire Economie 2025 (bijlage bij Kamerbrief over actualisatie 2025 NPCE). https://www.rijksoverheid.nl/documenten/2025/10/13/bijlage-1-bij-kamerbrief-nationaal-programma-circulaire-economie-202

Pottachola, I. (2024). Towards digital twins driven modular construction: Development of a digital twin uses framework & digital twin usage scenarios for modular construction (EngD thesis). University of Twente. https://research.utwente.nl/files/481742645/10_Irfan_Pottachola.pdf

Pottachola, I., Bletsis, A., & Verschuuren, T. (2026). Principles for the industrialisation of the infrastructure renovation and replacement assignment. In Proceedings of the 2026 European Conference on Computing in Construction. https://doi.org/10.35490/EC3.2026.399

Rebel. (2025, 4 december). Financieel totaalbeeld woningbouwopgave tot en met 2035. Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening. https://open.overheid.nl/documenten/134b8457-c623-44b7-bd04-3f56fe71fa21/file

Rijksoverheid. (z.d.). 900.000 nieuwe woningen om aan groeiende vraag te voldoen. https://www.rijksoverheid.nl/themas/bouwen-en-wonen/volkshuisvesting/nieuwe-woningen

Rijksoverheid. (2025, 10 november). Miljarden voor betere bereikbaarheid: kabinet versnelt woningbouw in steden en dorpen. https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2025/11/10/miljarden-voor-betere-bereikbaarheid-kabinet-versnelt-woningbouw-in-steden-en-dorpen

Rijkswaterstaat. (z.d.). Circulaire economie. https://www.rijkswaterstaat.nl/leefomgeving/duurzaam-werken/circulaire-economie

Roadmap transitiepad kunstwerken. (z.d.). https://www.duurzame-infra.nl/documenten/2026/03/27/roadmap-kunstwerken-2026

Söderholm, E. (2010). Applicability of continuous improvements in industrialised construction design process. Luleå University of Technology.

Stout, A. (2016). Application of mass customisation: Standardisation and modularisation, for an infrastructural object: A viaduct (Master thesis). University of Twente.

TNO. (2023). Vernieuwingsopgave infrastructuur: Landelijk prognoserapport 2023. https://repository.tno.nl/SingleDoc?docId=56606

Transitieteam Circulaire Bouweconomie. (2025, 27 februari). Nieuw Uitvoeringsprogramma slaat brug naar de praktijk. Circulaire Bouweconomie. https://circulairebouweconomie.nl/nieuws/nieuw-uitvoeringsprogramma-slaat-brug-naar-de-praktijk/

van Ee, T. (2022). A digital product platform for modular and industrial construction: The design of a reference ontology and an application landscape (Engineering Doctorate thesis). University of Twente. https://research.utwente.nl/en/publications/a-digital-product-platform-for-modular-and-industrial-constructio/

van Groesen, W. (2022). Industrialized renovations: Towards mass-customization in the construction industry (Engineering Doctorate thesis). Technische Universiteit Eindhoven. https://research.tue.nl/nl/publications/industrialized-renovations-towards-mass-customization-in-the-cons/

Vrijhoef, R., & Koskela, L. (2005). Revisiting the three peculiarities of production in construction. In Proceedings of the 13th International Group for Lean Construction Conference. Sydney, Australia.

Wuni, I. Y., & Shen, G. Q. (2020). Critical success factors for modular integrated construction projects: A review. Building Research & Information, 48(7), 763–784. https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1669009