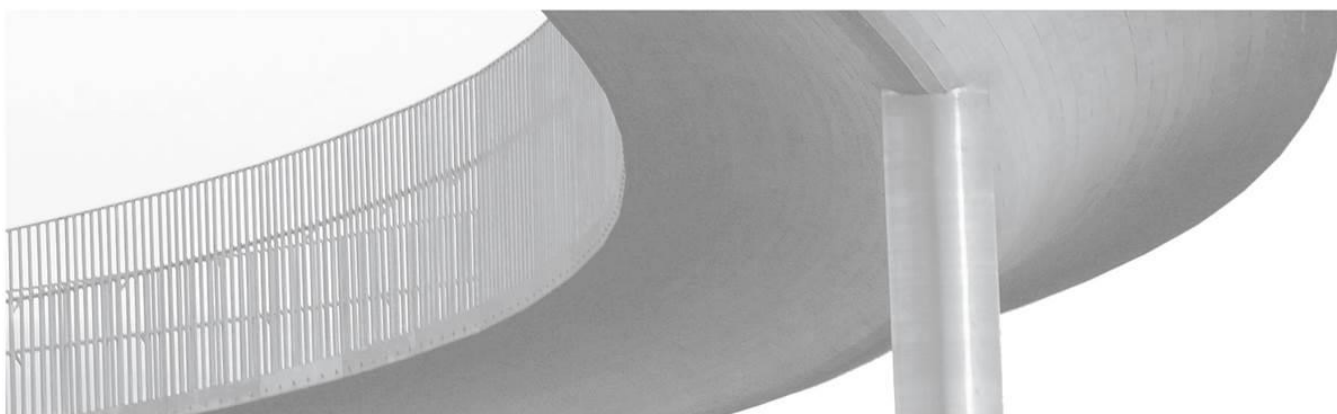




## BRÝR Í HRINGRÁSARHAGKERFI

Áfangaskýrsla 1

30.04.2022





## SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

### SKJALALYKILL

2970-413-SKY-001-V01

### SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

001 / 25

### VERKEFNISSTJÓRI / FULLTRÚI VERKKAUPA

Páll Valdimar Kolka

### VERKEFNISSTJÓRI EFLA

Magnús Arason

### LYKILORÐ

Brýr  
Hönnun  
Hringrásarhagkerfið

### STAÐA SKÝRSLU

- Drög  
 Drög til yfirlstrar  
 Lokið

### DREIFING

- Opin  
 Dreifing með leyfi verkkaupa  
 Trúnaðarmál

### TITILL SKÝRSLU

Brýr í hringrásarhagkerfi, Áfangaskýrsla 1

### VERKHEITI

Brýr í hringrásarhagkerfi

### VERKKAUPI

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar

### HÖFUNDUR

Guðrún María Guðjónsdóttir og Magnús Arason

### ÚTDRÁTTUR

Í skýrslunni er fjallað um brýr í hringrásarhagkerfi. Fjallað er um hringrásarhagkerfið og byggingariðnaðinn almennt og þróun á hringrásarmælikvörðum, m.a. fyrir brýr.

Sem hluti af vinnu við fyrsta áfanga hefur komist á samband milli höfunda og ráðgjafafyrirtækisins Arup í Hollandi. Arup er í samstarfi við vegamálayfirvöld þar í landi að vinna að umfangsmiklu verkefni sem snýr að því að útbúa leiðarvísí með hönnunaraðgerðum fyrir hönnuði með það að markmiði að auka hringrásareiginleika brúa, auk þess að setja fram mælikvarða fyrir þessar aðgerðir. Næsti áfangi byggir á samstarfi við Arup með það að markmiði að nýta slíka aðferðafræði á brýr á Íslandi.

**ÚTGÁFUSAGA**

---

<b>NR.</b>	<b>HÖFUNDUR</b>	<b>DAGS.</b>	<b>RÝNT</b>	<b>DAGS.</b>	<b>SAMÞYKKT</b>	<b>DAGS.</b>
01	Guðrún María Guðjónsdóttir 1. útgáfa	11.04.22	Magnús Arason	13.04.22	Magnús Arason	30.04.22

---

## SAMANTEKT

Byggingariðnaðurinn, þ.e. uppbygging húsbýgginga og innviða, notar nærri því helming af þeim náttúrlegu efnum sem unnin eru úr auðlindum jarðar, og hann er ábyrgur fyrir gríðarlegu umfangi úrgangs og á það bæði við um niðurrifsúrgang og úrgang sem fellur til meðan á framkvæmdum stendur. Iðnaðurinn þarf því að vera í lykilhlutverki þegar kemur að því að koma á hringrásarhagkerfi. Hringrásarhagkerfið stendur ekki einungis vörð um auðlindir og eykur sjálfbærni heldur getur hringrás byggingarefna auk þess átt stóran þátt í því að draga úr umhverfisáhrifum byggingariðnaðarins og þar af leiðandi að ná árangri í loftlagsmálum. Almennt er viðurkennt að innleiðing slíks hagkerfis sé ein af forsendum þess að markmið um samdrátt í kolefnislosun og þar með verndun náttúrlegra kerfa jarðar náist.

Að koma á hringrásarhagkerfi kallar á breytingu á núverandi kerfum og aðferðum sem byggja á línulega hagkerfinu. Þetta mun hafa áhrif á byggingargeirann og má þar nefna meiri endurnýtingu efna og aðlagaða nálgun við framleiðslu, útboð, hönnun og framkvæmdir. Þörfin er skýr en leiðir til að ná fram breytingum og hvað þarf til hefur enn ekki verið kortlagðar að fullu. Það sem hins vegar er ljóst er að breytingar krefjast ákveðins ramma til að festa hringrásarhugsun og aðgerðir í sessi við hefðbundna mannvirkjagerð, hvort sem um er að ræða framleiðslu efna og byggingarhluta eða við hönnun mannvirkja [1].

Forsendur fyrir því að innleiða hringrásarhagkerfið er samráð og samvinna milli ólíkra aðila; fræðsla, yfirfærsla þekkingar og miðlun lausna – samstillt átak er nauðsynlegt til að breyta áherslum bæði í hönnun og efnisnotkun. Slík samvinna getur leitt til þess að borin séu kennsl á þau tækifæri og hindranir sem eru til staðar auk þess sem það getur haft í för með sér að skapa nýja þekkingu. Mikilvægt er að til séu leiðbeiningar fyrir hönnuði og leið til að meta hringrásareiginleika brúa.

Margir aðilar vinna að því að innleiða hringrásarhugsun í mannvirkjahönnun, og á það einnig við um hönnun brúa. Þetta rannsóknarverkefnið markar fyrstu sporin á þeirri vegferð að ná utan um hringrásareiginleika brúa, og hvernig mat á þessum eiginleikum getur orðið hluti af hönnun og nýst við val á lausnum.

Sem hluti af vinnu við fyrsta áfanga hefur komist á samband milli höfunda og ráðgjafafyrirtækisins Arup, sem er einn helsti samstarfsaðili Ellen MacArthur Foundation, við rannsóknir og innleiðingu á hugmyndafræði hringrásarhagkerfa. Í næsta áfanga verður unnið í samstarfi við Arup í Hollandi, sem aftur er í samstarfi við vegamálayfirvöld þar í landi. Þar er unnið að umfangsmiklu verkefni sem snýr að því að útbúa leiðarvísni með hönnunaraðgerðum fyrir hönnuði með það að markmiði að auka hringrásareiginleika brúa, auk þess að setja fram mælikvarða fyrir þessar aðgerðir.

Í áframhaldandi vinnu er meginmarkmið verkefnisins að prófa þessa aðferðafræði með innleiðingu í huga og beita henni á brýr á Íslandi. Byggt á þeim niðurstöðum er hægt að bera saman mismunandi valkosti, leggja mat á hvaða aðgerðir ætti að leggja áherslu á og birta leiðbeiningar. Innleiðing hringrásarhugsunar í hönnun brúa á Íslandi yrði þannig innleidd á markvissan hátt.

*Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.*



## EFNISYFIRLIT

SAMANTEKT	5
1 INNGANGUR	9
2 HRINGRÁSARHAGKERFIÐ	10
3 HRINGRÁSARHÖNNUN	12
3.1 Efnisnotkun	12
3.2 Hönnunaraðferðir	12
3.3 Stafræn þróun	14
4 MÆLIKVARÐI Á HRINGRÁS	15
4.1 Þróun hringrásarmælikvarða	15
4.2 Hringrásarstuðull fyrir brýr	17
4.2.1 Aðferðafræði þróuð við Twente háskólann	17
4.2.2 Aðferðafræði þróuð við Antwerp háskólann	18
5 LEIÐARVÍSIR FYRIR HÖNNUÐI	21
6 LOKAORÐ OG ÁÆTLUN FYRIR NÆSTA ÁFANGA VERKEFNIS	23
7 HEIMILDASKRÁ	24

## MYNDASKRÁ

<b>MYND 1</b>	Hringrásarhagkerfið _____	11
<b>MYND 2</b>	Vistferillinn eins og hann er tekinn fyrir í MCI aðferðinni frá EMF _____	16
<b>MYND 3</b>	Breytur sem hringrásarstuðull EMF (MCI) tekur tillit til. _____	16
<b>MYND 4</b>	Uppbygging hringrásarstuðuls byggð á aðferðafræði sem þróuð var við Twente háskólann [4]. _____	18
<b>MYND 5</b>	Stigskipting mannvirkja sem grundvöllur hringrásarstuðuls [10]. _____	19
<b>MYND 6</b>	Mismunandi stig hringrásarstuðuls fyrir brýr samkvæmt aðferðafræði við sem þróuð var við Antwerp háskólann [21]. _____	19
<b>MYND 7</b>	Aðgerðir sem settar eru upp í Circular Buildings Toolkit frá ARUP [23]. _____	22



## 1 INNGANGUR

Byggingariðnaðurinn er gríðarlega efnisfrekur iðnaður og eftirspurn eftir byggingarefni eykst stöðugt. Úrgangur sem tengist byggingum og innviðum er meira en þriðjungur alls úrgangs í löndum Evrópusambandsins [1]. Á World Circular Economy Forum 2019 kemur einnig fram að 10-15% af byggingarefni sé sóað í Evrópu meðan á framkvæmdum stendur en það nær yfir afskurð, gallaðar vörur, mistök í hönnun og smíði, hlutir sem brotna eða skemmast.

Nú til dags endar langstærsti hluti framkvæmda- og niðurrifsúrgangs í landfyllingum. Það jafngildir ekki því að halda í verðmæti efnanna líkt og er forsenda hringrásarhagkerfisins. Úrgangur sem fellur til er liður í ákveðinni hringrás og efnisviður ætti helst að vera í stöðugri hringrás og eiga sér enga lokastöð eins og til að mynda í landfyllingu. Samkvæmt Umhverfisstofnun kemur um 56% alls úrgangs á Íslandi frá mannvirkjagerð. Árið 2019 var endurnýtingarhlutfall fyrir mannvirkjagerð 83% en langstærsti hluti þess úrgangs sem þar er flokkaður sem endurnýttur er óvirkur úrgangur (jarðefni eins og steypa, flísar, kermík og gler) sem nýtist sem fyllingarefni eða með öðrum hætti til landmótunar [2]. Mikilvægt er því að endurhugsa hönnun og framkvæmdir út frá hringrásarhagkerfinu til að halda auðlindum í kerfinu eins lengi og mögulegt er.

Byggingariðnaðurinn hefur oft orðið viðfangsefni hringrásarhagkerfisins en þá hefur aðaláherslan verið lögð á byggingar. Þó margt sé sameiginlegt með byggingum og brúm að þá þarf að aðlaga hugsunina á bak við hringrásarhagkerfið sérstaklega fyrir brýr. Brýr eru efnismikil mannvirki auk þess sem líftími þeirra er langur og eru því tilvalið viðfangsefni hringrásarhagkerfisins. Þrátt fyrir þessa umfangsmiklu efnisnotkun er lítið fjallað um brýr þegar kemur að hringrásarhagkerfinu [3], [4].

Tilgangur verkefnisins var að svara því hvort rétt væri að auka áherslu á endurnýtingu eða aðlögun að öðru hlutverki inn í hönnun byggingarhluta í brúarmannvirkjum með tilliti til kolefnisspors. Við vinnu verkefnisins, svo sem í heimildaöflun og skilgreiningum þess, hefur það komið fram með óyggjandi hætti að lengri líftími byggingarhluta skilar sér í lægra kolefnisspori þegar horft er yfir allan vistferilinn.

Í verkefninu er farið yfir þá þróunarvinnu sem unnin hefur verið við tengingu og innleiðingu hugtaksins hringrásarhagkerfi í brúarhönnun, með það fyrir augum að draga úr ágangi á auðlindir, hámarka verðmæti þeirra og koma í veg fyrir að þær verði að úrgangi eða tryggja það að þær haldist innan kerfisins eins lengi og mögulegt er. Auk þess verða kynntar áætlanir um frekari innleiðingu hringrásarhagkerfisins í hönnun brúa á Íslandi.

## 2 HRINGRÁSARHAGKERFIÐ

Grunnhugmynd hringrásarhagkerfisins er að hverfa frá línulega hagkerfinu sem er ráðandi í dag þar sem verðmætasköpunin byggir á hugmyndafræðinni taka-nota-farga. Í því kerfi er þannig gengið á auðlindir jarðar, þær notaðar í framleiðslu á vörum sem síðan er fargað við lok líftíma og hverfa þar af leiðandi úr hagkerfinu. Hringrásarhagkerfið leitast hins vegar við að hámarka verðmæti með því að auka framleiðni auðlinda, auka orkunýtingu, draga úr auðlindanotkun og minnka úrgang og sóun. Til þess að gera það þarf að horfa yfir allan vistferilinn og tryggja og hámarka verðmæti auðlinda eins lengi og mögulegt er.

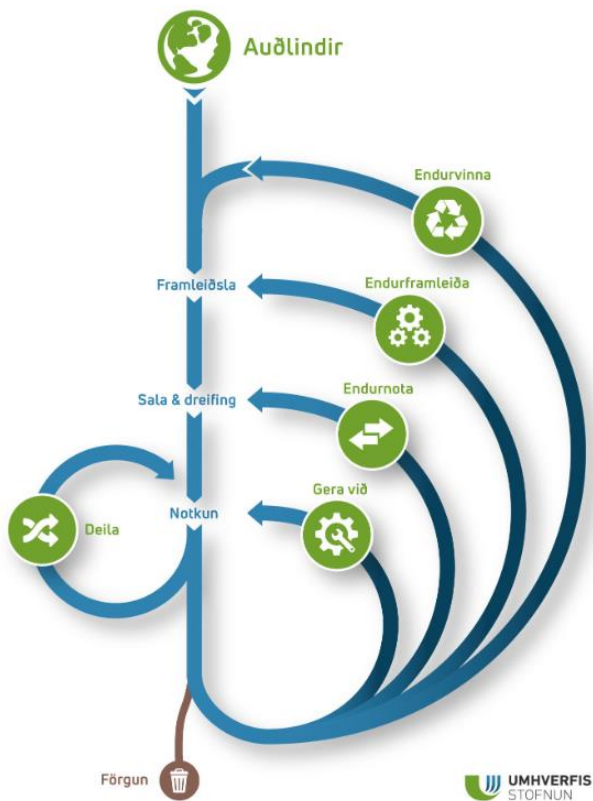
Hugmyndin um hringrásarhagkerfið varð til með aukinni umhverfisvitund og sem ákveðin lausn á eyðingu auðlinda. Fjölmargar skilgreiningar eru til þar sem hver og ein er lítillega frábrugðin öðrum. Þetta verður til þess að þær hafa verið notaðar frekar frjállega og því mikilvægt að þessi hugtök séu skilgreind á skýran hátt [5]. Kirchherr varpar ljósi á stöðu skilnings á hugtakinu með því að taka saman mismunandi skilgreiningar á hringrásarhagkerfinu. Niðurstaðan er sú að „R-orðin“ eru oft nefnd í þessu samhengi en auk þess er oft bent á að kerfisbreytinga sé krafist. „R-orðin“ sem oftast eru nefnd eru fjögur: draga úr notkun, endurnota, endurvinnna og endurheimta (e. reduce, reuse, recycle, recover). R-in sem fjallað hefur verið um eru þó ótalmörg og misjafnt er hvernig þau eru flokkuð en önnur dæmi um slík eru: endurhugsa, finna nýja notkunarmöguleika og endurframleiða (e. rethink, repurpose, remanufacture) auk þess að gera við og gera upp (e. repair, refurbishment).

Umræðan um hringrásarhagkerfið hefur aukist mikið á seinustu áratugum, ekki síst fyrir tilstuðlan Ellen MacArthur Foundation (EMF) sem er leiðandi slíkra kerfa á heimsvísu [6]. EMF lýsir hringrásarhagkerfinu á eftirfarandi hátt: “The circular economy is an economic and industrial system that is restorative and regenerative by design, and which aims to keep products, components and materials at their highest utility and value at all times, distinguishing between technical and biological cycles.” Samkvæmt EMF byggist það á þremur megin reglum:

- Útrýma úrgangi og mengun
- Hringrás vara og efnis
- Endurnýjun náttúrlegra kerfa

Umhverfisstofnun skilgreinir hugtakið sem „hagkerfi þar sem leitast er við að koma í veg fyrir að auðlindir verði að úrgangi með áherslum sem tryggja að hægt sé að viðhalda verðmætum auðlinda eins

lengi og mögulegt er. Markmiðið er að lágmarka auðlindanotkun og þar með úrgangsmýndun“ [7]. Grundvallarmarkmiðið með hringrásarhagkerfinu er að lágmarka auðlindanýtingu og úrgangsmýndun með því að halda vörum og efni áfram í notkun við lok líftíma.



MYND 1 Hringrásarhagkerfið

## 3 HRINGRÁSARHÖNNUN

### 3.1 Efnisnotkun

Hringrásarhönnun er ein af lykillausnum þess að bæta alla auðlindanýtingu í byggingariðnaði og draga úr úrgangsmýndun. Áhrifaríkast er að minnka úrgang snemma á hönnunarstigi en úrgangur er að stóru leyti afleiðing ákvarðana sem teknar eru á fyrri stigum. Það er því mikilvægt að hugarfarsbreyting eigi sér stað og farið verði að líta á úrgang sem hönnunargalla og lögð sé áhersla á að hugsa um hringrásina frá fyrstu stigum hönnunar og horfa yfir allan vistferilinn til að ná sem bestum árangri. Hönnuðir eru hvað mikilvægastir þegar kemur að þessari hugsun en í dag eru þeir oft ekki nægilega meðvitaðir um hringrásarhagkerfið [8].

Innleiðing hringrásarhugsunar í hönnun krefst ákveðinna breytinga í aðferðafræði með tilheyrandi aðgerðum sem mikilvægt er að hönnuðir læri að tileinka sér. Lang mikilvægast er að leggja áherslu á að lágmarka efnisnotkun, hvort sem um er að ræða að nýta betur það sem fyrir er eða lágmarka umfang hönnunar miðað við kröfur verkefnisins. Auk þess er mikilvægt að vanda vel efnisval en grunnmarkmiðin sem hafa þarf í huga eru:

- Notað eins mikið af endurunnu og/eða endurnýttu efni og mögulegt er
- Lengja nýtingartíma eins mikið og mögulegt er
- Safna eins mörgum efnum og vörum til endurvinnslu og/eða endurnotkunar og mögulegt er

Markmiðið er því að draga úr notkun á frumhráefnum og óendurnýjanlegum efnum og á sama tíma þarf að tryggja að auðvelt sé að nýta efni við lok líftíma þar sem það þarf að eiga greiða leið í endurnotkun eða endurvinnslu. Þegar mannvirki þjónar ekki lengur tilgangi sínum ættu efnin að skila sér áfram hvort sem um er að ræða sömu eða breytta virkni. Viðmið fyrir hringrásarbyggingu hafa meðal annars verið þróuð af GBC Norway og FutureBuilt.no þar sem tiltekin er lágmarks notkun á endurnýttu og endurnýjanlegu efni. Ekkert slíkt hefur verið þróað ennþá fyrir brýr [9].

### 3.2 Hönnunaraðferðir

Hringrásarhugsun í byggingariðnaði hefur hingað til að mestu leyti takmarkast við að a) draga úr efnisnotkun og b) endurvinnslu. Það er þó mikilvægt að huga einnig að fjölbreyttari aðgerðum eins og

t.d. framlengingu líftíma eða endurnotkun, sem oft eru betri valkostir fyrir bættu auðlindanýtingu. Skortur er á hvötum til að hanna með hringrás að leiðarljósi, en til að hvetja til aukinnar innleiðingar er mikilvægt að fyrir hendi séu leiðbeiningar og mælikvarðar [8].

Þegar kemur að því að innleiða hringrásarhugsun í hönnun mannvirkja er mikilvægt að horfa til notkunar til lengri tíma. Þá eru nokkrar hönnunaraðferðir sem mest áhersla hefur verið lögð á en þar á meðal má nefna:

- Hanna með lengri líftíma í huga (e. Design for Longevity)
- Hanna til að aðlaga að breyttum þörfum (e. Design for Adaptability)
- Hanna til að taka í sundur (e. Design for Disassembly)

Möguleikinn á að taka í sundur gerir það að verkum að auðveldara er að færa, gera breytingar, endurnota og skipta út þeim þáttum sem þarfnast endurbóta. Það leiðir þannig ekki aðeins til lengri líftíma heldur verður endurnotkun og endurvinnsla auk þess einfaldari við lok líftíma þar sem gæði og magn nýtanlegra efna helst í hámarki. Aðlögun að breyttum þörfum er hugsað til langs tíma þar sem tryggt er að breytingar í framtíðinni skapi ekki úrgang. Grundvöllur fyrir þessu er að hönnuðir læri og skilji hvernig forsendur geta breyst með tíma [3]. Lykilatriðið er að gera breytingar mögulegar. Þessar aðferðir tengjast „R-orðunum“ á margan hátt, en þær gera það að verkum að auðveldara að gera við, gera upp og gera þær breytingar sem þarf til að halda vöru í notkun eins lengi og mögulegt er [8].

Langur líftími brúa hefur það í för með sér að erfitt er að sjá fyrir hver endingin er sérstaklega þegar kemur að breyttri þörf sem felur í sér að brúin gegnir ekki lengur sínu hlutverki jafnvel löngu áður en skilgreindum hönnunarlíftíma lýkur. Margar brýr í dag eru rifnar niður löngu áður en hönnuðum líftíma þeirra lýkur og nýjar brýr byggðar í staðinn. Það þarf því að huga vel að hönnun og efnisvali brúa til þess að sjá til þess að raunverulegur líftími þeirra verði sem lengstur [3]. Það er ekki síður mikilvægt að nýta betur það sem nú þegar hefur verið byggt og forðast óþarfa niðurrif og nýbyggingu. Viðgerðir og viðhald jafnt og þétt eru mjög mikilvæg atriði til að halda líftíma sem lengstum.

Ýmsar hönnunaraðferðir sem falla að hringrásarhagkerfi hafa nú þegar verið innleiddar í hönnun bygginga og geta nýst sem grunnur fyrir sérstökum hönnunaraðferðum fyrir brýr en þær þarf að aðlaga til að mæta sérstökum kröfum og þörfum sem tengjast brúm. Tæknilegar lausnir sem snúa að brúarhönnun miða aðallega við að það sé hægt að taka í sundur til að endurnota og endurvinnna, þar sem möguleikar á að aðlaga hönnun brúa er takmarkaður, þó huga þurfi að möguleikum á að styrkja og breikka auk þess að breikka og hækka þveranir [4].

Þegar kemur að hönnun á efnisfrekum þáttum á borð við burðarvirki er t.a.m. æskilegt að notast við mekanískar festingar svo sem liðtengingar. Ef þetta er gert rétt þá er möguleiki á að nýta byggingarhluta og nota þá beint á nýjum stað til að hámarka notagildi og auka líftímamann. Þar sem þetta er ekki möguleiki (eins og t.d. ef um einhverjar skemmdir er að ræða) er möguleiki á að endurnota þá á hátt þar sem þeir hafa lægra virði eða eru endurnunnir í hráefni [10]. Skráning á eigindum byggingarhluta í „Building Information Models“ (BIM) eykur raunhæfni endurnýtingar og auðveldar meðferð byggingarhlutanna við lok líftíma, sjá umfjöllun um stafræna þróun að neðan [11].

Í Hollandi hefur verið í þróun sérstök hringrásarbrú. Brúin er gerð úr forsteyptum einingum sem eru sérstaklega hannaðar með endurnýtingu í huga þar sem virði efnanna er haldið í hámarki. Möguleiki er á að breikka og lengja brúna, auk þess að taka hana í sundur og endurbyggja hana á nýjum stað. Einn

mikilvægasti þátturinn í þessu verkefni og í því að gera hringrásarhönnun mögulega var samstarf allra aðila sem koma að verkinu og vann hollenska vegagerðin í nánu samstarfi við byggingaraðila og birgja frá upphafi [12].

Evrópusambandið hefur einnig verið að vinna að verkefni sem kallast „Smart Circular Bridge“ en um er að ræða hönnun brúa sem gerðar eru úr samsettu efni úr plöntutrefjum og resín. Nú þegar hefur fyrsta brúin verið byggð en um er að ræða 15 m göngubrú í Hollandi [13].

### 3.3 Stafræn þróun

Stafræn tól munu leika stórt hlutverk í því að taka skrefið í átt að hringrásarhagkerfinu en grunnurinn í því að innleiða hringrásarhagkerfið er gott aðgengi að upplýsingum. Hugmyndin á bak við efnabanka (e. material banks) er sú að efni í mannvirki séu kortlögð og upplýsingar um staðsetningu og endingartíma sé til staðar sem geri þau þannig aðgengileg til notkunar í nýjum verkefnum. Ýmsir aðilar eru farnir að gefa út svokallaða efnispassa (e. material passport) sem er gagnagrunnur sem inniheldur upplýsingar um byggingarhluta, vöru eða efni sem notuð eru í byggingum. Slíkan gagnagrunn er hægt að nýta í framtíðinni til að hámarka endurnýtingu þegar kemur að því að rífa byggingu eða breyta henni. Þetta á sérstaklega við um t.d. járnabindingu í steiptum mannvirkjum sem er mjög mikilvægt ef um endurnotkun er að ræða. Algjör þekking á mannvirkinu er mjög mikilvæg yfir allan líftímann, einnig þegar kemur að breytingum sem gætu hafa haft áhrif á byggingahlutana. Slíkir gagnagrunnar nýta oft forrit og upplýsingar eins og BIM til að kostleggja efnin [14].

BIM er tól sem nýtist til að hafa stjórn á upplýsingum um framkvæmd og tryggir að allir hafi aðgang að sömu upplýsingum í sama gagnagrunni. BIM hefur þann möguleika að vinna hönnun lengra og þar af leiðandi hagræða til að draga úr sóun í byggingarferlinu. Auk þess eru árekstrargreiningar til þess fallnar að bera kennsl á og koma í veg fyrir árekstra jafnt og þétt í hönnun sem leiðir þannig til færri aukaverka á verktíma, minni sóunar á eignum og betri gæða hönnunar. Stytttri verktími sem hlýst af færri viðbótar- og aukaverkum leiðir einnig af sér minni eldsneytisnotkun, og sömu áhrif hefur vélstýring tengd upplýsingalíkönunum í jarðvinnu og vegagerð.

Einnig er mikilvægt að horfa til þess úrgangs sem fellur til við framleiðslu efna og við framkvæmdir. Einingar sem hannaðar og framleiddar eru í tölvustýrðum verksmiðjum sem síðan eru fluttar á staðinn þar sem þeim er raðað saman eru til þess fallnar að draga úr úrgangi við framkvæmdir. Auk þess eru færri flækjustig og skref í framleiðsluferli mikilvæg í því að skyni draga úr úrgangi [15].

## 4 MÆLIKVARÐI Á HRINGRÁS

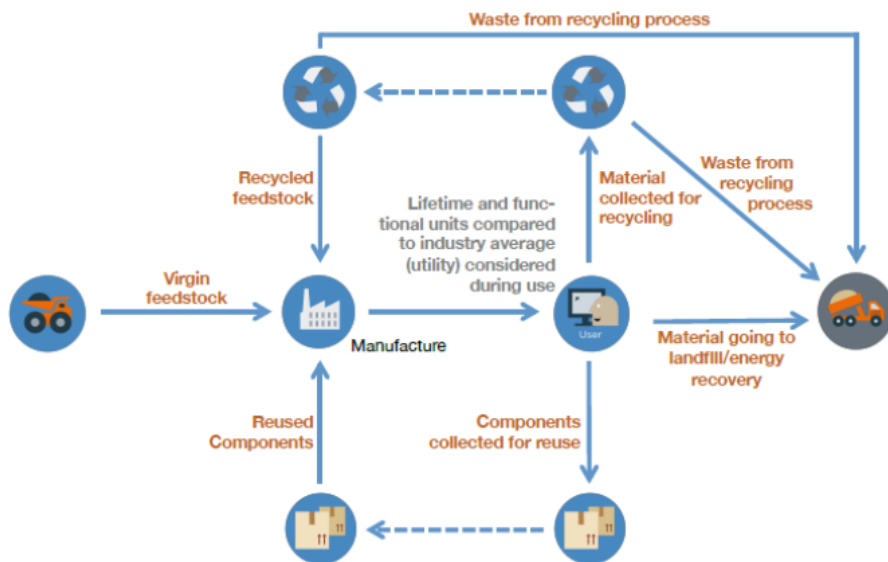
### 4.1 Þróun hringrásarmælikvarða

Í dag eru ýmsar leiðir til að leggja mat á sjálfbærni. Aðferðafræði eins og vistferilsgreiningar og vistferilskostnaðargreiningar hafa rutt sér til rúms og eru slíkar greiningar mikilvægar og nytsamlegar á margan hátt. Þótt þær taki yfir allan vistferilinni þá er það þó oft þannig að lok líftíma eru ekki innifalin. Slíkar greiningar eru því ekki endilega bestu tólin til þess að mæla hringrásareiginleika þar sem oft eru ekki teknir til greina endurnýtingar- eða endurvinnslumöguleikar (e. reuse and recycling performance) [16].

Eins og fjallað var upp hér að ofan hafa „R-orðin“ oft verið nefnd í samhengi við hringrásarhagkerfið. Orðunum hefur oft raðað upp í stiga eða pýramída, en sú aðferð sem staðsett er hærra í stiganum stuðlar að meiri hringrásareiginleikum. Til að mynda er endurnotkun oftast talin betur til þess fallin að draga úr eftirspurn á hráefni þar sem virði vöru er þá haldið í algjöru hámarki eins lengi og kostur er. Sú uppröðun er hins vegar ekki algild og áhrifin geta verið misjöfn og því er þörf á að leggja mat á það hverju sinni.

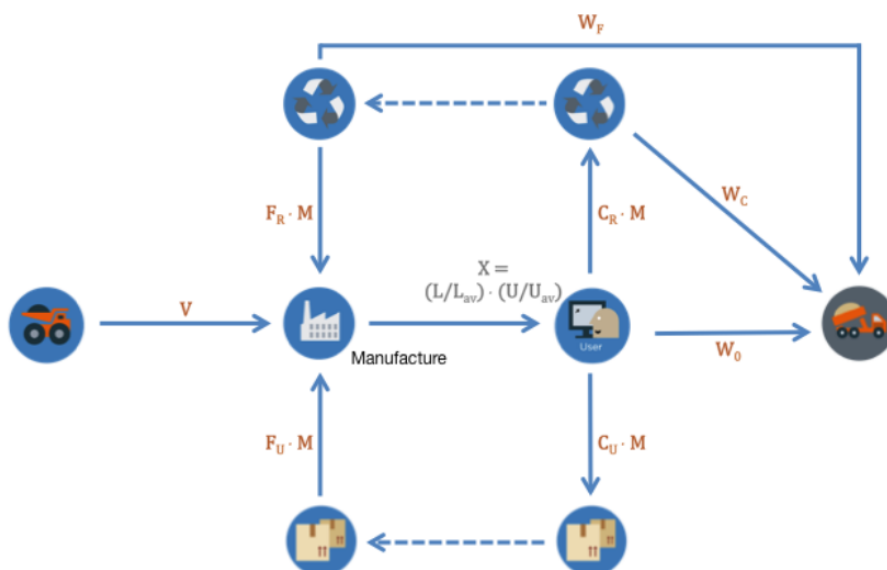
Þó það sé ekki til nein alþjóðlega samþykkt skilgreining á hringrásarhagkerfi þá hafa verið þróaðar aðferðir með það að markmiði að skilgreina mælikvarða á hringrásina. Aðferðir til að mæla hringrásareiginleika hafa þannig verið settar fram sem hringrásavísir eða hringrásarstuðull (e. Circularity Indicator, CI) sem segir þá til um hversu vel eða illa eitthvað fellur að hringrásinni. Þessir stuðlar horfa yfirleitt einungis til auðlindanotkunar og úrgangsmýndunar fyrir efni, en ekki eru teknir fyrir þættir eins og orku- og vatnsnotkun eða umhverfisspor.

Ellen MacArthur Foundation hefur þróað hringrásarstuðul fyrir efni (Material Circularity Indicator, MCI) og hefur þann tilgang að mæla hringrásareiginleika [17], [18]. Aðferðin byggir á flæði efna yfir vistferilinn eins og sýnt er á mynd 2.



**MYND 2** Vistferillinn eins og hann er tekinn fyrir í MCI aðferðinni frá EMF

Hverju flæði er gefinn ákveðinn stuðull sem síðan eru notaðir til að reikna hringrásarstuðulinn (MCI).



**MYND 3** Breytur sem hringrásarstuðull EMF (MCI) tekur tillit til.

MCI mælir hvernig dregið er úr línulegu flæði og nýtir sem inntak:

1. Magn nýrra hráefna sem notað er við framleiðslu
2. Magn óendurheimtanlegs úrgangs sem rekja má til vörunnar
3. Lengd líftíma og nýtingar vöru

Hringrásin er þannig mæld á skalanum 0-1. Vöru sem er einungis úr frumhráefni og endar sem landfylling er hægt að líta á sem línulega vöru. Andstæðan væri hins vegar sú vara sem felur ekki í sér nein frumhráefni og öllum pörtum skilað er í endurvinnslu eða endurnotkun.



Þessi stuðull hefur verið notaður sem fyrirmynd sambærilegra stuðla sem meðal annars hafa það að markmiði að meta hringrásareiginleika mannvirkja en þá með einhverri aðlögun og útvíkkun á aðferðafræðinni [10], [14], [19]. Stærstur hluti þeirrar vinnu leggur áherslu á byggingar en einnig eru dæmi um að þetta hafi verið aðlagð að hönnun brúa en nánar verður fjallað um það í næsta kafla [3] [4].

Mikill vöxtur hefur verið í rannsóknum sem snúa að því að mæla hringrásareiginleika en oft vantar uppá sérstaka stuðla sem snúa að hönnun. Mælingar og mælikvarðar til að leggja mat á þær hönnunaraðferðir sem nefndar hafa verið hefur ekki verið tekið fyrir í hringrásarvísunum, sérstaklega ekki þegar kemur að innviðum. Margt er líkt með tækni, efni og aðstæðum þegar kemur að byggingum og brúm og gilda sömu meginreglur hringrásarhagkerfisins. Lykilskilaboðin í þessum rannsóknum eru þau að gera breytingar mögulegar eykur möguleikann á að aðlaga eða endurnota í framtíðinni og stuðlar þar af leiðandi að minni úrgangi.

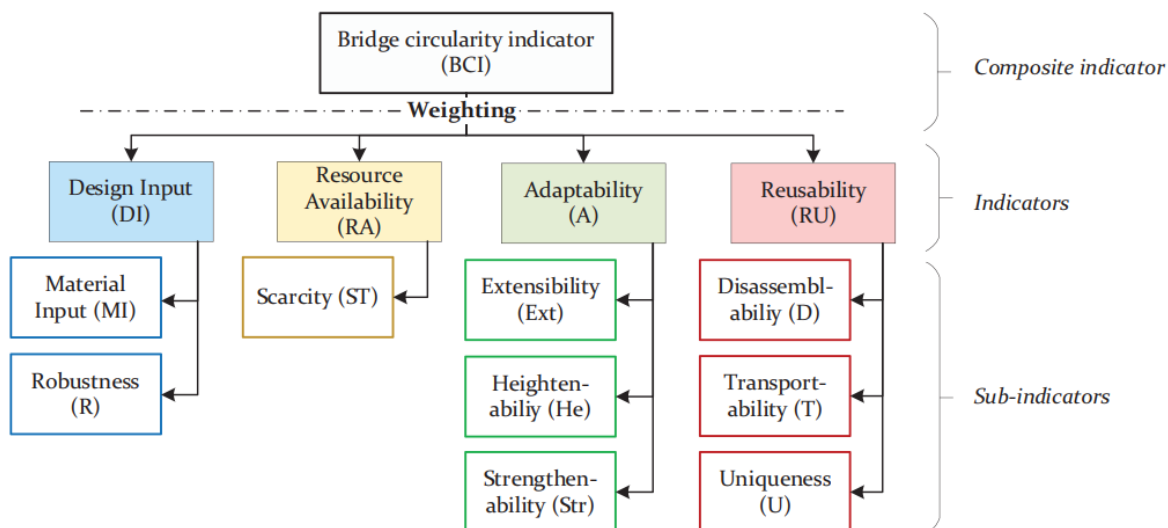
Í dag er enginn einn samþykktur mælikvarði til þess að meta hringrásareiginleika hvorki fyrir byggingar eða brýr. Hugtakið hringrásarhagkerfi er flókið fyrirbæri og ekki er einfalt að leggja tölulegt mat á hringrásina enda þarf að taka tillit til margra þátta [3], [20]. Hringrásarstuðull ætti þó að vera þekktur líkt og kostnaður og kolefnisspor mannvirkja og getur þannig nýst við ákvörðunartöku.

Til þess að innleiða hringrásarhugsun í brúarhönnun er mikilvægt að skýra hvað felst í þeim aðgerðum sem er beitt en einnig er mikilvægt að til sé leið til að meta hringrásareiginleika brúa. Eins og áður sagði hafa verið þróaðir stuðlar sem ætlað er að meta hringrásareiginleika mannvirkja og eru dæmi um að þetta hafi verið aðlagð að hönnun brúa. Um er að ræða tvær ólíkar nálganir sem unnar hafa verið annars vegar í Hollandi og hins vegar í Belgíu. Það sem þær eiga sameiginlegt er að þeim er ætlað að auðvelda innleiðingu hringrásarhugsunar í hönnun brúa og geta þar af leiðandi átt þátt í því að draga úr auðlindanotkun og úrgangi tengt brúm yfir allan vistferilinn.

## 4.2 Hringrásarstuðull fyrir brýr

### 4.2.1 Aðferðafræði þróuð við Twente háskólann

Í grein sem unnin var við Twente háskólann í Hollandi [4] er sett fram tillaga að aðferðafræði sem ætlað er að mæla eða leggja mat á hringrásareiginleika brúa og þar af leiðandi stuðla að betri nýtingu auðlinda í innviðaverkefnum. Greinin er unnin í samstarfi við sérfræðinga í brúarhönnun hjá hollensku vegagerðinni auk sjálfbærni- og hringrásarsérfræðinga við skólann. Aðferðafræðin gengur út á það að skilgreina og reikna fjóra stuðla sem eru síðan sameinaðir í einn stuðul með mismiklu vægi. Þessir fjórir stuðlar eru eftirfarandi: Inntak hönnunar (e. Design Input), framboð auðlinda (e. Resource Availability), möguleikar á aðlögun (e. Adaptability) og endurnýtanleiki (e. Reusability). Hver stuðull er síðan sundurliðaður frekar í nokkra undirstuðla en þá má sjá á mynd 4.



**MYND 4** Uppbygging hringrásarstuðuls byggð á aðferðafræði sem þróuð var við Twente háskólann [4].

Fyrri stuðlarnir tveir, inntak hönnunar og framboð auðlinda, byggja báðir á efnisnotkun. Inntak hönnunar tekur þannig fyrir uppruna efnanna sem notuð eru, hvort þau séu endurvinnanleg eða ekki, og styrk eða endingu hönnunar. Efnisstuðullinn byggir í grunninn á hringrásarstuðli EMF, en hér er ekki reiknað með lokum líftíma þar sem talið er að of mikil óvissa ríki um það hvað verður um efni og byggingarhluta brúa miðað við 100 ára líftíma. Framboð auðlinda tekur tillit til þess að auðlindir eru mismikilvægar hvað varðar eyðingu þeirra og takmarkað framboð miðað við eftirspurn.

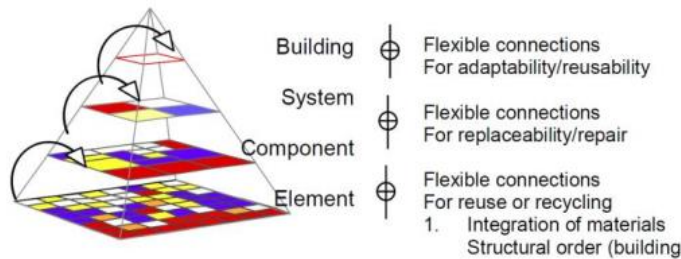
Seinni stuðlarnir tveir taka fyrir möguleikann á breytingum í framtíðinni en það er gert með því að leggja mat á möguleika á aðlögun og endurnýjanleika. Í greininni er lögð áhersla á langan líftíma brúa og lítinn fyrirsjáanlega sem þar af leiðandi gerir núverandi stuðla ekki heppilega til að stuðla að hringrásarhönnun brúa. En jafnvel þó almennt sé lítið vitað um lok líftíma mannvirkja þá sýna gögn að lífsferill brúa er of fyrirsjáanlegur til að notast við staðlaðan líftíma. Þetta á t.d. við um umferðaþróun eða loftlagsbreytingar sem verða til þess að brúin uppfylli ekki lengur kröfur og þar af leiðandi sé hún rifin niður áður en tæknilegum líftíma lýkur. Aðlögunarstuðullinn tekur þannig fyrir möguleikana á að aðlagða hönnun að breyttu álagi og aðstæðum en til þess að leggja mat á þá eiginleika eru skilgreindir fjórir möguleikar: Breikkun brúar og þverunar, aukin hæð undir brú og styrkingarmöguleikar. Endurnýtanleiki tekur fyrir möguleikann á að burðarvirki sé nýtt í öðrum aðstæðum. Matið byggist á því hversu auðvelt er að taka mannvirkið í sundur og auk þess hve auðvelt sé að flytja byggingarhluta og nýta þá, með öðrum orðum hvort hönnunin sé stöðluð og nýtist þar af leiðandi betur í mismunandi aðstæðum.

Almennt hefur verið lögð meiri áhersla á fyrri tvo stuðlana á meðan þeir síðari hafa enn ekki verið þróaðir að fullu. Til þess að kanna notagildi þessarar aðferðafræði voru tekin fyrir tvö dæmi um hollenskar brýr auk þess að framkvæmdar voru óvissu- og næmnigreiningar.

#### 4.2.2 Aðferðafræði þróuð við Antwerp háskólann

Í grein sem unnin var við Antwerp háskólann í Belgíu [21] er fjallað um innleiðingu hringrásarhagkerfisins í byggingariðnaðinum með sérstakri áherslu á göngubrýr. Fjallað er um þær

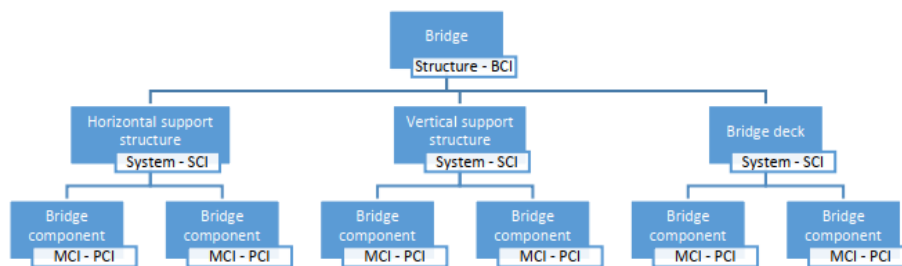
aðferðir og meginreglur hringrásarhagkerfisins sem teknar hafa verið fyrir þegar kemur að byggingum og þær notaðar sem grunnur og aðlagðar sérstaklega fyrir göngubrýr. Lögð er fram tillaga að hringrásarstuðli til að leggja mat á hringrásareiginleika brúarhönnunar, en hann byggir á samsvarandi stuðli sem þróaður hafði verið fyrir byggingar [19]. Í báðum þessum rannsóknum eru eigindi metin á þremur mismunandi stigum, þ.e. fyrir byggingarhluta (e. component, dæmi einn stálbiti), kerfi (e. system, dæmi stálburðarkerfi í heild) og mannvirki (e. construction, dæmi samsett kerfi).



**MYND 5** Stigskipting mannvirkja sem grundvöllur hringrásarstuðuls [10].

Fyrir hvert stig eru reiknaðir tveir stuðlar; Annars vegar efnisstuðull (e. Material Circularity Indicator, MCI) og hins vegar vörustuðull (e. Product Circularity Indicator, PCI). Efnisstuðlinum er ætlað að taka tillit til þeirra efna sem notuð eru í hvern byggingarhluta, t.d. stál og sink í stálbita, og byggir á MCI skilgreindum af EMF. Vörustuðullinn tekur tillit til möguleika á breytingum fyrir hvern byggingarhluta, þ.e.a.s. hvort mögulegt sé að endurnýta byggingahlutana án þess að það komi niður á gæðum þeirra. Stuðullinn er reiknaður út frá áður nefndum efnisstuðli hvers byggingarhluta auk svokallaðra breytingastuðla (e. Disassembly Determining Factors, DDFs) sem hafa mismikið vægi og skilgreina mögulegar breytingar á byggingarhluta.

Hvert kerfi (yfirbygging, undirbygging) er skilgreint sem samansafn af byggingarhlutum. Fyrir hvert kerfi er reiknaður kerfisstuðull (e. System Circularity Indicator, SCI) sem byggir á vörustuðli þeirra byggingarhluta sem það samanstendur af auk þess sem lagt er mat á vensl þeirra á milli. Að lokum er reiknaður út byggingarstuðull (e. Building Circularity Indicator, BCI) fyrir mannvirkið í heild sinni sem byggir á kerfisstuðlum.



**MYND 6** Mismunandi stig hringrásarstuðuls fyrir brýr samkvæmt aðferðafræði við sem þróuð var við Antwerp háskólann [21].

Hringrásarstuðlinum er ætlað að gera það mögulegt að bera saman ólíkar tegundir og útfærslur brúarhönnunar með tillit til hringrásareiginleika. Í greininni er lagt mat á það hvernig stuðullinn tekur tillit til og fellur að aðgerðum sem byggja á R-orðunum, draga úr, endurnota, endurvinna og endurheimt. Tekið er dæmi um göngubrú úr stáli til að sýna fram á það hvaða áhrif það hefur á

niðurstöður sem fást samkvæmt aðferðafræðinni að beita aðgerðum sem ætlað er að draga úr efnismagni og auka endurnotkun.

Niðurstöðurnar sýna að þörf sé á frekari vinnu við aðferðafræðina til að gefa aðgerðum sem ætlað er að draga úr magni hærra undir höfði auk þess að taka tillit til stöðlunar byggingarluta þegar kemur að því að meta endurnotkunarmöguleika. Stuðullinn tekur þó ágætlega á endurvinnslu efnanna með MCI skv. EMF en tekur ekki á endurheimt sem nauðsynlegt er að bæta við í frekari rannsóknum.

## 5 LEIÐARVÍSIR FYRIR HÖNNUÐI

Í Hollandi hafa verið sett fram afar metnaðarfull markmið um umbreytingu yfir í hringrásarhagkerfi sem meðal annars ná yfir byggingariðnaðinn. Hollendingar eru mjög framarlega þegar kemur að innleiðingu hringrásarhagkerfisins í hönnun mannvirkja. Platform CB'23 (Circular Construction 2023) [22] er þverfaglegt verkefni sem hefur það að markmiði að leggja upp drög að samningum fyrir hollenska byggingargeirann sem leggja línurnar fyrir umskipti yfir í hringrásarhagkerfið. Eins og staðan er í dag er aðeins um að ræða samkomulag sem sett er fram sem leiðbeiningar en ekki formlegir staðlar.

Þessi vinna hefur fyrst um sinn skilað leiðarvísium fyrir nokkur samtengd meginviðfangsefni en þar á meðal má nefna hringrásarhönnun og mat á hringrásareiginleikum (e. Measuring circularity). Leiðarvísir fyrir mat á hringrásareiginleikum er hugsaður sem skref í þá átt að festa ákveðna aðferð í sessi til að mæla hringrás í byggingargeiranum [5]. Meðal þess sem lagt er mat á er stuðull sem tekur fyrir það efni sem notast er við en hann er þá sérstaklega hægt að mæla út frá magnskrá og réttum gagnagrunni fyrir efnin.

Alþjóðlega ráðgjafafyrirtækið Arup hefur, í samstarfi við Ellen MacArthur Foundation, verið að vinna að tóli sem þeir nefna Circular Buildings Toolkit sem tekur fyrir hringrásarhagkerfið og byggingariðnaðinn [23]. Helstu hindranir hafa hingað til falist í því að hönnuðir, eigendur og aðrir sem koma að mannvirkjagerð hafa ekki haft grundvöll eða aðferðafræði til þess að innleiða hringrásarhugsun í hönnun mannvirkja. Ekkert ferli er til staðar eða leiðbeiningar og samhengi sem hjálpar hönnuðum að fylgja því ferli. Tólið hefur það því að markmiði að færa þessum aðilum þau úrræði sem þarf til að hanna á grundvelli hringrásahagkerfisins.

Tólið felur meðal annars í sér efni fyrir vinnustofur sem gefur hönnunarteymum möguleika á að kynna sér viðfangsefnið í samhengi við hvert verkefni hverju sinni. Einnig hafa verið skilgreindar 10 hringrásarhönnunaraðgerðir (e. Circular Design Strategies) og meðfylgjandi verkferlar sem hönnunarteymin geta unnið sig í gegnum. Það hjálpar til við að taka þær hugmyndir sem koma fram á vinnustofum og færa þær yfir í framkvæmanlegar aðgerðir í verkefnum og knýja fram raunverulegar breytingar. Auk þess má þar finna ýmsar lausnir og vísanir í fyrri rannsóknir. Fyrir hverja af þeim hringrásarhönnunaraðgerðum sem settar eru fram er settur fram stuðull til þess að geta lagt tölulegt mat á niðurstöður aðgerðanna en það mat byggir á leiðbeiningum CB'23 um mat á hringrásareiginleikum.

● **Build nothing**

1. Refuse unnecessary new construction

● **Build for long-term use**

2. Increase building utilisation

3. Design for Longevity

4. Design for Adaptability

5. Design for Disassembly

● **Build efficiently**

6. Refuse unnecessary components

7. Increase material efficiency

8. Reduce the use of virgin and non-renewable materials

● **Build with the right materials**

9. Reduce the use of carbon intensive materials

10. Design out hazardous/pollutant materials

**MYND 7** Aðgerðir sem settar eru upp í Circular Buildings Toolkit frá ARUP [23].

Þessi vinna hefur hingað til verið miðuð að byggingum og þó margt sé líkt með byggingum og brúarmannvirkjum þá er þörf á að aðlaga slíka vinnu sérstaklega að brúm. Arup í Hollandi er nú í samvinnu við hollensk vegamálayfirvöld að vinna að þróun á sambærilegu tóli fyrir brýr. Hollenska Vegagerðin hefur sett fram sínar eigin hönnunaraðgerðir sem liggja til grundvallar þeirri vinnu.

## 6 LOKAORÐ OG ÁÆTLUN FYRIR NÆSTA ÁFANGA VERKEFNIS

Forsendur fyrir því að innleiða hringrásarhagkerfið er samráð og samvinna milli ólíkra aðila; fræðsla, yfirfærsla þekkingar og miðlun lausna – Samstillt áttak er nauðsynlegt til að breyta áherslum bæði í hönnun og efnisnotkun. Slík samvinna getur leitt til þess að borin séu kennsl á þau tækifæri og hindranir sem eru til staðar auk þess sem það getur leitt til nýrrar þekkingar.

Eins og rakið hefur verið í skýrslunni eru margir aðilar að vinna að því að innleiða hringrásarhugsun í mannvirkjahönnun, og á það einnig við um hönnun brúa. Þetta rannsóknarverkefni markar fyrstu sporin á þeirri vegferð að ná utan um hringrásareiginleika brúa, og hvernig mat á þessum eiginleikum getur orðið hluti af hönnun og nýst við val á lausnum.

Í næsta áfanga verkefnisins, sem styrkur fékkst í frá Rannsóknarsjóði vorið 2022, verður byggt ofan á þá heimildavinnu sem unnin hefur verið.

Sem hluti af vinnu við fyrsta áfanga hefur komist á samband milli höfunda og ráðgjafafyrirtækisins Arup, sem er einn helsti samstarfsaðili Ellen MacArthur Foundation, við rannsóknir og innleiðingu á hugmyndafræði hringrásarhagkerfa. Í næsta áfanga verður unnið í samstarfi við Arup í Hollandi, sem aftur er í samstarfi við vegamálayfirvöld þar í landi. Þar er unnið að umfangsmiklu verkefni sem snýr að því að útbúa leiðarvísí með hönnunaraðgerðum fyrir hönnuði með það að markmiði að auka hringrásareiginleika brúa, auk þess að setja fram mælikvarða fyrir þessar aðgerðir.

Í áframhaldandi vinnu er meginmarkmið verkefnisins að prófa þessa aðferðafræði með innleiðingu í huga og beita henni á brýr á Íslandi. Byggt á þeim niðurstöðum er hægt að bera saman mismunandi valkosti, leggja mat á hvaða aðgerðir ætti að leggja áherslu á og birta leiðbeiningar. Innleiðing hringrásarhugsunar í hönnun brúa á Íslandi yrði þannig innleidd á markvissan hátt.

Samstarf við Arup í Hollandi styrkir þetta rannsóknarverkefni ótvírætt í framhaldinu. Hollensk nálgun er leiðandi í hringrásarhagkerfum á heimsvísu og þangað er mikla þekkingu að sækja

## 7 HEIMILDASKRÁ

- [1] European Commission, „Construction and demolition waste“, *European Commission*. [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en) (sótt 12. janúar 2022).
- [2] Umhverfisstofnun, „Umhverfisvísar og tölfræði“, *Umhverfisstofnun*. <https://ust.is/graent-samfelag/urgangsmal/umhverfisvisar-og-tolfraedi/> (sótt 5. apríl 2022).
- [3] K. Anastasiades, J. Blom, M. Buyle, og A. Audenaert, „Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, b. 117, bls. 109522, jan. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109522.
- [4] T. Coenen, J. Santos, S. Fennis, og J. Halman, „Development of a bridge circularity assessment framework to promote resource efficiency in infrastructure projects“, *J. Ind. Ecol.*, b. 25, tbl. 2, bls. 288–304, apr. 2021, doi: 10.1111/jiec.13102.
- [5] J. Kirchherr, D. Reike, og M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions“, *Resour. Conserv. Recycl.*, b. 127, bls. 221–232, des. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [6] EMF, „Circular Economy Introduction“, *Ellen MacArthur Foundation*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> (sótt 12. janúar 2022).
- [7] Umhverfisstofnun, „Hringrásarhagkerfið“, *Umhverfisstofnun*. <https://ust.is/graent-samfelag/graenn-lifstill/hringrasarhagkerfid/> (sótt 9. febrúar 2022).
- [8] K. T. Adams, M. Osmani, T. Thorpe, og J. Thornback, „Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers“, *Proc. Inst. Civ. Eng. - Waste Resour. Manag.*, b. 170, tbl. 1, bls. 15–24, feb. 2017, doi: 10.1680/jwarm.16.00011.
- [9] FutureBuilt, „FutureBuilt kriterier for sirkulære bygg“, *FutureBuilt*. [https://cfb5f439-74b6-493e-a7fd-f59376383508.filesusr.com/ugd/54e708\\_2c33e88bf4974075a5fec20480c0b49a.pdf](https://cfb5f439-74b6-493e-a7fd-f59376383508.filesusr.com/ugd/54e708_2c33e88bf4974075a5fec20480c0b49a.pdf)
- [10] Durmisevic Elma, „Transformable building structures. Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction.“, [s.n.], S.l., 2006.



- [11] R. Charef, „The use of Building Information Modelling in the circular economy context: Several models and a new dimension of BIM (8D)“, *Clean. Eng. Technol.*, b. 7, bls. 100414, apr. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100414.
- [12] Rijkswaterstaat, „Construction of a circular bridge“, *Rijkswaterstaat*. <https://www.rijkswaterstaat.nl/en/environment/circular-economy/construction-of-circular-bridge> (sótt 13. apríl 2022).
- [13] Interreg Nort-West Europe Programme, „Smart Circular Bridge for a circular built environment“, *Interreg Nort-West Europe Programme - Smart Circular Bridge*. <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/smart-circular-bridge-scb-for-pedestrians-and-cyclists-in-a-circular-built-environment/#tab-2> (sótt 13. apríl 2022).
- [14] Madaster, „Madaster Circularity Indicator explained“.
- [15] Grænni byggð, „Hringrásarhagkerfið og byggingariðnaðurinn“.
- [16] M. (WVL) Crielaard, „Circular economy in the Dutch construction sector“, bls. 58, 2015.
- [17] EMF, „Material Circularity Indicator (MCI)“, *Ellen MacArthur Foundation*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator> (sótt 9. febrúar 2022).
- [18] D. Smith og S. Jones, „Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity - Methodology“, bls. 64.
- [19] J. Verberne, „Building Circularity Indicators - An Approach for Measuring Circularity of a Building“.
- [20] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, og A. Kendall, „A taxonomy of circular economy indicators“, *J. Clean. Prod.*, b. 207, bls. 542–559, jan. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.014.
- [21] K. Anastasiades, K. Van Hul, A. Audenaert, og B. Blom, „A Circularity Indicator for Pedestrian Bridges: A Work in Progress“.
- [22] Platform CB23, „Platform CB23“, *Platform CB23*. <https://platformcb23.nl/> (sótt 5. apríl 2022).
- [23] ARUP og EMF, „Circular Buildings Toolkit“, *Circular Buildings Toolkit*. <https://ce-toolkit.dhub.arup.com/> (sótt 5. apríl 2022).