

Technical University of Denmark



## LCA af genbrug af mursten

**Møller, Jacob; Damgaard, Anders; Astrup, Thomas Fruergaard**

*Publication date:*  
2013

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Møller, J., Damgaard, A., & Astrup, T. F. (2013). LCA af genbrug af mursten. København K: Miljøstyrelsen. (Miljøprojekter; Nr. 1512).

## DTU Library

Technical Information Center of Denmark

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

# LCA af genbrug af mursten

Miljøprojekt nr. 1512, 2013



**Titel:**

LCA af genbrug af mursten

**Redaktion:**

Jacob Møller, Anders Damgaard, Thomas Astrup,  
DTU Miljø

**Udgiver:**

Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
www.mst.dk

**År:**

2013

**ISBN nr.**

978-87-93026-60-5

**Ansvarsfraskrivelse:**

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>1. Formål</b>	<b>12</b>
<b>2. Omfang og udformning af LCA'en</b>	<b>13</b>
2.1 Overordnede principper	13
2.2 Beskrivelse af behandlingssystemer til hhv. oparbejdning og nedknusning af murstensaffald	13
2.3 Den funktionelle enhed	14
2.4 Systemgrænser	14
2.5 Allokering/systemudvidelse	15
2.6 Miljøpåvirkningskategorier, LCIA-metoder og fortolkning af resultater	16
2.7 LCA-modellen EASETECH	18
2.8 Databehov	18
2.9 Antagelser	18
2.10 Ikke-videnskabelige vurderinger	19
2.11 Begrænsninger	19
2.12 Krav til datakvalitet	19
2.13 Proces mht. kritisk review	19
2.14 Rapportformat	20
2.15 Tidshorisont	20
<b>3. Livscyklusopgørelser (LCI – Life Cycle Inventories)</b>	<b>21</b>
3.1 Scenarier	21
3.2 LCI for oparbejdning af mursten til genbrug	22
3.2.1 Teknologibeskrivelse	22
3.2.2 LCI	23
3.3 LCI for knuseværk	23
3.4 LCI for murstensfremstilling	24
3.4.1 Teknologibeskrivelse	24
3.4.2 LCI	25
3.5 LCI for transportmateriel	27
3.6 LCI for grusgravning	27
3.7 LCI for sugning af søsten/sand	27
3.8 LCI for nyttiggørelse af knuste mursten som vejfyld	28
3.9 LCI for marginal dansk elektricitet og produktion af dieselolie	28
3.10 Datakvalitetsindeks	28
<b>4. Vurdering af potentielle miljøpåvirkninger</b>	<b>30</b>
4.1 Samlede potentielle miljøpåvirkninger	30
4.1.1 Ikke-toksiske potentielle miljøpåvirkninger	31
4.1.2 Toksiske potentielle miljøpåvirkninger	33
4.1.3 Forbrug af abiotiske ressourcer	34
4.1.4 Rangordning af scenarier	35
4.1.5 Konklusioner mht. samlede potentielle miljøpåvirkninger	37
4.2 Potentielle miljøpåvirkninger fordelt på processer	37
4.2.1 Potentielle ikke-toksiske miljøpåvirkninger fordelt på processer	37
4.2.2 Potentielle toksiske miljøpåvirkninger fordelt på processer	40

4.2.3	Abiotisk ressourceforbrug fordelt på processer .....	41
4.2.4	Konklusioner mht. potentielle miljøpåvirkninger fordelt på processer .....	43
<b>5.</b>	<b>Følsomhedsanalyser.....</b>	<b>44</b>
5.1	Effektiviteten af udsortering af genbrugelige mursten .....	45
5.2	Transportafstande, substitution af søsten/sand og øget rekarboniseringsgrad .....	48
5.3	Referenceår for murstensfremstilling og energiresourceforbrug i form af savsmuld.....	50
5.4	Konklusioner mht. følsomhedsanalyser .....	51
<b>6.</b>	<b>Overordnede konklusioner .....</b>	<b>52</b>
<b>7.</b>	<b>Referencer .....</b>	<b>54</b>
<b>Bilag 1:</b>	<b>Liste over processer fra eksterne databaser.....</b>	<b>56</b>
<b>Bilag 2:</b>	<b>Kritisk gennemgang af livscyklusvurdering af genbrug af gamle mursten – afsluttende review af FORCE Technology.....</b>	<b>57</b>
<b>Bilag 3:</b>	<b>DTU's kommentarer til reviewet .....</b>	<b>66</b>
<b>Bilag 4:</b>	<b>Notat med Kalk- og Teglværksforenings kommentarer til rapporten .....</b>	<b>69</b>
<b>Bilag 5:</b>	<b>DTUs svar på Kalk- og Teglværksforeningens notat .....</b>	<b>75</b>

# Forord

Denne rapport indeholder en livscyklusbaseret miljøvurdering (LCA) af genbrug af mursten i Danmark.

Livscyklusvurderingen blev udført for Miljøstyrelsen af DTU Miljø i perioden 2012-2013 som en del af en ydelsesaftale mellem Miljøstyrelsen og DTU om forskningsbaseret myndighedsbetjening inden for affaldsområdet. Livscyklusvurderingen blev udført vha. LCA-modellen EASETECH, som er udviklet af DTU Miljø til miljøvurdering af affaldssystemer.

Livscyklusvurderingen blev udført i overensstemmelse med principperne for LCA, som beskrevet i DS/EN ISO-standard 14044. Afrapporteringen følger ISO-standardens krav til en LCA, der er beregnet til offentliggørelse, med inddragelse af en ekstern LCA-ekspert, som udførte en kritisk gennemgang af rapporten, samt en følgegruppe bestående af danske interessenter inden for området.

Projektets følgegruppe bestod af:

Thomas Astrup, DTU Miljø  
Harpa Birgisdottir, Statens Byggeforskningsinstitut  
Tommy Bisgaard, Kalk- og Teglværksforeningen af 1893  
Anders Damgaard, DTU Miljø  
Simon Stig Gylling, Dansk Byggeri  
Erik Kjær, Teknologisk Institut senere erstattet af Abelone Køster, Teknologisk Institut  
Jacob Møller, DTU Miljø  
Anne-Sofie Nielsen, Miljøstyrelsen  
Claus Juul Nielsen, Gamle Mursten A/S  
Anders Christian Schmidt, FORCE Technology

DTU 2013

# Konklusion og sammenfatning

## Indledning

Denne rapport fra DTU Miljø omfatter en livscyklusbaseret miljøvurdering af genbrug af mursten.

Forbehandling af gamle mursten til genbrug modelleredes som udgangspunkt, som det foregår på virksomheden "Gamle Mursten" i Svendborg. Her ankommer murstensaffald fra nedrivninger, hvorefter det sorteres mekanisk og manuelt, således at der oparbejdes en fraktion af mursten, der kan genbruges til nybyggeri. Oparbejdningssprocessen efterlader en restfraktion bestående af mursten uegnede til genbrug blandet med mørtel, sand og beton. Afhængig af fordelingen af materialefraktioner i restaffaldet transporteres det til et knuseværk, som fremstiller vejfyld, eller anvendes uden nedknusning som fyldmateriale ved anlægsarbejder.

Som alternativ til oparbejdning af murstensaffald til genbrug bringes murstensaffald til et knuseværk. Det nedknuste murstensaffald genanvendes som vejfyld eller som fyldmateriale ved andre anlægsarbejder. Denne metode til behandling af murstensaffald er på nuværende tidspunkt langt den mest udbredte i Danmark.

## Metode

Livscyklusvurderingen er udført som en "konsekvens-LCA", hvor miljøkonsekvenserne er opgjort relateret til en beslutning om: 1) genbrug af gamle mursten, eller 2) genanvendelse ved nedknusning til vejfyld. I overensstemmelse med konsekvenstilgangen gøres der brug af systemudvidelser for godskrivning af undgået produktion i forbindelse med genbrug og genanvendelse. I dette projekt har det stor betydning, at genbrug af gamle mursten erstatter produktion af nye mursten, således at genbrug godskrives undgået produktion af nye mursten. Ved genanvendelse erstattes materialer, som normalt benyttes til vejfyld, f.eks. grus.

Den funktionelle enhed er den ydelse, affaldssystemet skal levere i alle scenarier, for at de er sammenlignelige. Den defineres som:

- Genbrug/genanvendelse af 1 ton murstensaffald indeholdende en vis mængde mursten, der fuldt ud - teknisk og funktionelt – kan erstatte en ny mursten i form af facadesten eller bagsten, inkl. transport og håndtering/oparbejdning samt slutdisponering af eventuelle restprodukter fra oparbejdningssprocessen.

LCA'en benytter miljøpåvirkningskategorier og LCIA-metoder, som beskrevet i ILCD-håndbogen (European Commission, 2011) samt i den internationale standard for EPD (Environmental Product Declaration) for byggematerialer DS/EN 15804.

Fokus for dataindsamlingen i projektet var to virksomheder udvalgt til at repræsentere hhv. oparbejdning af murstensaffald til genbrug (Gamle Mursten A/S) og produktion af nye mursten (Kalk- og Teglværksforeningen af 1898 repræsenterede sidstnævnte). Gamle Mursten A/S og Kalk- og Teglværksforeningen af 1898 indvilligede i at levere data om disse processer. For de resterende processer, der indgår i LCA'en, anvendes data fra anerkendte LCA-databaser, herunder især ecoinvent, samt anden relevant litteratur.

## Forudsætninger

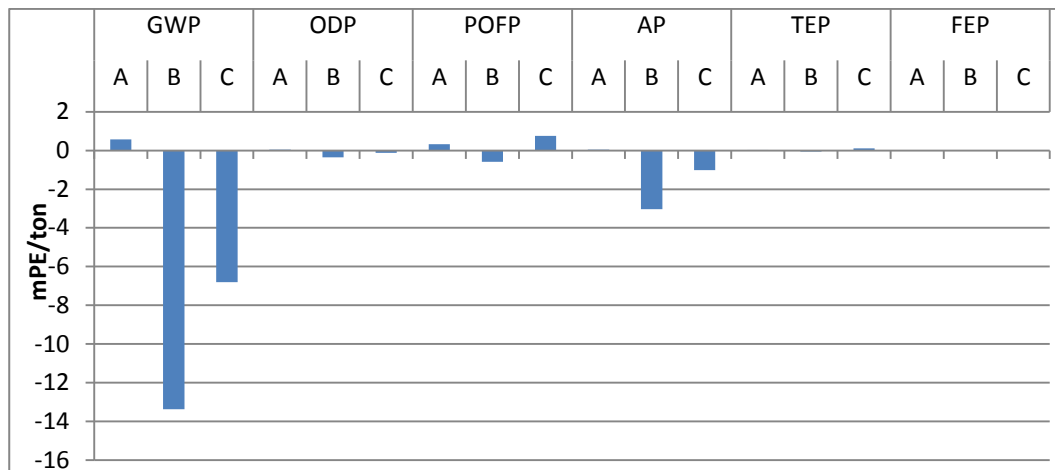
Miljøvurderingens resultater bygger på en række forudsætninger, hvor især den antagelse er afgørende, at en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud - teknisk og funktionelt - erstatter en ny mursten i form af facadesten eller bagsten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. Det forudsættes desuden, at murstensaffaldet, som ankommer til oparbejdning på oparbejdningsvirksomheden indeholder en vis (større) mængde genbrugelige mursten.

LCA'en er derfor modelleret med scenarier, hvor gamle mursten erstatter hhv. facadesten og bagsten og ikke en "gennemsnitssten". Udover dette spiller sorteringseffektiviteten på oparbejdningsvirksomheden en rolle for denne behandlingsmetodes miljøprofil, ligesom transportstrækninger i de forskellige scenarier er af betydning.

## Resultater

På baggrund af de indsamlede data blev genbrug og genanvendelse modelleret vha. LCA-modellen EASETECH og de potentielle miljøpåvirkninger opgjort. De potentielle miljøpåvirkninger blev normaliseret og beregnet i milli( $10^{-3}$ )personækvivalenter (mPE)<sup>1</sup> per ton murstensaffald.

På figur A ses de samlede ikke-toksiske potentielle miljøpåvirkninger ved genanvendelse (scenarie A) og genbrug (scenarie B og C). I scenarie A er der tale om 100 % genanvendelse. I de to genbrugsscenarier B og C antages det, at 64,5 % af murstensaffaldet (på vægtbasis) består af genbrugelige mursten, som udsorteres. Denne effektivitet for udsortering af mursten til genbrug repræsenterer den gennemsnitlige værdi beregnet på baggrund af oplysninger fra virksomheden "Gamle Mursten". De genbrugelige mursten kan enten erstatte nye facadesten (scenarie B) eller nye bagsten (scenarie C). Restaffaldet, som består af sand, mørtel og ikke-genbrugelige mursten, transporteres til et knuseværk og behandles som i scenarie A, eller transporteres direkte til genanvendelse uden nedknusning.



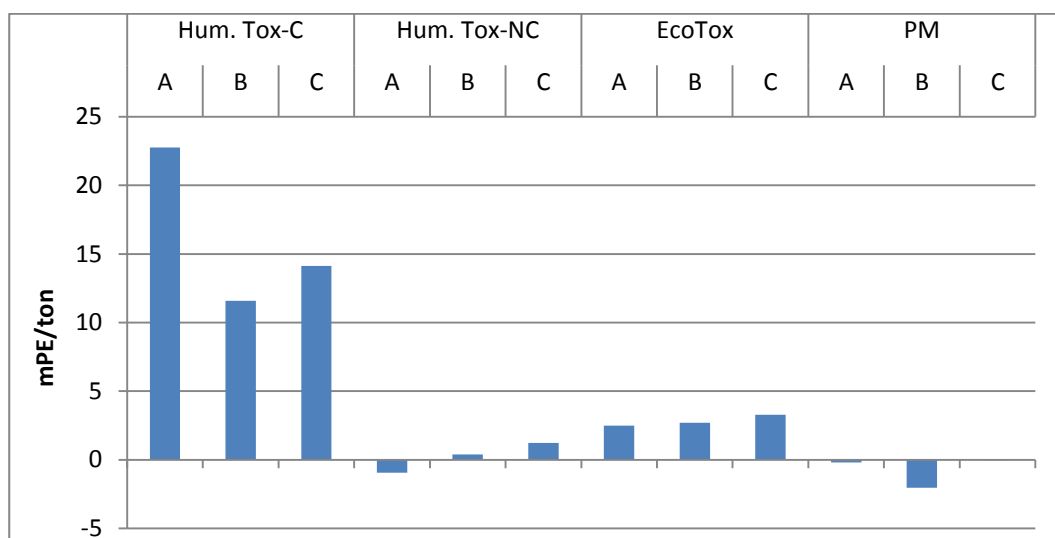
**FIGUR A. SAMLEDE IKKE-TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER (MPE) PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,5 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C). GWP: DRIVHUSEFFEKT, ODP: STRATOSFÆRISK OZONNEDBRYDNING, POFP: FOTOKEMISK OZONDANNELSE, AP: FORSURING, TEP: TERRESTRISK EUTROFIERING, FEP: FERSKVANDEUTROFIERING.**

<sup>1</sup> En personækvivalent (PE) svarer til den gennemsnitlige årlige belastning fra én person i den pågældende miljøpåvirkningskategori.



Figur A viser, at de numerisk største nettoværdier findes i miljøpåvirkningskategorien drivhuseffekt. Genbrug af 64,5 % af murstensaffaldet med substitution af facadesten, scenarie B, leder til en potentiel miljøbesparelse på -13,4 mPE/ton murstensaffald. Dette svarer til -103,6 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald. I scenarie C – substitution af bagsten – er den potentielle miljøbesparelse mindre og andrager -6,8 mPE/ton murstensaffald. Dette svarer til -52,6 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald. Scenarie A, hvor der ikke er genbrug, men udelukkende genanvendelse, leder til en lille potentiel nettomiljøbelastning på 0,6 mPE/ton murstensaffald svarende til 4,5 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald. Grunden til, at substitution af bagsten (scenarie C) giver mindre potentielle miljøbesparelser, er, at produktion af nye bagsten er forbundet med et lavere energiforbrug per sten end facadesten.

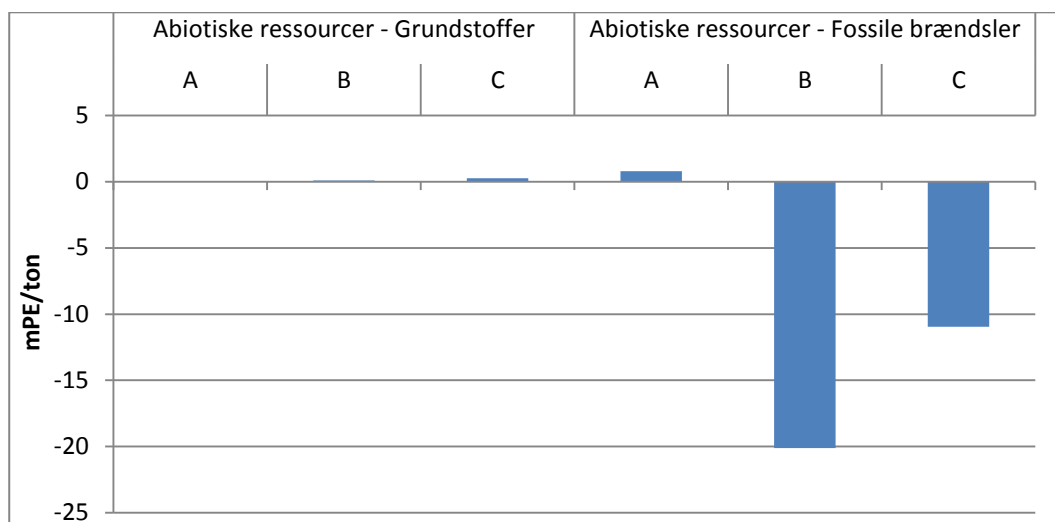
Figur B viser de samlede toksiske potentielle miljøpåvirkninger ved genanvendelse og genbrug af murstensaffald. Miljøbelastningerne i kategorien humantoksicitet, cancerteffekter er numerisk set af samme størrelse målt i mPE per ton murstensaffald som drivhuseffekten, og forskellene mellem scenarierne er ligeledes sammenlignelige med forskellene i kategorien drivhuseffekt.



**FIGUR B. SAMLEDE TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,4 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C). HUM. TOX-C: HUMANTOKSICITET, CANCEREFFEKTER, HUM. TOX-NC: HUMANTOKSICITET, IKKE-CANCEREFFEKTER, ECOTOX: ØKOTOKSICITET, PM: PARTIKELEFFEKTER.**

I forhold til de ikke-toksiske miljøpåvirkningskategorier er de toksiske dog forbundet med en væsentlig større usikkerhed; dette gælder karakteriseringsfaktorer såvel som normaliseringsreferencer. Ved sammenligning af scenarier mht. toksiske miljøpåvirkninger, skal der derfor en meget stor relativ forskel til, før man med sikkerhed kan udtale sig om, at scenarierne er signifikant forskellige. Det vurderes, at dette ikke er tilfældet mht. de toksiske miljøpåvirkninger vist i figur B, som således ikke kan benyttes til at rangordne scenarierne i forhold til potentielle toksiske miljøpåvirkninger.

Forbruget af abiotiske ressourcer i form af fossile brændsler samt grundstoffer, f.eks. naturgas, metaller etc. er vist på figur C. Ressourceforbruget for grundstoffer er meget begrænset og ligger under 0,2 mPE/ton murstensaffald for alle scenarier.



**FIGUR C. SAMLET FORBRUG AF ABIOTISKE RESSOURCER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,4 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C).**

Der er derimod forskel på forbruget af fossile brændsler. I genanvendelsesscenarie A er der et nettoforbrug på 0,8mPE, hvorimod der i genbrugsscenarierne B og C er besparelser på hhv. -20 og -11 mPE/ton murstensaffald. Besparelsen skyldes, at der bruges naturgas i produktion af nye mursten, og dette forbrug undgås ved genbrug i disse scenarier, hvilket også illustreres ved resultater for drivhuseffekten.

Ved sammenligning af de potentielle miljøpåvirkninger rangordnes scenarierne inden for de enkelte miljøpåvirkningskategorier. I et flertal af miljøpåvirkningskategorier var de normaliserede værdier dog så små eller usikkerheden så stor, at det ikke var realistisk at rangordne dem. Som det ses af tabel A, var det således kun muligt at rangordne scenarierne i fire ud af tolv miljøpåvirkningskategorier. I disse kategorier var resultatet imidlertid forholdsvis klart, idet scenarie B (genbrug med substitution af facadesten) udviste de største miljøbesparelser i alle fire kategorier. Scenarie C (genbrug med substitution af bagsten) var nummer to i tre kategorier, men lå sidst i den fjerde miljøpåvirkningskategori, fotokemisk ozondannelse. Genanvendelsesscenariet med 100 % genanvendelse af murstensaffald ved nedknusning til vejfyld (scenarie A) havde de største nettomiljøbelastninger i tre kategorier og lå nummer to i den fjerde kategori.

Det kan på den baggrund konkluderes, at når man tager hensyn til rangordenen af scenarier i miljøpåvirkningskategorierne drivhuseffekt, forsuring, fotokemisk ozondannelse og forbrug af fossile brændsler, er genbrug med substitution af facadesten miljømæssigt set en mere fordelagtig behandlingsmetode end genanvendelse.

**TABEL A. RANGORDNING AF GENANVENDELSES- OG GENBRUGSSCENARIER. "1" ER BEDST OG BETEGNER DEN STØRSTE MILJØBESPARELSE ELLER MINDSTE MILJØBELASTNING. "-" BETEGNER AT SCENARIERNE IKKE KAN RANGORDNES.**

Miljøpåvirkningskategorier		Genanvendelse (scenarie A)	Genbrug med substitution af facadesten (scenarie B)	Genbrug med substitution af bagsten (scenarie C)
Ikke-toksiske påvirkningskategorier	Drivhuseffekt	3	1	2
	Stratosfærisk ozonnedbrydning	-	-	-
	Fotokemisk ozondannelse	2	1	3
	Forsuring	3	1	2
	Terrestrisk eutrofiering	-	-	-
	Ferskvandseutrofiering	-	-	-
Toksiske påvirkningskategorier	Humantoksicitet, cancereffekter	-	-	-
	Humantoksicitet, ikke-cancereffekter	-	-	-
	Økotoksicitet	-	-	-
	Partikler	-	-	-
Forbrug af abiotiske ressourcer	Grundstoffer	-	-	-
	Fossile brændsler	3	1	2

### Følsomhedsanalyser

For at undersøge miljøvurderingens robusthed blev der udført et antal følsomhedsanalyser, hvoraf de to mest betydende drejede sig om ændret sorteringseffektiviteten på oparbejdningsanlægget og ændrede transportstrækninger bl.a. mellem oparbejdningsvirksomhed og nybyggeriet, hvor murstene skal genbruges.

Det kan konkluderes, at LCA'en var robust over for ændringer i genbrugsprocenten i intervallet 30 til 80 %, idet det kun var i kategorien fotokemisk ozondannelse, at rangordnen blev påvirket, og det kun ved mindre end en 35 % genbrug. Ved nedsætning af transportafstanden af genbrugelige mursten til 50 km i stedet for 175 km, som benyttedes i hovedscenarierne, medførte det hhv. en stigning i miljøbesparelser og et fald i miljøbelastninger i forhold til basisscenariet, hvilket understreger betydningen af transport i denne LCA. Mht. de resterende følsomhedsanalyser, der inkluderede substitution af søsten/sand i stedet for grus samt større rekarbonatisering (murstens optag af CO<sub>2</sub> gennem deres levetid), havde de ingen betydning for det samlede resultat.

### Konklusioner

Det er vigtigt først at understrege, at miljøvurderingens resultater bygger på en række forudsætninger, hvor især den antagelse er afgørende, at en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud - teknisk og funktionelt - erstatter en ny mursten i form af facadesten eller bagsten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. Det forudsættes desuden, at murstensaffaldet, som ankommer til oparbejdning på oparbejdningsvirksomheden indeholder en vis (større) mængde genbrugelige mursten. Det gøres

desuden opmærksom på, at den angivelig bedre varmesoleringsevne ved brug af nye bagmurstens i forhold til genbrugelige mursten ikke indgår i LCA'ens beregninger.

Der er altså ikke tale om oparbejdning af murstensaffald til genbrug af mursten fra gennemsnitligt dansk byggeaffald, og tallene for potentielle miljøpåvirkninger angivet per tons murstensaffald kan ikke uden videre opskaleres til at gælde på landsplan.

Overordnet kan det konkluderes, at oparbejdning af murstensaffald med henblik på genbrug giver anledning til en række miljøbesparelser (dog ikke i alle miljøpåvirkningskategorier) i forhold til genanvendelse i form af nedknusning af murstensaffald til vejbygning. Dette skyldes hovedsagelig, at man ved genbrug erstatter nye mursten, hvorved man undgår de miljømæssige omkostninger ved fremstilling af mursten, herunder energiforbrug og tilhørende emissioner. Da energiforbrug og emissioner ved oparbejdningsprocessen til genbrug er mindre end ved produktion af nye mursten, leder det til potentielle nettobesparelser i en række påvirkningskategorier ved genbrug af mursten. I de fire miljøpåvirkningskategorier drivhuseffekt, forsuring, fotokemisk ozondannelse og ressourceforbrug i form af fossile brændsler, hvor scenarierne kunne rangordnes, ledte genbrug af mursten med substitution af nye facadesten til de største miljøbesparelser i samtlige kategorier. Genbrug med substitution af bagsten udviste ligeledes større potentielle miljøbesparelser end genanvendelse i tre kategorier; i kategorien fotokemisk ozondannelse var miljøbelastningen dog større end ved genanvendelse.

Det kan på den baggrund konkluderes, at når man tager hensyn til rangordenen af scenarier i miljøpåvirkningskategorierne drivhuseffekt, forsuring, fotokemisk ozondannelse og forbrug af fossile brændsler, er genbrug med substitution af facadesten miljømæssigt set en mere fordelagtig behandlingsmetode end genanvendelse.

# 1. Formål

Formålet med "LCA af genbrug af mursten" var at udføre en livscyklusbaseret miljøvurdering af *genbrug* af murstensaffald ved oparbejdning af mursten til nybyggeri (hvor det forudsættes, at en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud - teknisk og funktionelt - erstatter en ny mursten i form af facadesten eller bagsten) sammenlignet med *genanvendelse* af murstensaffaldet ved nedknusning og anvendelse af dette til vejfyld eller opfyldning i forbindelse med andet anlægsarbejde.

LCA'en beskriver genbrug og genanvendelse af mursten, som det foregår på nuværende tidspunkt (referenceår 2012), hvor der kun er tale om én virksomhed, "Gamle Mursten A/S", der oparbejder gamle mursten til brug for nybyggeri. Dette lægger begrænsninger på modellering af affaldssystemet mht. geografisk placering, og dermed transportafstande samt sorterings effektiviteter på oparbejdningsanlæg. I et antal følsomhedsanalyser blev der derfor anlagt en mere generisk synsvinkel, dvs. at systemet ikke begrænsedes til den virksomhed, der på nuværende tidspunkt beskæftiger sig med dette affaldshåndteringsområde.

Projektet kom i stand på foranledning af Miljøstyrelsen, der vil benytte resultaterne som en del af beslutningsgrundlaget om eventuelt at indføre behandlingskrav for murstensaffald. Det skal her nævnes, at miljøvurderingen efterfølgende bliver suppleret med en samfundsøkonomisk vurdering, som ligeledes kommer til at indgå i Miljøstyrelsens beslutningsgrundlag.

Målgruppen for miljøvurderingen er først og fremmest Miljøstyrelsen. Virksomheder og institutioner, der kan tænkes at blive direkte berørt af miljøvurderingens resultater, herunder virksomheder, der oparbejder murstensaffald, teglværker, knuseværker samt offentlige institutioner, der beskæftiger sig med byggeri, forventes ligeledes at have interesse i miljøvurderingens resultater.

Miljøvurderingen er udført som en del af en ydelsesaftale mellem Miljøstyrelsen og DTU om forskningsbaseret myndighedsbetjening inden for affaldsområdet.

# 2. Omfang og udformning af LCA'en

Afsnit 2.1 til 2.15 beskriver LCA'ens omfang og udformning, dvs. scope.

## 2.1 Overordnede principper

Livscyklusvurderingen er udført som en "konsekvens-LCA", hvor miljøkonsekvenserne er opgjort relateret til en beslutning om: 1) genbrug af gamle mursten, eller 2) nedknusning til vejfyld. I overensstemmelse med konsekvenstilgangen gøres der brug af systemudvidelser for godskrivning af undgået produktion i forbindelse med genbrug og genanvendelse.

I en konsekvens-LCA bør der så vidt muligt anvendes "marginale" procesdata i stedet for gennemsnitsværdier, dvs. data for de processer, som reelt påvirkes af beslutningen om disponering af murstenene. Det er dog ikke altid muligt at identificere alle marginale processer, og det er heller ikke tilfældet i nærværende projekt. I princippet er der kun tale om marginal teknologi i forbindelse med elproduktion, hvor der benyttes dansk marginal elproduktion baseret på kul, samt mht. oparbejdning af mursten til genbrug, som bygger på data fra virksomheden "Gamle Mursten A/S". De resterende anvendte processer er gennemsnitsprocesser, f.eks. produktion af nye mursten og grusgravning. Den valgte proces for nedknusning anses for at være en repræsentativ teknologi for denne proces, som dog ikke nødvendigvis er marginal.

En anden meget vigtig antagelse er, at mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud kan erstatte nye mursten. LCA'ens resultater er opnået under forudsætning af, at denne antagelse er gældende. Dette punkt er beskrevet mere detaljeret i afsnit 2.9 nedenfor.

LCA'en er gennemført i henhold til principper om "best practice" for LCA, valg af LCIA-metoder og miljøpåvirkningskategorier samt vurdering af datakvalitet. Som konsekvens heraf blev LCA'en udført i overensstemmelse med ISO-standarderne 14040 og 14044.

Ved valg af LCIA-metoder og miljøpåvirkningskategorier fulgtes anbefalingerne i ILCD-håndbogen "Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context" (EU Commission, 2011) samt standarden DS/EN 15804 "Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg – Miljøvaredeklarationer – Grundlæggende regler for produktkategorien byggevarer".

Mht. vurdering af datakvalitet tildelte de enkelte datasæt for teknologier eller processer kvalitetsindikatorerværdier som beskrevet af Frieschnecht et al. (2007). Det tilstræbtes i så høj grad som muligt at undgå brug af processer med dårligere kvalitetsindeks end 3 målt på en skala mellem 1 og 5 (1 betegner bedste kvalitet).

## 2.2 Beskrivelse af behandlingssystemer til hhv. oparbejdning og nedknusning af murstensaffald

De to systemer, som behandler murstensaffald, og som sammenlignes vha. LCA'en er kort beskrevet i dette afsnit. Oparbejdning af gamle mursten til genbrug modelleres som udgangspunkt, som det foregår på virksomheden "Gamle Mursten" i Svendborg. Her ankommer murstensaffald fra nedrivninger, hvorefter det sorteres mekanisk og manuelt, således at der oparbejdes en fraktion af

mursten, der kan genbruges til nybyggeri. Under processen udsorteres forureninger i form af plast, metal og træ o.a., som transporteres til genanvendelse eller anden bortskaffelse. Dette efterlader en restfraktion bestående af mursten uegnede til genbrug blandet med mørtel, sand og beton. Afhængig af fordelingen af materialefraktioner i restaffaldet transporteres det til et knuseværk, som fremstiller vejfyld eller anvendes uden nedknusning som fyldmateriale ved anlægsarbejder. En mindre del af restfraktionen forudsættes benyttet som tilslagsmateriale til "grønne tage". Denne mængde tilskrives dog de samme miljøpåvirkninger i de videre beregninger som anvendelse af murstensaffald til vejfyld.

Som alternativ til oparbejdning af murstensaffald til genbrug bringes murstensaffald til et knuseværk, hvor det nedknes til vejfyld eller fyldmateriale til andre anlægsarbejder. Ved modtagning af murstensaffald udsorteres forureninger i form af plast, metal og træ o.a., som transporteres til genanvendelse eller anden bortskaffelse. Det resterende nedknuste murstensaffald benyttes til vejfyld eller som fyldmateriale ved andre anlægsarbejder. Denne metode til behandling af murstensaffald er på nuværende tidspunkt langt den mest udbredte i Danmark.

Der findes knuseanlæg, som mht. kapacitet rækker fra små lokalt-baserede anlæg til meget store anlæg, der behandler bygeaffald fra det meste af Danmark. Knusning af restaffald fra "Gamle Murstens" oparbejdningsanlæg, sker på en lille lokalt beliggende virksomhed i Svendborg. Et sådant anlæg er ikke repræsentativt for de mest benyttede nedknusningsvirksomheden. Der blev derfor taget kontakt til LH Hockerup A/S beliggende ved Roskilde, som repræsenterer en noget større virksomhed. På forslag fra projekts følgegruppe besluttedes det dog efterfølgende at benytte en af de største aktører på markedet – RGS90 - som model for knusning af murstensaffald i denne LCA.

### 2.3 Den funktionelle enhed

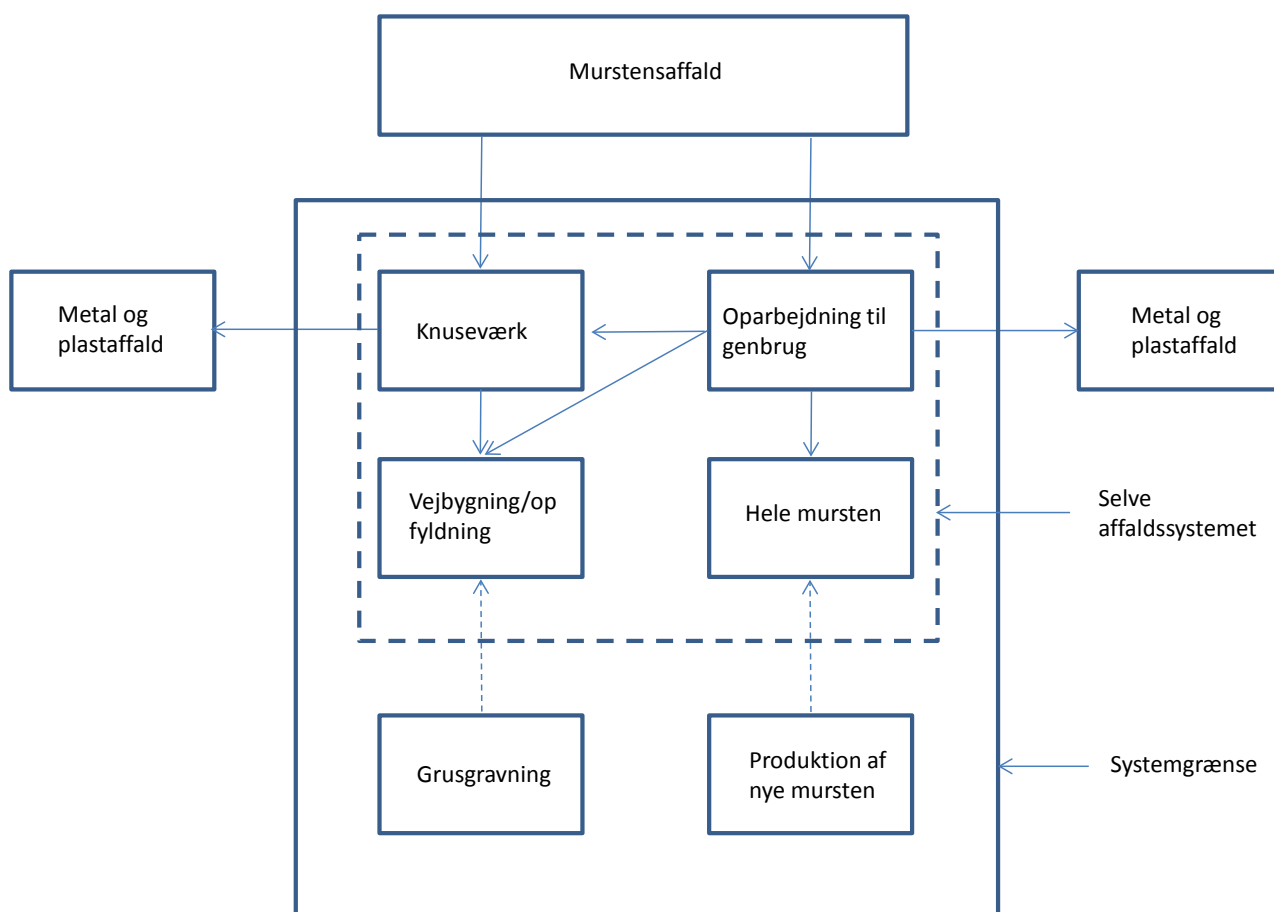
Den funktionelle enhed er den ydelse, affaldssystemet skal levere i alle scenarier, for at de er sammenlignelige. Den defineres som:

- Genbrug/genanvendelse af 1 ton murstensaffald indeholdende en vis mængde mursten, der fuldt ud - teknisk og funktionelt – kan erstatte en ny mursten i form af facadesten eller bagsten, inkl. transport og håndtering/oparbejdning samt slutdisponering af eventuelle restprodukter fra oparbejdningsprocessen.

Det bør understreges, at man ikke direkte kan multiplicere mængden af dansk murstensaffald med miljøpåvirkningen beregnet per ton murstensaffald for at vurdere den samlede mulige miljøpåvirkning af genbrug af mursten i Danmark. I så tilfælde vil det være nødvendigt at kende mængden af genbrugelige mursten i den samlede mængde murstensaffaldet, og det ligger ikke inden for rammen af nærværende projekt at fastlægge dette på landsplan.

### 2.4 Systemgrænser

Figur 1 viser systemgrænserne for LCA'en. Fuldt optrukne pile mellem processer indikerer transportprocesser. Processer, der ligger uden for systemgrænsen dvs. affaldsgenerering samt disponering af metal og plastaffald fra sortering eller nedknusning, medtages ikke i LCA'en. Transport der krydser systemafgrænsningen er heller ikke medtaget i LCA'en. Stiplede pile betegner undgået transport ved substitution af primærprocesser.



FIGUR 1. SYSTEMGRÆNSER. PROCESSER PLACERET UDEN FOR SYSTEMGRÆNSEN INDGÅR IKKE I LCA'EN. FULDT OPTRUKNE PILE BETEGNER TRANSPORTPROCESSER. STIPLEDE PILE BETEGNER UNDGÅET TRANSPORT VED SUBSTITUTION AF PRIMÆRPROCESSER. PILE, DER SKÆRER SYSTEMGRÆNSEN, BETEGNER TRANSPORT, SOM IKKE INDGÅR I LCA'EN.

Det modellerede system starter ved affaldsgenereringen, hvor murstenene bliver til affald, dvs. at miljøpåvirkninger fra produktionssystemet ikke indgår. Det forudsættes, at indsamling og transport til behandlingssted er ens for oparbejdning til genbrug og nedknusning til vejfyld. Transport mellem lokalitet for oparbejdning/knusning og genbrug/genanvendelse er medtaget. Slutdeponering af eventuelle restprodukter fra behandlingen samt affaldssystemets udveksling af materialer og energi med det omliggende produktionssystem indgår også i systemet, dog indgår behandling af udsorterede materialer i form af metal og plast ikke, da mængderne forudsættes at være ens i alle scenarier.

En del af restaffaldet fra oparbejdning af genbrugelige mursten går til nedknusning på et knuseværk og benyttes efterfølgende til vejbygning og opfyldning, men det kan også transporteres direkte til anvendelsessted uden forudgående nedknusning. En mindre del af restaffaldet fra oparbejdning af genbrugelige mursten går til anvendelse i "grønne tage". Da oplysningerne om dette er sparsomme, og det desuden er uklart, hvad murstensaffaldet i dette tilfælde substituerer, udelades denne anvendelse af LCA'en. I stedet for antages hele mængden af restaffald at blive benyttet som vejfyld og godskriver undgået produktion af grus.

## 2.5 Allokering/systemudvidelse

Da LCA'en benytter en konsekvenstilgang, er der anvendt udvidelse af systemgrænserne til at omfatte substitution i stedet for allokering. Det betyder, at affaldssystemet krediteres for undgåede emissioner, som ellers ville være sket ved produktion af de substituerede produkter.



I nærværende projekt vurderes to hovedscenarier. Det ene producerer genbrugelige mursten til nybyggeri og restaffald, der kan benyttes til vejfyld. Det andet scenarie producerer alene nedknust murstensaffald, der kan anvendes til vejfyld. Det førstnævnte affaldssystem fratrækkes emissionerne ved den undgåede produktion (og transport) af nye mursten samt emissionerne ved undgået produktion (og transport) af grus. Det sidstnævnte affaldssystem fratrækkes alene emissionerne ved den undgåede produktion (og transport) af grus. På den måde kan de to systemer sammenlignes på et retfærdigt grundlag. Dette er i tråd med anbefalingerne i ISO 14044, som anbefaler brug af systemudvidelse.

## **2.6 Miljøpåvirkningskategorier, LCIA-metoder og fortolkning af resultater**

LCA'en benytter miljøpåvirkningskategorier og LCIA-metoder, som beskrevet i ILCD-håndbogen (European Commission (2011), Hauschild et al., 2012) samt i den internationale standard for EPD (Environmental Product Declaration) for byggematerialer DS/EN 15804.

Herudover benyttes påvirkningskategorierne for abiotiske ressourcer (fossile samt grundstoffer) fra CML-metoden, som det anbefales i DS/EN 15804. Desuden er medtaget kategorier for human- og økotoksicitet i form af USETox, hvilke også er anbefalet i ILCD-håndbogen, men ikke medtaget i DS/EN 15804. Partikelstoffer, der påvirker åndedræt, er ikke medtaget i humantoksicitet i USETox. Partikelstoffer er derfor modelleret ifølge UPFM-modellen (Humbert, 2009). Brug af UPFM-modellen er også anbefalet i ILCD (European Commission (2011), Hauschild et al., 2012), men ikke medtaget i DS/EN 15804.

De valgte miljøpåvirkningskategorier er vist i Tabel 1. Der gøres opmærksom på, at USETox og UPFM er behæftet med en del usikkerhed, hvilket bør tages i betragtning ved fortolkning af resultaterne. Emissionerne samles i potentielle miljøpåvirkningskategorier, og alle emissioner, der bidrager til en påvirkningskategori, adderes vægtet i forhold til deres belastning og emissionens størrelse og gives samme enhed. Dette kaldes karakterisering.

Karakteriseringsværdierne fra CML-metoden for forbrug af abiotiske ressourcer er baseret på data direkte fra CML (2012). Data for terrestrisk eutrofiering er importeret fra ecoinvent (2013) og dernæst sammenlignet med data i SimaPro for at sikre, at de blev importeret korrekt. Værdierne fra ecoinvent mht. terrestrisk eutrofiering er blevet kopieret til alle recipienter (urban air, non-urban air, lower stratosphere etc.), da CML kun opgiver data som "unspecified", og ikke præcist angiver til hvilken recipient udledningen sker. Værdien for "unspecified" er derfor anvendt for de andre recipienter, idet disse kan være brugt i dataset i EASETECH eller importeret fra ecoinvent.

De potentielle miljøpåvirkninger kan endvidere normaliseres, dvs. omregnes for hver af påvirkningskategorierne til en fælles enhed i form af en personækvivalent (PE), idet de faktiske belastninger divideres med den gennemsnitlige årlige belastning fra én person i det relevante geografiske område. Tabel 1 viser ligeledes de anvendte normaliseringsreferencer for omregning til personækvivalenter for de benyttede miljøpåvirkningskategorier.

**TABEL 1. MILJØPÅVIRKNINGSKATEGORIER OG NORMALISERINGSREFERENCER SOM ANVENDES I DETTE PROJEKT.**

Påvirkningskategori	Metode	Version	For-kor-telse	Normaliserings-reference	Scope	Kilde for normaliserings-reference
Drivhuseffekt	IPCC 2007		GWP100	7730 Kg CO <sub>2</sub> -ækv./PE/år	Verden	Laurent et al. (2011a)
Stratosfærisk ozonenedbrydning	EDIP	<sup>4</sup> 2.05	ODP	2,05*10 <sup>-2</sup> kg CFC11-ækv./PE/år	Verden	Laurent et al. (2011a)
Forsuring	ReCiPe midpoint	<sup>4</sup> 1.06	AP	49,9 kg SO <sub>2</sub> ækv./PE/år	EU 28	Sleeswijk et al. (2008)
Terrestrisk eutrofiering	CML	<sup>4</sup> 2.05	TEP	<sup>1</sup> 356 kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ækv./PE/år	EU 15	Huijbregts et al. (2003) and CML (2012)
Ferskvands-eutrofiering	ReCiPe midpoint	<sup>4</sup> 1.06	FEP	0,69 kg P-ækv./PE/år	EU 28	Sleeswijk et al. (2008)
Fotokemisk ozondannelse	ReCiPe midpoint	<sup>4</sup> 1.06	POFP	5,9 kg NMVOC/PE/år	EU 28	Sleeswijk et al. (2008)
Humantoksicitet, cancereffekter	USETox	<sup>4</sup> 1.01	HT-C	<sup>2</sup> 3,25*10 <sup>-5</sup> CTU <sub>h</sub> /PE/år	EU 38	Laurent et al. (2011b)
Humantoksicitet, ikke-cancereffekter	USETox	<sup>5</sup> 1.01	HT-NC	<sup>2</sup> 8,14*10 <sup>-4</sup> CTU <sub>h</sub> /PE/år	EU 38	Laurent et al. (2011b)
Økotoxicitet	USETox	<sup>5</sup> 1.01	ET	<sup>3</sup> 5060 CTU <sub>e</sub> /PE/år	EU 38	Laurent et al. (2011b)
Partikler	Baseret på UPFM	1.0	PM	4,71 kg PM 2.5/PE/år		Humbert (2009)
Forbrug af abiotiske ressourcer, grundstoffer	CML	<sup>6</sup> 4.1	ADP-E	<sup>1</sup> 0,217 kg antimon-ækv./PE/år	EU 15	Oers et al. (2002) og CML (2012)
Forbrug af abiotiske ressourcer, fossile brændsler	CML	<sup>6</sup> 4.1	ADP-F	<sup>1</sup> 8,06*10 <sup>4</sup> MJ/år	EU 15	Oers et al. (2002) og CML (2012)

<sup>1</sup> Beregnet af DTU på grundlag af et befolkningstal i 1995 for EU-15 på 380 millioner (Huijbregts, 2003), og den samlede miljøpåvirkning i 1995 (CML, 2012).

<sup>2</sup> CTU<sub>h</sub> comparative toxic unit for humans.

<sup>3</sup> CTU<sub>e</sub> - comparative toxic unit for ecosystem.

<sup>4</sup> Karakteringsfaktorer importeret fra ecoinvent (2013). Kvalitetscheck ved sammenligning med SimaPro værdier.

<sup>5</sup> Karakteringsfaktorer importeret fra ecoinvent (2013). Kvalitetscheck ved sammenligning med SimaPro værdier og opdateret for metaller med UseTox (2013) værdier.

<sup>6</sup> Baseret på værdier direkte importeret fra CML (2012)

Der gøres opmærksom på, at resultater i de ikke-toksiske påvirkningskategorier traditionelt betragtes som mere velunderbyggede, og derfor bør tillægges mere vægt end de toksiske påvirkningskategorier. Dette skyldes til dels generel konsensus om beregningsmetoder for drivhuseffekt, forsuring etc., samt det forhold, at datagrundlaget for at vurdere toksicitet er væsentligt mere usikkert. Det sidste punkt er dog til dels søgt afhjulpet ved anvendelse af LCIA-metoden USEtox, som repræsenterer en "konsensusmodel" blandt LCA-eksperter til beregning af potentielle toksiske miljøpåvirkninger. Uanset anvendelse af USEtox er der stor usikkerhed forbundet med de toksiske påvirkningskategorier (Rosenbaum et al., 2008).

Det skal her bemærkes, at uanset usikkerheden forbundet med karakteringsfaktorer og normaliseringsreferencer vil det være muligt at udtrække information af scenarier også inden for de toksiske påvirkningskategorier. Det skyldes bl.a., at der kan forekomme kvalitative oplysninger om emission af toksiske stoffer i ét scenarie, som ikke optræder i et andet scenarie, selvom størrelsen af miljøpåvirkningen ikke lader sig eksakt fastslå.

## **2.7 LCA-modellen EASETECH**

LCA-modelleringen er gennemført med LCA-modellen EASETECH (Clavreul et al., 2013), der er udviklet ved Danmarks Tekniske Universitet. Med udgangspunkt i en detaljeret kemisk sammensætning af materialefraktioner i affaldet beregner EASETECH masse-flow, ressourceforbrug og emissioner fra affaldssystemer, som defineres af brugeren. EASETECH omfatter kildesortering, indsamling og transport af affald, materialeoparbejdningsfaciliteter, forbrændingsanlæg, komposteringsanlæg, biogasanlæg, kombinerede biogas- og komposteringsanlæg, deponeringsanlæg, anvendelse af organisk affald i jordbruget, genanvendelse af materialer, energiudnyttelse samt materialeudnyttelse.

Modellen indeholder data for udvalgte anlæg og processer, men tillader også at specifikke anlæg opstilles og gemmes i modellen. Scenarier med flere strenge kan opstilles for et givet system startende med affaldsgenereringen og afsluttende med slutdisponeringen i et deponi, ved industriel materialegenanvendelse, udspredd på landbrugsjord, udnyttelse i energianlæg eller ved materialeudnyttelse. Hvor der sker materialegenanvendelse, energiudnyttelse eller materialeudnyttelse, krediteres affaldssystemer for de ressourcemæssige og miljømæssige besparelser, der opnås ved, at den tilsvarende produktion baseret på jomfruelige materialer undgås. EASETECH indeholder databaser for en række centrale processer, for eksempel for transport, elektricitets- og varmfremstilling. Herudover kan data importeres fra kommercielle databaser.

## **2.8 Databehov**

Dataindsamling omfattede tre forskellige virksomheder, som repræsenterer hhv. oparbejdning af murstensaffald til genbrug (Gamle Mursten A/S), nedknusning af murstensaffald (RGS90) samt produktion af nye mursten (Kalk- og Teglværksforeningen af 1893). Disse virksomheder indvilligede i at levere data fra deres processer. Mht. "Gamle Mursten" drejede det sig om en massebalance, der beskriver alle udgående massestrømme, der relaterer sig til et ton behandlet murstensaffald. Derudover angav de energiforbrug i form af el, varme og drivmidler per ton behandlet murstensaffald. Nedknusningsfirmaet leverede data om energiforbrug ved nedknusning. Kalk- og Teglværksforeningen af 1893 stillede data til rådighed om produktion af nye mursten i Danmark.

For de resterende processer, der indgår i LCA'en, anvendes data fra anerkendte LCA-databaser, herunder især ecoinvent, samt anden relevant litteratur. Dette gælder samtlige transportprocesser. En fuldstændig liste over anvendte processer fra eksterne databaser kan findes i bilag 1. Mht. emissioner fra murstensaffald anvendt til vejopfyldning benyttes data fra Wahlström et al. (2013), der angiver data for nedsivning.

## **2.9 Antagelser**

Miljøvurderingens resultater bygger på en række forudsætninger, hvor især den antagelse er afgørende, at en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud - teknisk og funktionelt - erstatter en ny mursten i form af facadesten eller bagsten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. Det forudsættes desuden, at murstensaffaldet, som ankommer til oparbejdning på oparbejdningsvirksomheden indeholder en vis (større) mængde genbrugelige mursten.

LCA'en er derfor modelleret med scenarier, hvor gamle mursten erstatter hhv. facadesten og bagsten og ikke en "gennemsnitssten". Produktion af facade- og bagsten sker med forskelligt energiforbrug, hvilket indgår ved beregning af substitutionsværdien af genbrugelige mursten. Det er her antaget, at en facadesten vejer 2,4 kg og en bagmursten vej 1,6 kg. Det gøres desuden opmærksom på, at den angiveligt bedre varmeisoleringssevne ved brug af nye bagmurstens i forhold til genbrugelige mursten ikke indgår i LCA'ens beregninger.

Det forudsættes desuden, at indsamling og transport af murstensaffald foregår på samme måde og med samme miljøpåvirkninger ved genbrugsløsningen som ved nedknusning til vejfyld. På samme måde antages det som udgangspunkt, at forureninger i murstensaffaldet i form af metal og plast bliver udsorteret med lige stor effektivitet i de to løsninger, hvorved disse processer udelades.

## **2.10 Ikke-videnskabelige vurderinger**

Der anvendes ikke vægtning i LCA'en, men der bliver i kapitel 4 gjort opmærksom på, i hvor høj grad de forskellige miljøpåvirkningskategorier er behæftet med usikkerhed. Dette gælder især for de ikke-toksiske miljøpåvirkningskategorier i forhold til de toksiske, og dette indgår i fortolkningen af resultaterne.

## **2.11 Begrænsninger**

Det understreges, at der er tale om en fuld LCA udført i overensstemmelse med ISO-standarderne 14040 til 14044. Der er ikke kendskab til begrænsninger i forhold til LCA'ens anvendelse udover det generelle forhold, at LCA'er ikke bør benyttes, som det eneste grundlag for beslutningstagen.

## **2.12 Krav til datakvalitet**

I et tidligere projekt udført af DTU Miljø for Miljøstyrelsen (Jacobsen et al., 2013) blev der fokuseret på at opnå et bedre udtryk for processernes datakvalitet, herunder især eksterne processer, som ikke direkte indgår i affaldssystemet. Erfaringer fra dette projekt ligger til grund for evalueringen af datakvalitet i nærværende projekt. De benyttede processer blev tildelt en kvalitetsindikatorværdi i fem indikator kategorier. En definition af indikatorerne med tilhørende forklaringer til de enkelte indikator kategorier findes i dokumentationen tilecoinvents databaser (Frischknecht et al., 2007) og bygger oprindeligt på Weidema & Wesnæs (1996).

Indikator kategorierne inkluderer "troværdighed", "fuldstændighed" samt "tidsmæssig, geografisk og teknologisk overensstemmelse". Tildeling af indikatorværdi skete ved at sammenligne de anvendte processer med processerne, som de ideelt burde være for at passe ind i miljøvurderingen af genbrug af mursten. Indikatorværdien måles på en skala fra 1 til 5, hvor 1 angiver fuld dokumentation og overensstemmelse, og 5 angiver manglende dokumentation og overensstemmelse i forhold til den ønskede proces. Gennemsnittet af indikator kategorierne beregnedes, og der benyttedes i så høj grad som muligt kun processer, som havde en gennemsnitlig indikatorværdi mindre end 3.

## **2.13 Proces mht. kritisk review**

Ifølge ISO-standarden skal der indgå en uafhængig reviewer, som skal sikre projektets kvalitet. Seniorprojektleder Anders Christian Schmidt fra FORCE Technology varetog denne funktion. Reviewprocessen udførtes i tre trin, hvor revieweren i første trin mødes med DTU Miljø og Miljøstyrelsen og diskuterer det fra DTU Miljø fremsendte materiale om "Formål og udformning/indhold". I andet trin fik reviewer og følgegruppe et endeligt rapportudkast til gennemsyn, og reviewer udfærdigede et udkast til reviewrapport samt indsamlede og strukturerede følgegruppens kommentarer. På baggrund af kommentarerne i den foreløbige reviewrapport færdigjorde DTU Miljø LCA-rapporten. Denne rapportversion ligger til grund for reviewerens endelige reviewrapport, som kan ses af bilag 2.

Der indgik en fagligt bred følgegruppe i projektet. Den havde de samme rettigheder, men ikke pligter, som et reviewpanel i ISO-standardens forstand. De enkelte medlemmer kunne således udtale sig om projektet, hvis de ønskede det, ligesom specifikke kommentarer om ønsket blev publiceret i et appendiks til rapporten. Reviewers rolle i forhold til følgegruppen var at koordinere følgegruppe-medlemmernes input og, som uafhængig ekspert, at bistå dem under LCA'en. Som deltagere i følgegruppen var der repræsentanter fra "Gamle Mursten", Kalk- og teglværksforeningen af 1893, Statens Byggeforskningsinstitut, Dansk Byggeri, samt Teknologisk Institut. Anders Christian Schmidt fra FORCE Technology koordinerede følgegruppemøderne og indsamlede følgegruppens kommentarer til den endelige projektrapport. DTU Miljø og Miljøstyrelsen deltog ligeledes i følgegruppemøderne.

## **2.14 Rapportformat**

Rapportformatet følger beskrivelsen i ISO-standardens.

## **2.15 Tidshorisont**

LCA'en bygger på data om oparbejdning af mursten til genbrug, som ifølge "Gamle Mursten" stammer fra perioden 1/11 2010 til 1/11 2012 (produktionstallene er beregnet på baggrund af data fra 2011 til 1. halvår 2013). Data for produktion af nye mursten stammer fra 2006. De resterende data stammer hovedsagelig fra perioden 2000 til 2012, men kan bygge på ældre primærdata. LCA'en anses derfor at være gældende for den nuværende situation i 2012 og ca. 10 år frem, hvis der ikke sker væsentlige teknologiske ændringer samt ændringer i baggrundssystemerne.

# 3. Livscyklusopgørelser (LCI – Life Cycle Inventories)

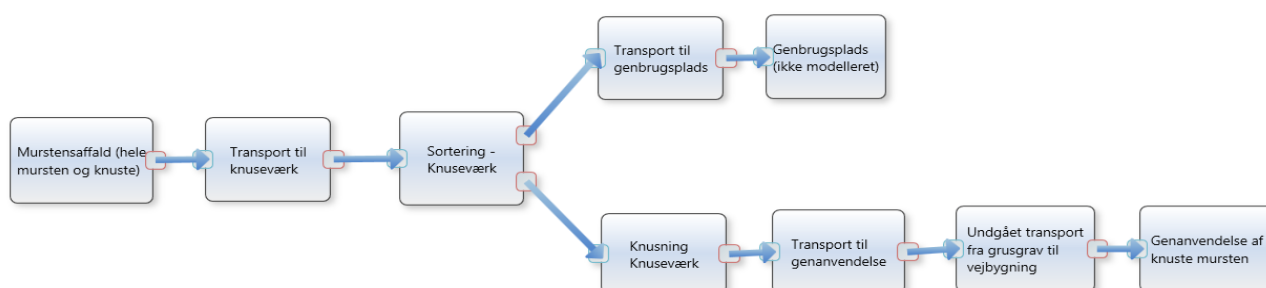
I det følgende gives en beskrivelse af scenarier og behandlingsprocesser, som indgår i LCA'en. Der gives desuden en livscyklusopgørelse (LCI), dvs. en beskrivelse af de procesdata for de enkelte behandlingsprocesser, som anvendes. Det drejer sig om data for oparbejdning af murstensaffald til genbrug, nedknusning af murstensaffald på et knuseværk, fremstilling af nye mursten på et teglværk samt grusgravning. Under transportmateriel beskrives livscyklusopgørelser for lastvogne, frontlæssere og palleløftere. Desuden gøres der rede for livscyklusopgørelser for marginal elektricitet og dieselolie.

For hver proces angives input i form af materialer og energi, f.eks. elektricitet og dieselolie, og output i form af produkter og emissioner. Livscyklusopgørelsen for oparbejdning af gamle mursten bygger på oplysninger om procesforhold fra virksomheden "Gamle Mursten". Virksomheden har ligeledes oplyst om transportmateriel og brændstofforbrug internt på virksomheden. Data for produktion og forbrænding af dieselolie stammer fra ecoinvent (2013)-databasen.

## 3.1 Scenarier

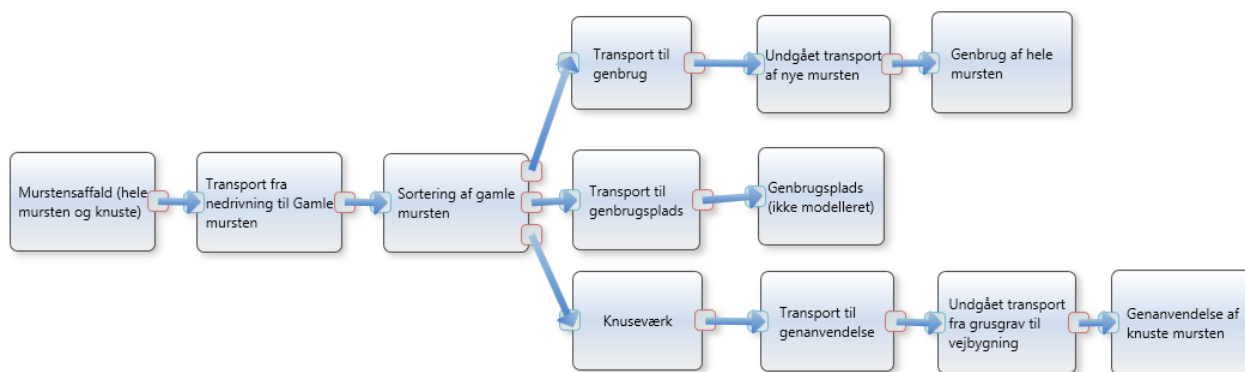
LCA'en medtager tre hovedscenarier: A) genanvendelse af murstensaffald ved nedknusning og anvendelse som vejfyld, B) oparbejdning og genbrug af mursten som erstatning for nye facadesten og C) oparbejdning og genbrug af mursten som erstatning for nye bagsten.

Genanvendelsesscenariet repræsenterer den mest udbredte metode til håndtering af byggeaffald indeholdende mursten. Murstensaffaldet ankommer til et knuseværk, hvor en lille fraktion af metal, plast og træ udsorteres til genanvendelse. Resten af materialet knuses, så det kan benyttes til vejbygning. Energiforbrug i form af elektricitet og dieselolie på anlægget indgår i LCA'en. Efter nedknusning transporteres affaldet til et vejbyggeri, hvor det erstatter grus som vejmateriale. Systemet krediteres de undgåede emissioner ved grusgravning og udsivning fra grusmaterialet samt transport af samme grusmateriale til vejbyggeriet, men tillægges emissioner i form af udsivning fra det nedknuste materiale til overfladevand. Genanvendelsesscenariet som modelleret i EASETECH kan ses på figur 2.



FIGUR 2. GENANVENDELSESSENARIET (A).

Genbrugsscenarierne beskriver håndtering og oparbejdning af 1 ton murstensaffald, som det ankommer til oparbejdningsvirksomheden. På behandlingsanlægget udsorteres hele mursten fra byggeaffaldet. Restaffaldet bestående af mørtel og sand, ikke-genanvendelige mursten og andet byggeaffald transporteres til et knuseværk, hvor det gennemgår samme behandling og videre anvendelse, som i genanvendelsesscenarioet. Desuden frasorteres en lille mængde metal, plast og træ, som transporteres til genanvendelse. Energiforbrug i form af elektricitet, dieselolie og propan (til gaffeltruck) på anlægget indgår i livscyklusopgørelsen. Efter udsortering transporteres genbrugelige hele mursten til nybyggeri. Systemet krediteres undgåede emissioner ved undgået produktion af nye mursten, samt undgået transport af nye mursten til nybyggeri. Genbrugsscenarierne modelleres i EASETECH som vist på Figur 3, idet processen "Genbrug af hele mursten" inkluderer undgået produktion af nye facadesten (scenario B) eller inkluderer undgået produktion af nye bagsten (scenario C).



FIGUR 3. GENBRUGSSCENARIERNE (B OG C). I SCENARIO B SUBSTITUERES FACADESTEN OG I SCENARIO C BAGSTEN.

### 3.2 LCI for oparbejdning af mursten til genbrug

Efter aftale med Miljøstyrelsen indhentede DTU Miljø procesdata, som beskriver oparbejdning af murstensaffald til genbrugelige mursten, hos virksomheden Gamle Mursten A/S beliggende ved Svendborg. Virksomheden udfyldte et dataskema fremsendt af DTU. Gamle Mursten A/S har desuden efterfølgende på DTU's forespørgsel oplyst mere detaljerede produktionstal, som erstattede de i skemaet oplyste. Disse data inkluderer mængderne af indkommet murstensaffald samt produktionen - på vægtbasis - af mursten til genbrug fra perioden 2011-2013. Gamle Mursten A/S medsendte en beregning af udnyttelse af tonnage i % for 2011, 2012 og 1. halvår 2013. DTU har på baggrund af dette beregnet et vægtet gennemsnit af produktionseffektiviteten i perioden 2011 til og med 1. halvår 2013. Produktionseffektiviteten androg ifølge dette 64,6 % af det indkomne murstensaffald, som således blev oparbejdet til genbrugelige mursten.

#### 3.2.1 Teknologibeskrivelse

"Gamle Mursten" oparbejder murstensaffald fra nedrivninger af murstensbebyggelse ved udsortering af hele mursten, som kan genanvendes til nybyggeri. Murstensaffaldet opbevares på en lagerplads i umiddelbar tilknytning til produktionslokalerne. Murstensaffaldet håndteres med en dieseldrevet frontlæsser. Et udendørs beliggende patenteret system af transportbånd forsynet med riste og sigter udsorterer et restprodukt bestående af mørtel, sand og andre urenheder i form af træ, pap og metalstykker fra murstensaffaldet og efterlader hele mursten. Transportbåndene drives af elmotorer. Efter sorteringen kører transportbåndet murstenene ind i en overdækket hal, hvor mørtelrester og skadede mursten frasorteres manuelt. I hallen stables murstenene på paller vha. en propandrevet gaffeltruck.

### 3.2.2 LCI

I tabel 2 ses data for livscyklusopgørelsen (LCI) for "Gamle Mursten". Det gøres opmærksom på, at data er opgjort af "Gamle Mursten" på basis af produktionen i en toårig periode fra 1/11 2010 til 1/11 2012, hvorimod tabel 2 viser massebalance samt energi- og brændstofforbrug beregnet per ton murstensaffald, der ankom til anlægget i samme periode. Det bemærkes, at massebalancen ikke er helt opfyldt, idet outputtet udgør lidt mere end ét ton. Tallene er dog behæftet med relativ stor usikkerhed og er derfor ikke angivet med større præcision. Ydermere antages det, at mængden af restaffald er den samme som i genanvendelsesscenariet.

**TABEL 2. LCI FOR OPARBEJDNING AF MURSTENS PÅ VIRKSOMHEDEN "GAMLE MURSTEN".**

Input	*Mængde	Enhed
Murstensaffald, som det ankommer til anlægget	1	ton
Elektricitet til sortering af murstensaffald	5	kWh/ton
Diesel (frontlæsser. Model: 445TA/EGH. Emissionsstandard EU-direktiv 97/68/CE Tier 3)	1,1	l/ton
Propan (gaffeltruck)	0,083	kg/ton
<b>Output</b>		
Genbrugelige mursten	646	kg/ton
Restaffald bestående af ødelagte mursten, mørtel, sand. Heraf går 50 % til knuseværk og derefter til genanvendelse som vejfyld, og 50 % går direkte til genanvendelse	354	kg/ton
Materialefraktioner tilført genanvendelse (metal, ledninger, træ, plast)	0,486	kg/ton

\*Mængderne er opgjort per ton murstensaffald, der ankom til anlægget i opgørelsesperioden.

Tabel 3 viser transportstrækningerne for tilført murstensaffald og for oparbejdede genbrugelige mursten samt restaffaldet. Der er tale om estimater, der ikke bygger på egentlige opgørelser af kørsel i perioden.

**TABEL 3. TRANSPORT TIL OG FRA "GAMLE MURSTEN".**

Transport			
	Input (murstensaffald)	Output (genbrugelige mursten)	Output (restprodukter)
Oprindelsessted	Fyn	"Gamle Mursten"	"Gamle Mursten"
Destination	"Gamle Mursten"	Hele Danmark	Fyn
Afstand fra behandlingsanlæg (km)	Højst 50 km	0-350 km (gennemsnit på 175 km benyttet)	Højst 50 km
Transportmiddel	10-33 ton lastvogn	10-33 ton lastvogn	10-33 ton lastvogn

### 3.3 LCI for knuseværk

Data for dieselforbrug på knuseværk er baseret oplysninger fra RGS90, som oplyser, at der benyttes ca. 1 diesel til behandling af 7,2 ton murstensaffald. Dette inkluderer gravemaskine og knuseværk (pers. komm. Per Wilborg, RGS90). Forbrændingsprocessen for dieselolie er taget fraecoinvent (2013) databasen, og er for processen "Diesel, burned in building machines".



### 3.4 LCI for murstensfremstilling

Livscyklusopgørelsen for produktion af nye mursten i Danmark bygger på data fra Kalk- og Teglværksforeningen af 1893 (pers. kommunikation med direktør Tommy Bisgaard). Data er af konkurrencehensyn kun tilgængelige som aggregerede data for "repræsentative" danske teglværker, dvs. værker som producerer almindelige facade- og bagmursten (i modsætning til særligt behandlede specialsten) vha. kontinuerligt fyrede tunnelovne med naturgas som eneste brændsel. Referenceåret er valgt til 2006 og ikke 2011 som ellers anvendt i rapporten. Produktionen i 2006 anses af Kalk- og Teglværksforeningen for mere repræsentativ for murstensproduktion i Danmark end produktionen i 2011, som stadig i væsentlig grad var berørt af den internationale finanskrisen. Ressourceforbrug ved murstensproduktion er påvirket af udnyttelsesgraden af ovnkapaciteten, idet produktionsstop og deraf følgende genopvarmning af ovn ved lave udnyttelsesgrader resulterer i øget brændselsforbrug per kg brændte sten. Data fra 2011 vurderes derfor ikke være repræsentative for "normal" murstensproduktion i Danmark.

I perioden 2005 til 2008 blev produktionskapaciteten udnyttet i større grad med resulterende mindre ressourceforbrug per kg brændte sten. Dette antages at ligne den fremtidige markedssituation. Ved inspektion af grønne regnskaber fra perioden 2005 til 2008 for et mellemstort dansk teglværk blev produktionsdata fra 2006 valgt, da energiforbruget i dette år repræsenterede medianværdien i forhold til de andre år. Det pågældende teglværk blev desuden valgt som repræsentativt for dansk murstensproduktion, da det har to store kontinuerligt fyrede tunnelovne, som producerer hhv. facade- og bagmursten, således at det var muligt at dokumentere ressourceforbruget af naturgas og elektricitet for facademursten og bagmursten hver for sig – dette ville være vanskeligt ved anvendelse af gennemsnitsdata for produktionen på danske teglværker.

Livscyklusopgørelsen indeholder data om ressourceforbrug inklusiv råvarer, hjælpestoffer og energiforbrug i form af naturgas til tørringsanlæg og ovn samt elektricitetsforbrug på teglværket. Emissioner ved tørring og brænding er ligeledes beskrevet. Med hensyn til emissioner fra forbrændingsprocessen i ovnen sker der ikke regelmæssige årlige målinger på danske teglværker. Teglværksbranchen anvender derfor erfaringsværdier, som kan findes i Miljøstyrelsen (2000). Generering og efterfølgende håndtering af affald på værket er ikke medtaget i livscyklusopgørelsen, da det vurderes at have mindre betydning for produktionens miljøprofil.

Livscyklusopgørelsen for dansk murstensproduktion benyttet i denne rapport bygger således dels på produktionsdata fra et enkelt teglværk og dels på erfaringsdata. Det benyttede teglværk anses dog for i høj grad at være repræsentativt for den samlede danske murstensproduktion, idet mere end 95 % af dansk murstensproduktion foregår i gasfyrede tunnelovne som på det pågældende værk.

#### 3.4.1 Teknologibeskrivelse

Produktionen af mursten inkluderer gravning af ler, transport til teglværk, forbehandling af leret på teglværket ved æltning og iblanding af diverse hjælpestoffer samt tørring og efterfølgende brænding af stenene i en særlig teglovn. Råmaterialet, leret, graves i en lergrav, som oftest ligger i umiddelbar nærhed af teglværket. Leret kan have forskellige egenskaber, som har indflydelse på, hvilken farve mursten, der skal produceres. Gule mursten fremstilles af ler med højt kalkindhold (op til 20 % på vægtbasis), røde mursten har lavere eller slet intet kalkindhold (0-3 %).

Der produceres to hovedtyper af mursten: facadestenen og bagsten, som har forskellige egenskaber og dermed også forskellig produktionsgang. Facadestenen brændes hårdere, dvs. ved højere temperatur, end bagmursten for bedre at kunne modstå regn og frost, som bagmursten ikke bliver eksponeret for. Da facademursten er synlige, produceres de ofte som "blødstrøgne", dvs. de formes, så det visuelle udtryk ligner håndlavede sten. For bagmursten benyttes i stedet strengpresning, da det

visuelle element ikke er af betydning. Det beskrevne teglværk producere både facadesten og bagmursten i to forskellige produktionslinjer med hver sin teglovn.

Når leret ankommer til teglværket forbehandles det ved æltning og iblanding af hjælpestoffer, som kan være forskellige for facademursten og bagmursten. Som tilsætning til facadesten kan anvendes manganoxid ved produktion af brune eller umbrifarvede sten. Bariumkarbonat tilsættes facadesten for at neutralisere virkningen af sulfat i leret. For at regulere lerets konsistens benyttes hydratkalk ved fremstilling af bagmursten, hvorimod dette stof ikke tilsættes facademursten. Ved fremstilling af bagmursten, som ikke skal leve op til samme krav til styrke som facademursten, men gerne må have stor isoleringsevne, kan anvendes tilsætning af savsmuld til leret. Savsmuldet brænder i ovnen og efterlader bagmurstenene fyldt med hulrum, som medvirker til øget varmeisoleringssevne og samtidig resulterer i mindre rumvægt for bagmursten i forhold til facademursten (gennemsnitligt hhv. 1,6 kg/bagmursten og 2,4 kg/facademursten). Tilsætning af hjælpestoffer sker i lukkede systemer og giver således ikke anledning til emissioner til miljøet.

Derefter tørres de formede mursten, hvorefter de brændes ved 1000-1050 °C for facademursten og 800-900 °C for bagmursten i gasfyrede tunnelovne, som opereres kontinuerligt og kun slukkes ved længerevarende produktionsstop. Tunnelovnenes kapacitet ligger er i størrelsesordenen nogle tusinde tons per uge. Der er ikke egentlige røggasrensingsanlæg tilsluttet ovnene, men da der udelukkende anvendes naturgas i ovnene er emissioner fra brændslet små. Den væsentligste processpecifikke emission er NO<sub>x</sub>. Derudover sker der emission af SO<sub>2</sub> og HF pga. lerets indhold af svovl og fluor. Teglværksbranchen har en generel dispensation for rensning af HF. NO<sub>x</sub> og SO<sub>2</sub>-emissioner er størst per ton facademursten, da disse emissioner til en vis grad er temperaturafhængige, men da der ikke foreligger direkte emissionsmålinger, er der ikke gjort forsøg på at differentiere disse emissioner for facademursten og bagmursten.

Det bemærkes, at brændselsforbruget i form af naturgas per kilo producerede mursten er lavest for bagmursten. Dette skyldes bl.a. den lavere brændingstemperatur ved produktion af bagmursten, og at der benyttes savsmuld, der ligeledes fungerer som brændsel, ved produktion af bagmursten. Det modvirkes dog af, at rumvægten af facademursten er højere end for bagmursten. Ovnen vil derfor indeholde mere ler per volumenenhed ved brænding af facademursten, hvilket medfører en bedre brændselsøkonomi.

### 3.4.2 LCI

På baggrund af ovenstående fastlagdes den samlede livscyklusopgørelse for dansk produktion af hhv. facademursten og bagmursten som angivet i tabel 4. Tabellen inkluderer kalkspaltning og rekarbonatisering, dvs. den modsatte proces af kalkspaltning, som begge har betydning for den samlede CO<sub>2</sub>-emission ved murstensproduktion. Ved brænding af mursten med kalkindhold vil CaCO<sub>3</sub> spaltes til CaO og CO<sub>2</sub>. I princippet kan rekarbonatisering (kalkdannelse) forløbe reversibelt ud fra det dannede CaO, ved at CO<sub>2</sub> trænger ind i stenene under murstenenes levetid. Historiske data omhandlende mursten fra 1600-tallet udgravet i forbindelse med Metrobyggeriet tyder på, at mellem 75 og 84 % (DTU benytter medianværdien 80 %) af spaltet kalk kan gendannes i løbet af en 200 års periode (pers. kommunikation 11/7 2013 fra Helge Hansen, Murværkscentret, Teknologisk Institut). Helge Hansen gør opmærksom på, at der ikke findes egentlige målte data for dette, men at størrelsen af gendannelsen bygger på et skøn. Kalk- og Teglværksforeningen vurderer, at den største del af rekarbonatiseringsprocessen vil forløbe i starten af murstenenes levetid. DTU har på den baggrund indregnet 75 % af rekarbonatiseringen i LCA'en tidsramme. Sammenholdt med en rekarbonatiseringsgrad på 80 % i løbet af 200 år vil rekarbonatiseringen inden for LCA'ens tidsramme på 100 år udgøre 60 % af det oprindeligt spaltede kalk.

**TABEL 4. LIVSCYKLUSOPGØRELSE FOR REPRÆSENTATIV DANSK PRODUKTION AF HHV. 1 TON NYE FACADEMURSTEN OG 1 TON NYE BAGMURSTEN. SOM REFERENCEÅR ER VALGT 2006.**

<b>Input:</b>	<b>Facademursten</b>	<b>Bagmursten</b>
<b>Ressourceforbrug på teglværk</b>		
Råmateriale		
Ler (ton tørvægt)	1,045	1,045
Energi		
<sup>1</sup> Naturgas (Nm <sup>3</sup> )	50,4	46,0
EI (kWh)	44,4	49,2
Dieselolie og smørelolie (L)	1,02	1,02
Hjælpestoffer		
Savsmuld (m <sup>3</sup> )		0,162
Bariumkarbonat (kg)	1,32	
Hydratkalk (kg)		3,30
Mangandioxid (70 %) (kg)	3,25	
Vandværksvand inkl. sanitetsvand (m <sup>3</sup> )	0,106	0,106
Andet		
Plastfolie (kg)	0,53	0,53
<b>Ressourceforbrug ved lergravning</b>		
Energi		
<sup>2</sup> Dieselolie (L)	0,80	0,80
<b>Ressourceforbrug ved transport fra lergrav til teglværk</b>		
Energi		
<sup>3</sup> Dieselolie (L)	0,54	0,54
<b>Output:</b>		
<b>Produkter</b>		
Mursten (ton)	1	1
<b>Emissioner fra teglovn</b>		
<sup>4</sup> CO <sub>2</sub> fra brændsel (kg)	113,9	103,8
<sup>5</sup> CO <sub>2</sub> fra kalkspaltning af CaCO <sub>3</sub> i leret (kg)	30,8	30,8
<sup>6</sup> CO <sub>2</sub> optaget ved rekarbonatisering (kg)	-18,5	-18,5
SO <sub>2</sub> (g)	149,4	149,4
NO <sub>x</sub> (g)	58,1	58,1
Partikler (g)	8,3	8,3
<sup>6</sup> HF (g)	42,1	8,4
HCl (g)	37,4	37,4
Samlet -emission af kg CO <sub>2</sub> - ækvivalenter inkl. transport og gravning af ler, forbrug og fremstilling af energi- og hjælpestoffer samt nettokalkspaltning. Beregnet vha. EASETECH.	203	191

<sup>1</sup>Brændselsforbrug i form af naturgas til fremstilling af hhv. facadestenen og bagstenen er beregnet ud fra energiforbruget angivet i Benchmarking 2007 (Kalk- og Teglværksforeningen, 2008), teglværkets grønne regnskab (Anon., 2009) samt ved anvendelse af Energistyrelsens standardværdi for energiindhold i brændsler (Energistyrelsen, 2013)

<sup>2</sup>Det var ikke muligt at fremskaffe data for lergravning i Danmark. Der blev derfor benyttet data fraecoinvent (2013), som bygger på schweiziske produktionsforhold.

<sup>3</sup>Der antages at være 10 km mellem lergrav og teglværk. Returkørsel foregår tom. Transporten sker med en 32 ton EURO4-lastvogn med et dieselforbrug på 0,027 L/ton km (ILCD-database: "Earth moving lorry, Gross vehicle mass 32t, pay load capacity 19t, Highway driving, EURO4 LIPASTO").

<sup>4</sup>Beregnet ud fra et energiindhold og en emissionsfaktor for naturgas på hhv. 0,0396 GJ/Nm<sup>3</sup> og 57,03 ton CO<sub>2</sub>/TJ (Energistyrelsen, 2013).

<sup>5</sup>Beregnet på grundlag af det pågældende teglværks verificerede CO<sub>2</sub>-emission (CO<sub>2</sub>-kvoterindberetning i 2006) fratrukket den beregnede CO<sub>2</sub>-emission fra brændslet.

<sup>6</sup>I princippet kan rekarbonatisering, dvs. kalkdannelse, forløbe reversibelt ud fra det dannede CaO, ved at CO<sub>2</sub> trænger ind i stenene under murstenenes levetid. (pers. kommunikation 11/7 2013 fra Helge Hansen, Murværkscentret, Teknologisk Institut).

<sup>5</sup>Emission af HF i facadesten er beregnet ud fra DANAK (2005). Emissionen fra brænding af bagmursten er sat til 20 % af denne værdi, idet emissionen fra brænding af bagmursten iflg. Kalk- og Teglværksforeningen er væsentlig mindre pga. lavere ovntemperatur.

### 3.5 LCI for transportmateriel

I forbindelse med de tre scenarier er antaget følgende transportafstande:

Genanvendelsesscenariet:

- Transport fra bygningsnedrivning til knuseværk – 50 km
- Transport fra knuseværk til genanvendelse af knust murstensaffald – 50 km
- Undgået transport af grus pga. genanvendelse af knust murstensaffald – 50 km

Genbrugsscenarierne:

- Transport fra bygningsnedrivning til "Gamle Mursten" – 50 km
- Transport af ikke-genbrugeligt murstensaffald fra "Gamle Mursten" til knuseværk – 50 km
- Transport fra knuseværk til genanvendelse af knust murstensaffald – 50 km. Transport fra "Gamle Mursten" til genbrug af mursten – 175 km
- Undgået transport af grus pga. genanvendelse af knust murstensaffald – 50 km
- Undgået transport af nye mursten pga. genbrug af mursten – 50 km

Det er antaget at transporten for alle processer er foretaget i en lastbil med en bærekapacitet på 16-32 ton. Til modelleringen er brugt processen "Transport, lorry 16-32t, EURO5, RER" fra ecoinvent (2013) databasen.

### 3.6 LCI for grusgravning

Knuste mursten antoges at erstatte grus som bundlag. I modellering af grusgravning var det ikke muligt at finde direkte danske data. Derfor blev processen, "gravel, crushed, at mine, CH", fra ecoinvent (2013) benyttet.

### 3.7 LCI for sugning af søsten/sand

I forbindelse med følsomhedsanalysen blev det besluttet at undersøge, hvad effekten ville være hvis man godskrev substitution af søsten/sand i stedet for grus. Det blev opgivet, at der i forbindelse med sandsugning blev brugt 127 liter diesel per time over en 6 timers periode til at fremskaffe 550 m<sup>3</sup> sand (pers. kommunikation Anders Schmidt, Force Technology). Dette blev omregnet til et forbrug på  $9,2 \cdot 10^{-4}$  l diesel per kg sand ved antagelse af at vådt sand har en massefylde på 1,5 tons/m<sup>3</sup>. Produktion af dieselolie er baseret på ecoinvent (2013) processen "diesel, at regional storage, RER".

For at estimere emissioner i forbindelse med operation af en sandsuger benyttedes en rapport af Andreasen (2012). Heri findes en oversigt over, hvilke dieselmotorer, der bruges til sand- og ralsugning. Det blev oplyst, at de levede op til Tier 2 for emissionsstandarder i maskinstørrelsen 225-450 kW. Fra Dieselnet (2013) fandtes det, at denne emissionsstandard gav følgende maksimale emissioner omregnet per kg sand/ral: Partikler 0,71 mg, NO<sub>x</sub> 3,3 mg, CO<sub>2</sub> 0,002 kg, CO 13 mg og HC 4,7 mg. Da der ikke fandtes konkrete målinger på dieselmotorerne, blev disse tal for emissionsstandarden benyttet ved modellering af sandsugning.

### 3.8 LCI for nyttiggørelse af knuste mursten som vejfyld

Det knuste murstensaffald antages at blive anvendt som gruserstatning i vejunderlag. I forbindelse hermed vil der være udvaskning af stoffer fra murstensaffaldet. Udvasningsprofilen for de knuste mursten samt den undgåede udsivning fra det substituerede grus er baseret på Wahlström et al. (2013).

### 3.9 LCI for marginal dansk elektricitet og produktion af dieselolie

Emissioner i forbindelse med elektricitetsforbrug er antaget at være den danske marginal, hvilket ifølge Energistyrelsen (2011) primært er baseret på kul. Dette giver en emission på 960 g CO<sub>2</sub>-ækv/kWh baseret på data fra Astrup et al (2011). Produktion af dieselolie er baseret på ecoinvent (2013) processen "diesel, at regional storage, RER".

### 3.10 Datakvalitetsindeks

Datakvalitet blev evalueret i nærværende projekt som beskrevet ovenfor i afsnit 2.12. De benyttede processer blev tildelt en kvalitetsindikatorværdi i fem indikator kategorier, som inkluderer "troværdighed", "fuldstændighed" samt "tidsmæssig, geografisk og teknologisk overensstemmelse". Indikatorværdien måles på en skala fra 1 til 5, hvor 1 angiver fuld dokumentation og overensstemmelse, og 5 angiver manglende dokumentation og overensstemmelse i forhold til den ønskede proces. Tabel 5 viser resultaterne for de benyttede processer i de forskellige kvalitetsindikator kategorier.

**TABEL 5. DATAKVALITETSINDEKS FOR GENANVENDELSESPROCESSER OG TILHØRENDE PRIMÆRPROCESSER ANVENDT I PROJEKTET.**

Processer	1Datakvalitetsindeks					
	Troværdighed	Fuldstændighed	Tidsmæssig overensstemmelse	Geografisk overensstemmelse	Teknologisk overensstemmelse	Gennemsnit
Oparbejdning af murstensaffald til genbrug	1	1	1	1	1	1
Nedknusning af murstensaffald	2	1	1	1	1	1,2
Fremstilling af nye mursten	1	2	2	1	1	1,4
Udsivning fra vejfyld	1	1	1	3	2	2,4
Sugning af søsten/sand	2	3	1	2	2	2,0
Grusgravning	2	2	2	3	3	2,4
Marginal dansk elproduktion	1	2	2	1	2	1,6
Forbrænding af dieselolie ved transport	2	1	2	2	2	1,8
Fremstilling af dieselolie	2	2	2	3	2	2,2

<sup>1</sup>I hver kategori scorede processernes indikatorværdi på en skala fra 1 til 5, hvor 1 er bedst. Inddelingen i kategorier følger Weidema & Wesnæs (1996) med angivelse af krav til processerne for at opnå en bestemt indikatorværdi som beskrevet af Frischknecht et al. (2007).

Inddelingen i kategorier følger Weidema & Wesnæs (1996) med angivelse af krav til processerne for at opnå en bestemt indikatorværdi som beskrevet af Frischknecht et al. (2007).

Som det ses, var der ingen af processerne, der scorede mere 2,4 point som gennemsnitsværdi for samtlige indikator kategorier (1 er bedst og 5 er dårligst). Processerne "Oparbejdning af murstensaffald til genbrug", "Nedknusning af murstensaffald", "Fremstilling af nye mursten", havde alle et gennemsnitligt kvalitetsindikatorindeks mindre end 2, og repræsenterer derved meget høj datakvalitet. Dette skyldes bl.a., at data fra de tre førstnævnte processer er indhentet ved direkte kontakt til virksomhederne og derved scorer højt mht. tidsmæssig, geografisk og teknologisk overensstemmelse. "Fremstilling af nye mursten" scorer dog kun 2 mht. fuldstændighed og tidsmæssig overensstemmelse. Det skyldes, at emissionerne fra brænding af mursten til dels bygger på litteraturværdier, da der ikke udføres regelmæssige emissionsmålinger på danske teglværker. Som beskrevet i afsnit 3.4 bygger LCI'en for fremstilling af nye mursten på data fra 2006, hvilket gør, at den tidsmæssige overensstemmelse ikke er perfekt.

"Udsivning fra vejfyld" og "Sugning af søsten/sand" samt "Grusgravning" har datakvalitetsindeks mellem 2,0 og 2,4, hvilket er acceptabelt, men betegnet lidt ringere kvalitet end de tre forudgående processer. Mht. "Udsivning fra vejfyld" er udsivningen angivet for et L/S-forhold på 10, hvilket afhængigt af klima, og hvor materialet anvendes, kan være en længere periode end de 100 år, som er LCA'ens tidsmæssige systemgrænse. Dette giver anledning til at score processen højere i kategorien "Teknologisk overensstemmelse". Den geografiske overensstemmelse er heller ikke fuldstændig, da data stammer fra Finland. "Sugning af søsten/sand" scores til 3 mht. fuldstændighed, da der ikke fandtes oplysninger om skibs- og motortype i primærdata. Der blev derfor gjort en række antagelser om dette, som medvirker til den højere score i denne kategori. Da det ikke var muligt at fremskaffe danske data om grusgravning, blev processen taget fraecoinvent (2013), hvor grusgravning findes beskrevet under schweiziske produktionsforhold. Dette giver anledning til de højere scorer mht. geografisk og teknologisk overensstemmelse.

"Marginal dansk elproduktion", "Forbrænding af dieselolie ved transport" og "Fremstilling af dieselolie" er veldokumenterede og mht. processerne for forbrænding og fremstilling af dieselolie er hentet i en anerkendt international LCA-database, hvilket giver anledning til en lav score.

Alt i alt vurderes datakvaliteten til at være tilstrækkelig høj til, at de i sektion 2.12 opstillede krav til datakvalitet kan siges at være opfyldt.

# 4. Vurdering af potentielle miljøpåvirkninger

På baggrund af livscyklusopgørelserne, som beskrevet i kapitel 3, blev de forskellige behandlingsmetoder modelleret vha. LCA-modellen EASETECH, og de potentielle miljøpåvirkninger inklusiv påvirkningskategorierne for udnyttelse af abiotiske ressourcer (fossile samt grundstoffer) opgjort. De potentielle miljøpåvirkninger vises først i tabeller som karakteriserede værdier, f.eks. som kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter eller kg SO<sub>2</sub>-ækvivalenter per ton murstensaffald, og derefter på figurer som normaliserede værdier målt i milli(10<sup>-3</sup>) personækvivalenter (mPE) per ton murstensaffald. Én personækvivalent (PE) svarer til den gennemsnitlige årlige belastning fra én person i den pågældende miljøpåvirkningskategori. For påvirkningskategorien drivhuseffekt er der desuden som supplement i tekstafsnit vedrørende de normaliserede værdier angivet den potentielle miljøpåvirkning målt i kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald.

Resultaterne præsenteres som graferne og tabeller med hver deres type miljøpåvirkningskategorier:

- Ikke-toksiske kategorier: drivhuseffekt, stratosfærisk ozonnedbrydning, fotokemisk ozondannelse, forsuring, terrestrisk eutrofiering og ferskvandseutrofiering
- Toksiske kategorier: humantoksicitet, cancereffekter; humantoksicitet, ikke-cancereffekter; økotoksicitet og effekt af partikler
- Ressourceforbrug: abiotiske ressourcer i form af fossile brændsler og grundstoffer

Numerisk negative værdier betegner undgåede miljøpåvirkninger, dvs. miljøbesparelser, mens numerisk positive værdier betegner nettobelastninger af miljøet.

Afrapporteringen af resultater er opdelt i to hovedafsnit: I det første afsnit (afsnit 4.1) vises de samlede nettoresultater i form af karakteriserede samt normaliserede værdier for de alternative behandlingsmetoder, hvorved rangordenen for behandlingsmetoderne kan bestemmes. I det andet afsnit (afsnit 4.2) er der gået i dybden med de to behandlingsmetoder, idet potentielle miljøpåvirkninger blev yderligere opdelt på de processer, som indgår eller substitueres (undgås) i forbindelse med genanvendelse og genbrug af murstensaffald. I dette afsnit vises kun de normaliserede værdier.

## 4.1 Samlede potentielle miljøpåvirkninger

De samlede potentielle miljøpåvirkninger i scenarierne beregnes ud fra livscyklusopgørelsernes emissioner og ressourceforbrug, som indledningsvis klassificeres i forhold til deres potentielle påvirkninger i forskellige miljøpåvirkningskategorier og derefter karakteriseres med hensyn til deres potentielle miljøpåvirkninger i forhold til en reference. Således beregnes de karakteriserede potentielle miljøpåvirkninger i kategorien drivhuseffekt som CO<sub>2</sub>-ækvivalenter, idet emissionerne omregnes i forhold til referencestoffet, som i dette tilfælde er CO<sub>2</sub>. Karakteriserede værdier kan benyttes til at sammenligne scenariers potentielle miljøpåvirkninger inden for hver enkelt påvirkningskategori, men siger ikke noget om størrelsen af den potentielle miljøpåvirkning set in

forhold til andre miljøpåvirkningskategorier eller i forhold til samfundets samlede miljøpåvirkninger.

For at tillade en sådan sammenligning normaliseres de potentielle miljøpåvirkninger, idet de sættes i relation til de emissioner, en gennemsnitsborgers årligt giver anledning til. Enheden kaldes en personækvivalent (PE). Som eksempel kan nævnes den potentielle miljøpåvirkning i drivhuseffekt-kategorien, hvor 1 PE svarer til 7730 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter, som gennemsnitsverdensborgeren udleder om året. Ved normalisering kan man sammenligne det undersøgte systems bidrag til potentielle miljøpåvirkninger i forskellige påvirkningskategorier, da miljøpåvirkningerne har samme enhed i form af personækvivalenter.

#### 4.1.1 Ikke-toksiske potentielle miljøpåvirkninger

I tabel 6 ses de samlede ikke-toksiske potentielle miljøpåvirkninger angivet som karakteriserede værdier ved genanvendelse (scenarie A), dvs. nedknusning af murstensaffald til anvendelse ved vejbygning og ved genbrug (scenarie B og C), dvs. anvendelse af gamle mursten til nybyggeri. I scenarie A antages det, at 1 ton murstensaffald transporteres til et knuseværk, hvorefter det nedknuste materiale anvendes til fyld ved vejbygning; der er altså tale om 100 % genanvendelse. I de to genbrugsscenarier B og C transporteres 1 ton murstensaffald til oparbejdning til genbrug, og det antages, at 64,5 % af murstensaffaldet (på vægtbasis) består af genbrugelige mursten, som udsorteres.

**TABEL 6. SAMLEDE IKKE-TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER ANGIVET SOM KARAKTERISEREDE VÆRDIER PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,5 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C).**

Miljøpåvirkningskategorier	Enhed/ton murstensaffald	Scenarier		
		A	B	C
Drivhuseffekt	kg CO <sub>2</sub> -ækv.	4,5	-103,4	-52,6
Stratosfærisk ozonnedbrydning	kg CFC11-ækv.	9,5*10 <sup>-7</sup>	-7,2*10 <sup>-6</sup>	-2,7*10 <sup>-6</sup>
Fotokemisk ozondannelse	kg NMVOC	1,7*10 <sup>-2</sup>	-3,1*10 <sup>-2</sup>	4,0*10 <sup>-2</sup>
Forsuring	kg SO <sub>2</sub> -ækv.	2,5*10 <sup>-3</sup>	-1,5*10 <sup>-1</sup>	-5,0*10 <sup>-2</sup>
Terrestrisk eutrofiering	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ækv.	7,2*10 <sup>-3</sup>	-2,1*10 <sup>-2</sup>	4,1*10 <sup>-2</sup>
Ferskvandseutrofiering	kg P-ækv.	2,2*10 <sup>-6</sup>	-8,8*10 <sup>-7</sup>	7,0*10 <sup>-6</sup>

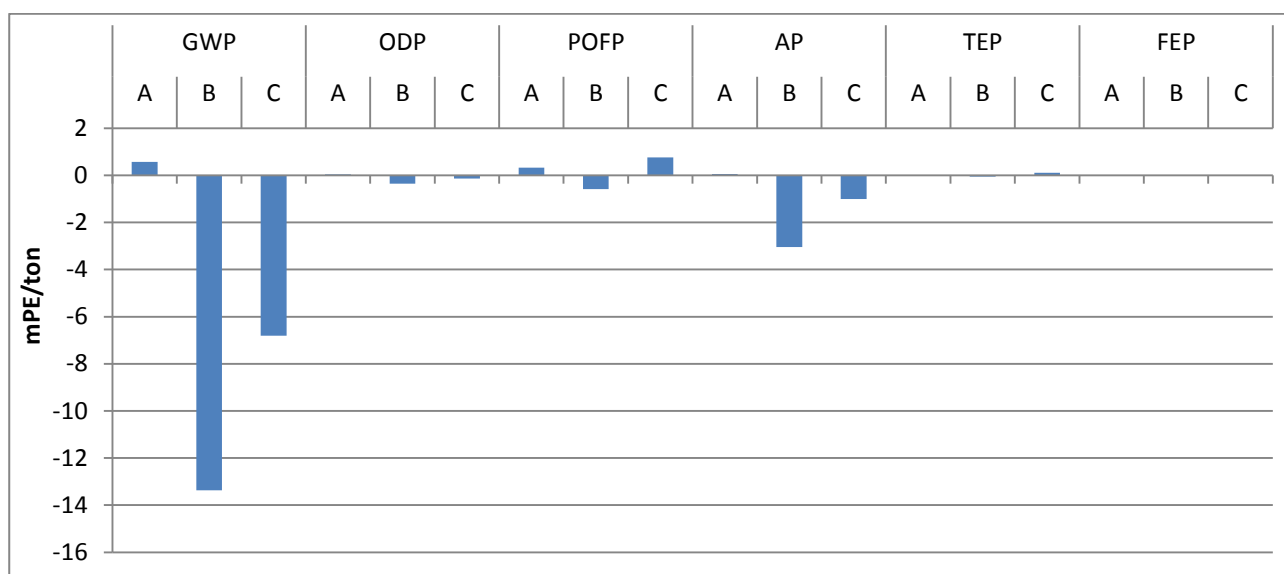
Denne effektivitet for udsortering af mursten til genbrug repræsenterer den gennemsnitlige værdi beregnet på baggrund af oplysninger fra virksomheden "Gamle Mursten". De genbrugelige mursten kan enten erstatte nye facadesten (scenarie B) eller nye bagsten (scenarie C). Restaffaldet, som består af sand, mørtel og ikke-genbrugelige mursten, transporteres til et knuseværk og behandles som i scenarie A, eller transporteres direkte til genanvendelse uden nedknusning.

De karakteriserede værdier i tabel 6 viser, at der var en nettomiljøbesparelse i miljøpåvirkningskategorien drivhuseffekt ved genbrug af 64,5 % af murstensaffaldet med substitution af facadesten, scenarie B, på -103,6 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald. I scenarie C – substitution af bagsten – var den potentielle miljøbesparelse mindre og androg -52,6 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald. Scenarie A, hvor der ikke er genbrug, men udelukkende genanvendelse, ledte til en lille potentiel nettomiljøbelastning på 4,5 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald. Grunden til, at substitution af bagsten giver mindre potentielle miljøbesparelser, er, at produktion af nye bagsten er forbundet med et lavere energiforbrug per sten end facadesten; dette og andre forhold diskuteres yderligere i afsnit 4.2.1 nedenfor.



I de resterende påvirkningskategorier bemærkes det, at scenarie B (genbrug med substitution af facadesten) udviste numerisk negative værdier, dvs. nettomiljøbesparelse, i alle ikke-toksiske påvirkningskategorier i modsætning til scenarie A (genanvendelse), som havde numerisk positive værdier, dvs. nettomiljøbelastninger, i samtlige kategorier i tabel 6. Scenarie C (genbrug med substitution af bagsten) havde nettomiljøbesparelser i tre kategorier ligesom scenarie B, men nettomiljøbelastninger i de resterende tre kategorier, og mht. fotokemisk ozondannelse og ferskvandseutrofiering var miljøbelastningerne endog større end i scenarie A.

For at kunne vurdere miljøpåvirkningerne i de forskellige påvirkningskategorier i forhold til den samlede miljøpåvirkning fra samfundets side, vises de normaliserede resultater for de ikke-toksiske påvirkningskategorier i figur 4. Det ses af figuren, at miljøpåvirkningerne i kategorierne stratosfærisk ozonnedbrydning, terrestrisk eutrofiering og ferskvandseutrofiering var ubetydelige målt i millipersonækvivalenter per ton murstensaffald, idet den numerisk største værdi var -0,4 mPE/ton murstensaffald for scenarie B i kategorien stratosfærisk ozonnedbrydning. Baseret på dette resultat tillægges disse miljøpåvirkningskategorier meget lidt vægt i det følgende.



**FIGUR 4. SAMLEDE IKKE-TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,5 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C). GWP: DRIVHUSEFFEKT, ODP: STRATOSFÆRISK OZONNEDBRYDNING, POFP: FOTOKEMISK OZONDANNELSE, AP: FORSURING, TEP: TERRESTRISK EUTROFIERING, FEP: FERSKVANDSEUTROFIERING.**

Der var større potentielle miljøpåvirkninger i kategorierne drivhuseffekt, forsuring og fotokemisk ozondannelse. I disse tre kategorier var scenarie B (genbrug med substitution af facadesten) det scenarie, som udviste de største miljøbesparelser. I kategorien drivhuseffekt androg miljøbesparelsen 13,4 mPE/ton murstensaffald i scenarie B (genbrug med substitution af facadesten). Besparelsen var noget mindre - -6,8 mPE/ton murstensaffald – i scenarie C (genbrug med substitution af bagsten). I scenarie A med 100 % genanvendelse var der en lille nettomiljøbelastning på 0,6 mPE/ton murstensaffald. Det samme billede tegnede sig mht. forsuring, men miljøbesparelserne i genbrugsscenarierne var ikke så store målt i mPE/ton murstensaffald. I kategorien fotokemisk ozondannelse, hvor scenarie C havde den største miljøbelastning af de tre scenarier, var belastningen dog kun 0,8 mPE/ton murstensaffald.

Genbrugsscenarie B var således miljømæssigt set bedre end genanvendelsesscenarioet mht. drivhuseffekt, forsuring og fotokemisk ozondannelse, mens genbrugsscenarie C udviste den største nettomiljøbelastning af de tre scenarier i den sidstnævnte kategori. De potentielle miljøpåvirkninger i de resterende kategorier var så små, at der bør ses bort fra dem ved indbyrdes sammenligning af scenarierne.

#### 4.1.2 Toksiske potentielle miljøpåvirkninger

Tabel 7 viser de samlede toksiske potentielle miljøpåvirkninger angivet som karakteriserede værdier ved genanvendelse og genbrug af murstensaffald. Det gøres opmærksom på, at de karakteriserede værdier udelukkende kan benyttes til at sammenligne scenarier inden for samme miljøpåvirkningskategori og ikke på tværs af påvirkningskategorierne. Det ses, at størrelsesordenen af de potentielle miljøpåvirkninger var relativt ens for de forskellige scenarier i kategorierne humantoksicitet, cancereffekter, humantoksicitet, ikke-cancereffekter samt økotoksicitet. I kategorien partikeleffekter var der dog mere end en 10-faktor forskel mellem scenarie B og C. Der var tale om nettomiljøbelastninger i de fleste kategorier undtagen i kategorien partikeleffekter, hvor alle scenarier udviste nettomiljøbesparelser.

**TABEL 7. SAMLEDE TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER ANGIVET I KARAKTERISEREDE VÆRDIER PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,5 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C).**

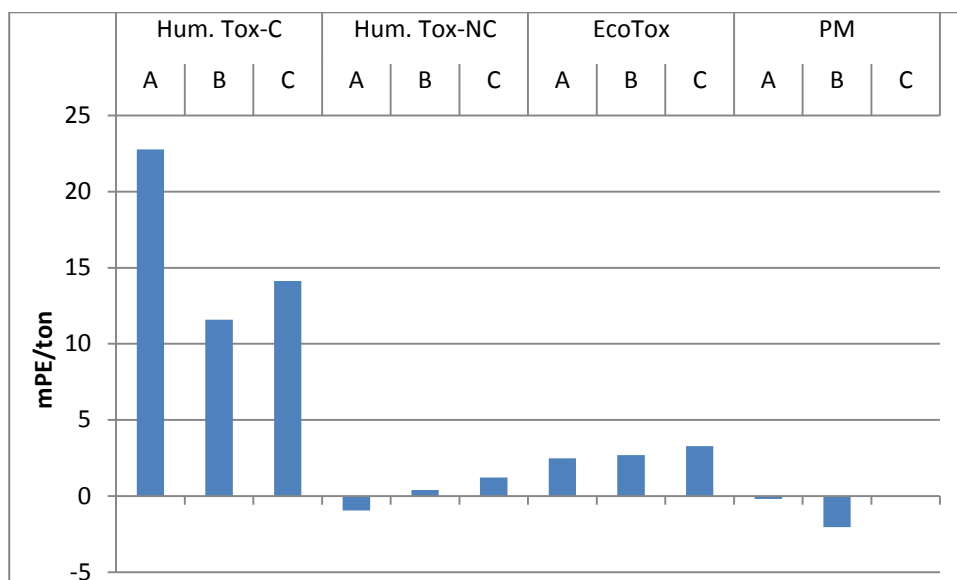
Miljøpåvirkningskategorier	Enhed/ton murstensaffald	Scenarier		
		A	B	C
Humantoksicitet, cancereffekter	kg <sup>1</sup> CTU <sub>h</sub>	7,40*10 <sup>-7</sup>	3,77*10 <sup>-7</sup>	4,59*10 <sup>-7</sup>
Humantoksicitet, ikke-cancereffekter	kg <sup>1</sup> CTU <sub>h</sub>	-7,60*10 <sup>-7</sup>	3,21*10 <sup>-7</sup>	1,00*10 <sup>-6</sup>
Økotoksicitet	kg <sup>2</sup> CTU <sub>e</sub>	12,6	13,7	16,6
Partikeleffekter	kg PM2,5-ækv.	-8,60*10 <sup>-4</sup>	-9,59*10 <sup>-3</sup>	-1,05*10 <sup>-4</sup>

<sup>1</sup>CTU<sub>h</sub> - comparative toxic unit for humans.

<sup>2</sup>CTU<sub>e</sub> - comparative toxic unit for ecosystem.

Efter normalisering (figur 5) kan de potentielle miljøpåvirkninger sættes i relation til samfundets samlede miljøpåvirkninger i de respektive kategorier. Miljøbelastningerne i kategorien humantoksicitet, cancereffekter er numerisk set af samme størrelse målt i mPE per ton murstensaffald som drivhuseffekten, og forskellene mellem scenarierne er ligeledes sammenlignelige med forskellene i kategorien drivhuseffekt.

I forhold til de ikke-toksiske miljøpåvirkningskategorier er de toksiske dog forbundet med en væsentlig større usikkerhed; dette gælder karakteriseringsfaktorer såvel som normaliseringsreferencer. Rosenbaum et al. (2009) opstiller retningslinjer for LCA-eksperter brug af toksicitetsfaktorer i USEtox-metoden. Her gøres det bl.a. opmærksom på, at der er op til en 1000-faktor usikkerhed på individuelle karakteriseringsfaktorer for de forskellige kemiske stoffer. Dette betyder ifølge Rosenbaum et al. (2009), at "...contributions of 1 %, 5 % or 90 % to the total human toxicity score are essentially equal...". På baggrund af dette citat kan man konkludere, at ved sammenligning af scenarier mht. toksiske miljøpåvirkninger, skal der en meget stor relativ forskel til, før man med sikkerhed kan udtale sig om, at scenarierne er signifikant forskellige.



**FIGUR 5. SAMLEDE TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,5 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C). HUM. TOX-C: HUMANTOKSICITET, CANCEREFFEKTER, HUM. TOX-NC: HUMANTOKSICITET, IKKE-CANCEREFFEKTER, ECOTOX: ØKOTOKSICITET, PM: PARTIKELFFEKTER.**

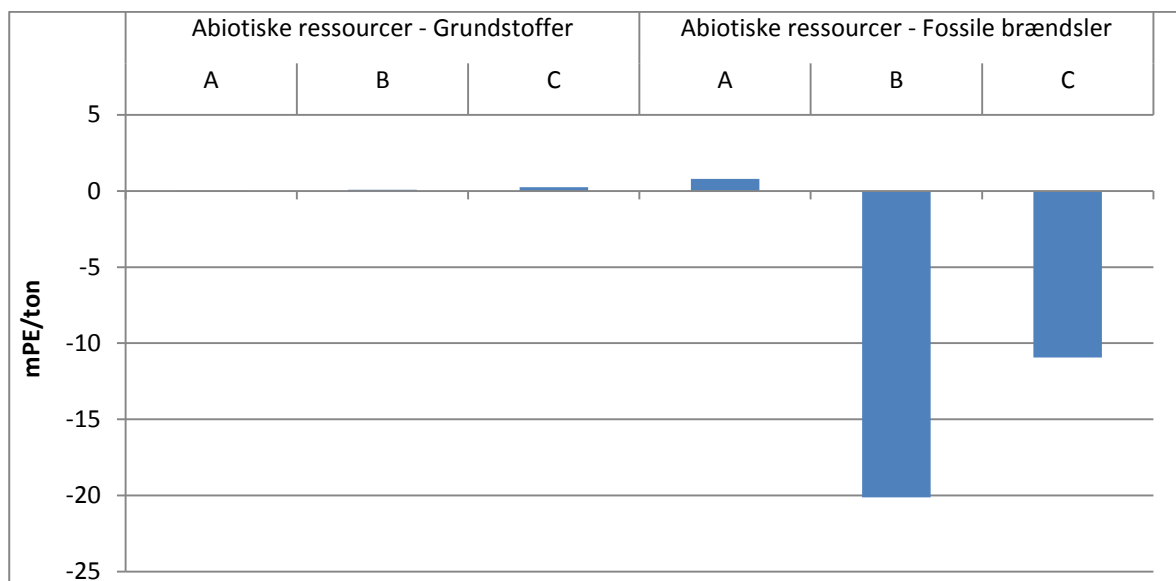
Det vurderes, at dette ikke er tilfældet mht. de toksiske miljøpåvirkninger vist i figur 5, som således ikke kan benyttes til at rangordne scenarierne i forhold til potentielle toksiske miljøpåvirkning. Det betyder dog ikke, at de toksiske påvirkningskategorier udelades i det følgende, idet viden om hvilke processer og kemiske stoffer, der bidrager til øgede eller undgåede emissioner til miljøet, er af interesse, uanset man ikke kan kvantificere de potentielle miljøpåvirkninger med sikkerhed.

#### **4.1.3 Forbrug af abiotiske ressourcer**

Forbruget af abiotiske ressourcer i form af fossile brændsler samt grundstoffer, f.eks. naturgas, metaller etc. er vist som karakteriserede værdier i tabel 8 og som normaliserede værdier på figur 6. Ressourceforbruget for grundstoffer er meget begrænset og ligger under 0,2 mPE/ton murstensaffald for alle scenarier. Der er derimod stor forskel på forbruget af fossile brændsler. I genanvendelsesscenario A er der et nettoforbrug svarende til 0,8mPE/ton murstensaffald, hvorimod der i genbrugsscenarierne B og C er besparelser på hhv. -20 og -11 mPE/ton murstensaffald. Besparelsen skyldes, at der bruges naturgas i produktion af nye mursten, og dette forbrug bliver undgået i disse scenarier, hvilket også illustreres ved resultaterne mht. drivhuseffekten.

**TABEL 8. SAMLET RESSOURCEFORBRUG ANGIVET I KARAKTERISEREDE VÆRDIER PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,5 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C).**

Ressourceforbrug	Enhed/ton murstensaffald	Scenarier		
		A	B	C
Abiotiske ressourcer - Grundstoffer	kg antimon- ækv.	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$
Abiotiske ressourcer - Fossile brændsler	MJ	63,5	-1622	-882



**FIGUR 6. SAMLET FORBRUG AF ABIOTISKE RESSOURCER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,4 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C).**

#### 4.1.4 Rangordning af scenarier

Ved sammenligning af de potentielle miljøpåvirkninger kan scenarierne rangordnes inden for de enkelte miljøpåvirkningskategorier. Tabel 9 viser rangordenen af genanvendelse og genbrug af murstensaffald, som det fremgår af figur 4, 5 og 6 sammenholdt med overvejelserne ovenfor om miljøpåvirkningernes størrelse målt i personækvivalenter samt usikkerheden ved bestemmelse af de toksiske miljøpåvirkninger. "1" er bedst og betegner, at scenariet har den største miljøbesparelse eller den mindste miljøbelastning af de tre scenarier. I et flertal af miljøpåvirkningskategorier er de normaliserede værdier så små eller usikkerheden så stor, at det ikke er realistisk at rangordne dem; dette angives med "-" i tabellen.

**TABEL 9. RANGORDNING AF GENANVENDELSES- OG GENBRUGSSCENARIER. "1" ER BEDST OG BETEGNER DEN STØRSTE MILJØBESPARELSE ELLER MINDSTE MILJØBELASTNING. "-" BETEGNER AT SCENARIERNE IKKE KAN RANGORDNES.**

Miljøpåvirkningskategorier		Genanvendelse (scenarie A)	Genbrug med substitution af facadesten (scenarie B)	Genbrug med substitution af bagsten (scenarie C)
Ikke-toksiske påvirkningskategorier	Drivhuseffekt	3	1	2
	Stratosfærisk ozonnedbrydning	-	-	-
	Fotokemisk ozondannelse	2	1	3
	Forsuring	3	1	2
	Terrestrisk eutrofiering	-	-	-
	Ferskvandseutrofiering	-	-	-
Toksiske påvirkningskategorier	Humantoksicitet, cancereffekter	-	-	-
	Humantoksicitet, ikke-cancereffekter	-	-	-
	Økotoksicitet	-	-	-
	Partikler	-	-	-
Forbrug af abiotiske ressourcer	Grundstoffer	-	-	-
	Fossile brændsler	3	1	2

Som det ses af tabel 9, var det kun muligt at rangordne scenarierne i fire ud af tolv miljøpåvirkningskategorier. I disse kategorier var resultatet imidlertid forholdsvis klart, idet scenarie B (genbrug med substitution af facadesten) udviste de største miljøbesparelser i alle fire kategorier. Scenarie C (genbrug med substitution af bagsten) var nummer to i tre kategorier, men lå sidst i den fjerde miljøpåvirkningskategori, fotokemisk ozondannelse. Genanvendelsesscenariet med 100 % genanvendelse af murstensaffald ved nedknusning til vejfyld (scenarie A) havde de største nettomiljøbelastninger i tre kategorier og lå nummer to i den fjerde kategori.

Det kan på den baggrund konkluderes, at når man tager hensyn til rangordenen af scenarier i miljøpåvirkningskategorierne drivhuseffekt, forsuring, fotokemisk ozondannelse og forbrug af fossile brændsler, er genbrug med substitution af facadesten miljømæssigt set en mere fordelagtig behandlingsmetode end genanvendelse. Da der ikke benyttes vægtning, dvs. at de enkelte miljøpåvirkningskategorier ikke tillægges en relativ værdi i forhold til hinanden, kan man ikke drage den samme konklusion mht. genbrug med substitution af bagsten i forhold til genanvendelse, men dog konstatere at genbrug med substitution af bagsten er miljømæssigt set bedre end genanvendelse i tre ud af fire miljøpåvirkningskategorier.

Mht. rangordenen af de to genbrugsscenarier, var resultatet klart, idet genbrug med substitution af facadesten var bedre en substitution af bagsten i alle kategorier, og det derfor kan konkluderes, at substitution af facadesten medfører det miljømæssige bedste resultat i forbindelse med genbrug.

#### 4.1.5 Konklusioner mht. samlede potentielle miljøpåvirkninger

- I kategorien drivhuseffekt var der miljøbesparelser i genbrugsscenerierne på -13,4 mPE og -6,8 mPE/ton murstensaffald ved substitution af hhv. facadesten og bagsten. Der var en lille miljøbelastning i genanvendelsessceneriet på 0,6 mPE/ton murstensaffald.
- I de resterende ikke-toksiske miljøpåvirkningskategorier var de potentielle nettopåvirkninger små, numerisk mindre end 3 mPE/ton murstensaffald. Genbrugssceneriet med substitution af facadesten var bedre end genanvendelsessceneriet i alle kategorier, mens genbrugssceneriet med substitution af bagsten udviste den største nettomiljøbelastning af de tre scenarier i kategorien fotokemisk ozondannelse.
- Mht. toksiske påvirkningskategorier vurderedes det, at usikkerheden forbundet med resultaterne var så betydelig, at det ikke var muligt at rangordne scenarierne.
- Forbruget af ressourcer i form af grundstoffer var lavt i alle scenarier. Der var derimod forskel på forbruget af fossile brændsler. I genanvendelsessceneriet var der et nettoforbrug på 0,8 mPE, hvorimod der i genbrugsscenerierne var besparelser på hhv. 20 og 11 mPE/ton murstensaffald.
- Det kan på den baggrund konkluderes, at når man tager hensyn til rangordenen af scenarier i miljøpåvirkningskategorierne drivhuseffekt, forsuring, fotokemisk ozondannelse og forbrug af fossile brændsler, er genbrug med substitution af facadesten miljømæssigt set en mere fordelagtig behandlingsmetode end genanvendelse

#### 4.2 Potentielle miljøpåvirkninger fordelt på processer

I dette afsnit vises de potentielle miljøpåvirkninger fordelt på processer, der indgår i scenarierne. Der er tale om transport og bearbejdning i form af sortering og nedknusning, men undgåede processer såsom undgået produktion af nye mursten og undgået grusgravning indgår ligeledes. På den måde kan de dele af behandlingssystemet, som bidrager væsentligt til miljøpåvirkningerne, identificeres, og man kan få indsigt i deres indflydelse i de forskellige scenarier. I tabel 10 er de forskellige processer, der indgår i figur 7, 8 og 9, angivet.

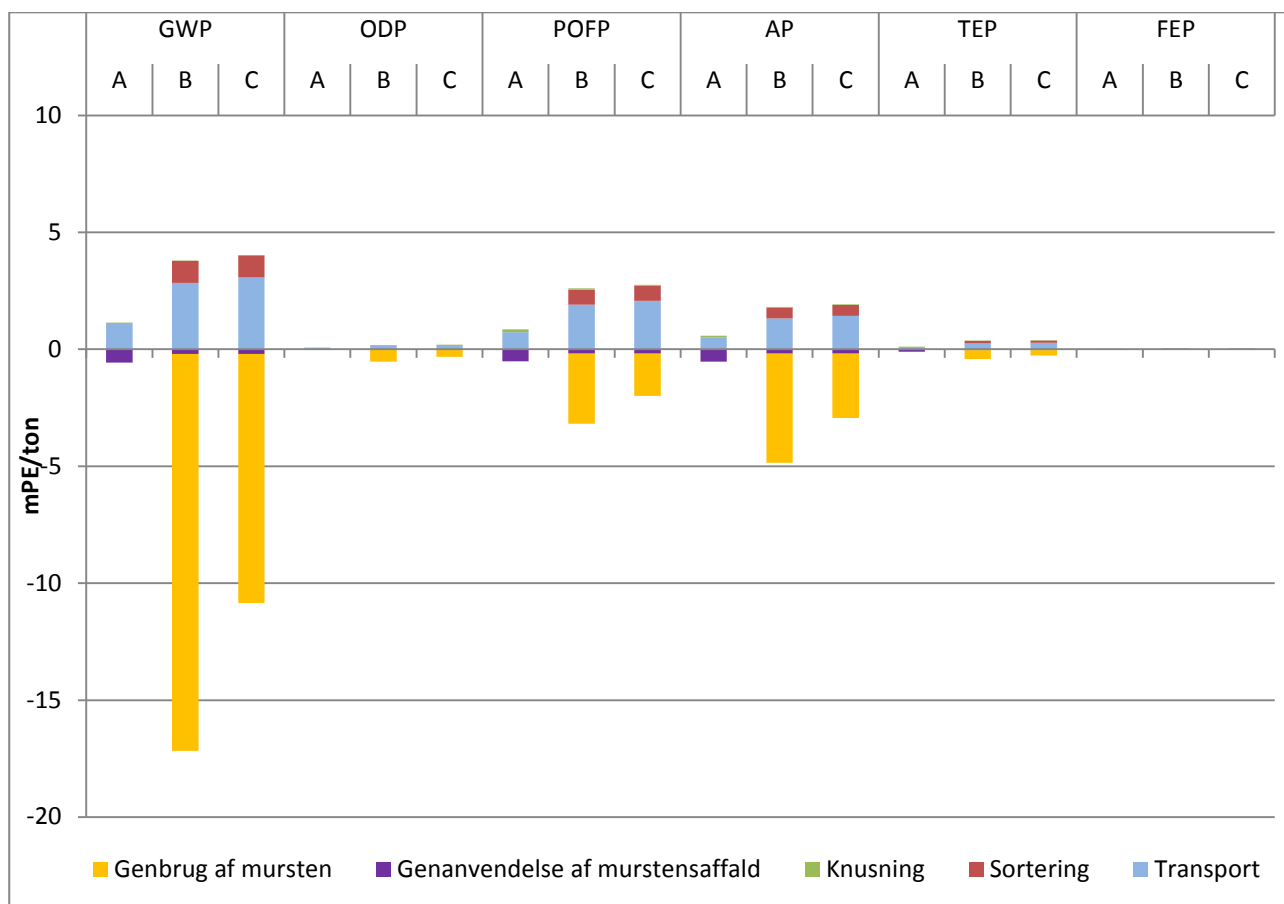
##### 4.2.1 Potentielle ikke-toksiske miljøpåvirkninger fordelt på processer

Figur 6 viser de ikke-toksiske potentielle miljøpåvirkninger ved hhv. genanvendelse og genbrug af murstensaffald fordelt på underprocesser, som indgår i scenarierne. Nettoværdierne, som består af forskellen mellem den positive og negative del af søjlerne, er i figur 7, 8 og 9 de samme som i figur 4, 5 og 6 i afsnit 4.1.1 til 4.1.3. Processerne, der bidrager til miljøbelastninger (numerisk positive værdier) i kategorien drivhuseffekt, består for scenarie A's vedkommende af transport af murstensaffald og transport af nedknust murstensaffald samt nedknusning af murstensaffald på knuseværk. Drivhuseffekten fra disse processer skyldes dieselforbrug, som er relativt større ved transport end ved nedknusning af murstensaffald. Der sker en miljøbesparelse (numerisk negative værdier) ved genanvendelse af murstensaffald, som skyldes, at miljøbesparelserne ved undgået grusgravning (dieselforbrug) er større end miljøbelastningen ved anvendelse af murstensaffald til vejbygning i denne miljøpåvirkningskategori. Den samlede miljøpåvirkning resulterer dog i en lille miljøbelastning mht. drivhuseffekt ved genanvendelse af murstensaffald til vejbygning.

**TABEL 10. OVERSIGT OVER OPDELING AF SCENARIER I UNDERPROCESSER, SOM BENYTTES I FIGUR 7, 8 OG 9 SAMT TABEL 11.**

Navn i figur	Processer som indgår
"Transport"	Transport fra nedrivning til "Gamle Mursten" Transport fra nedrivning til knuseværk Transport fra "Gamle Mursten" til nybyggeri Transport fra knuseværk til vejbyggeri Undgået transport af nye mursten til nybyggeri Undgået transport af grus fra grusgrav til vejbyggeri
"Sortering"	Oparbejdning af genbrugelige mursten på "Gamle Mursten"
"Knusning"	Nedknusning af murstensaffald til vejbygning på knuseværk
"Genbrug af mursten"	Undgået produktion af nye mursten inkl. energiforbrug til brænding, andet energiforbrug på teglværk, emissioner på teglværk samt lergravning
"Genanvendelse af murstensaffald"	Emissioner fra nedknust murstensaffald i veje Undgået grusgravning Undgåede emissioner fra grus i veje

Genbrugsscenarierne i figur 7 består af væsentligt større miljøbesparelser, men også større miljøbelastninger end genanvendelsesscenariet. Den numerisk mest betydende proces er "genbrug af mursten" som består af undgåede emissioner ved undgået fremstilling af nye mursten. Her er det forbruget af naturgas og den medfølgende emission af fossilt CO<sub>2</sub> ved brænding af mursten, som spiller langt den største rolle; miljøbesparelser ved undgået lergravning er ubetydeligt i forhold til dette. Der er ligeledes en miljøbesparelse ved genanvendelse af restaffaldet til vejbygning, som er mindre end halvt så stor som i scenarie A, idet den udsorterede mængde mursten til genbrug antages at udgøre 64,5 % af murstensaffaldet, hvorved restaffaldet til nedknusning kun kommer til at udgøre 35,4 % af mængden i scenarie A.



**FIGUR 7. IKKE-TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD FORDELT PÅ PROCESSER I GENANVENDELSESCENARIET (A) OG GENBRUGSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,4 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C). GWP: DRIVHUSEFFEKT, ODP: STRATOSFÆRISK OZONNEDBRYDNING, POFP: FOTOKEMISK OZONDANNELSE, AP: FORSURING, TEP: TERRESTRISK EUTROFIERING, FEP: FERSKVANDSEUTROFIERING.**

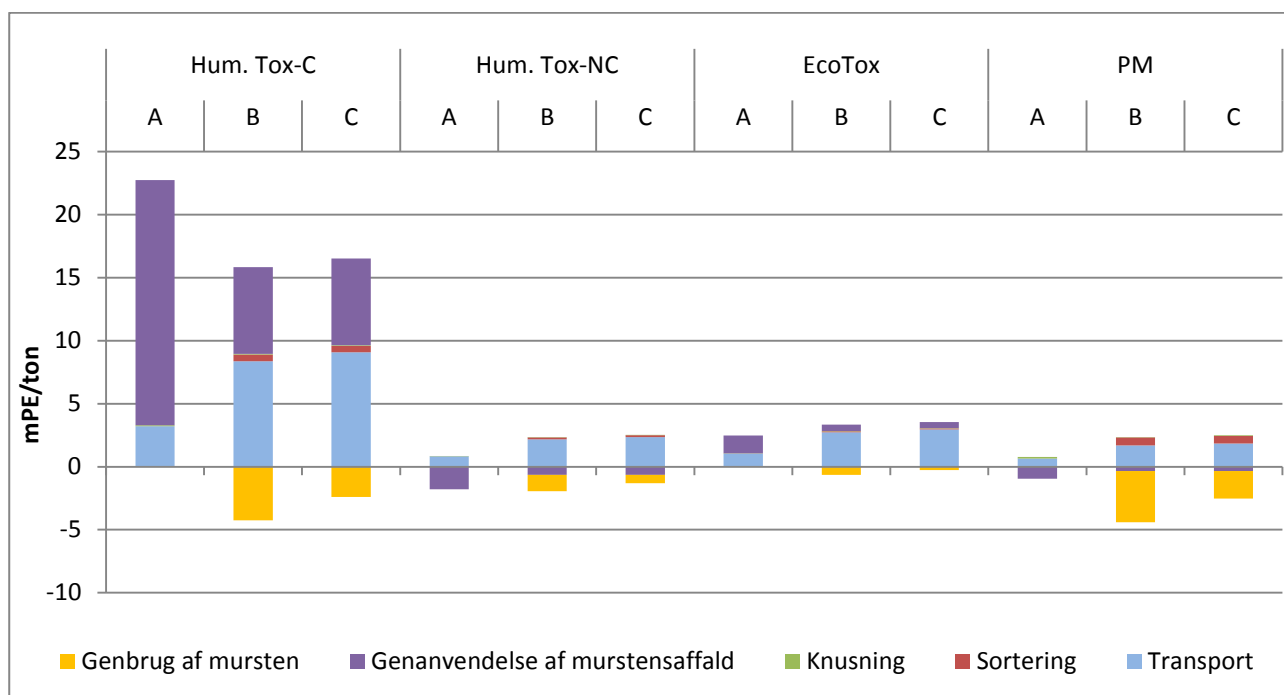
Scenarie B, hvor der substitueres facadesten, har en større miljøbesparelse end scenarie C, der substituerer bagsten. Det skyldes, at energiforbruget ved fremstilling af nye facadesten er højere per sten end ved fremstilling af bagsten. Det er her forudsat, at en ny facadesten i gennemsnit vejer 2,4 kg, og at en bagsten vejer 1,6 kg. Den største miljøbelastning ved genbrug kommer fra transport efterfulgt af "sortering" som betegner oparbejdning af murstensaffald til genbrugelige mursten. Miljøbelastningerne ved nedknusning af restaffaldet fra oparbejdningen er ubetydelige. De potentielle miljøbelastninger ved transport er betydeligt større ved genbrug end ved genanvendelse, hvilket skyldes den geografiske placering af virksomheder i scenarierne. Da oparbejdning af mursten til genbrug på nuværende tidspunkt er begrænset til ét sted i landet, vil den gennemsnitlige transportstrækning til nybyggeri (modelleret som 175 km) være længere end den undgåede transportstrækning fra et af landets betydeligt flere teglværker (modelleret som 50 km). I genanvendelsesscenarioet består transportprocessen af transport af nedknust murstensaffald til vejbyggeri, som antages i gennemsnit at være 50 km – til gengæld er der mere end dobbelt så meget at transportere til vejbyggeri som i genbrugsscenarioerne. Det bemærkes desuden, at miljøbelastningen ved transport er en lille smule større i scenarie C med substitution af bagsten; det skyldes, at den undgåede transport af nye bagsten er lidt mindre (pga. den lavere vægt af bagsten) end undgået transport af facadesten i scenarie B



De resterende miljøpåvirkningskategorier vist på figur 7 følger stort set den samme forklaringsmodel som drivhuseffekten, dvs. at miljøbelastningerne hovedsagelig skyldes processerne "transport" og "sortering" og miljøbesparelserne skyldes "genbrug af mursten" og til en mindre del "genanvendelse af murstensaffald". Der er i al væsentlighed tale om potentielle effekter af energiforbrug herunder dieselolie og elektricitet, eller undgået energiforbrug og undgåede emissioner i form af naturgas, dieselolie og bl.a. SO<sub>2</sub>. Både brutto- og nettomiljøpåvirkningerne er dog væsentlig mindre end for drivhuseffekt, hvilket bør indgå i fortolkningen af forskellene mellem scenarier.

#### 4.2.2 Potentielle toksiske miljøpåvirkninger fordelt på processer

I figur 8 ses de normaliserede værdier for de potentielle toksiske miljøpåvirkninger fordelt på processer, der indgår i scenarierne. Processerne "Transport", "Sortering" og "Knusning" bidrager alle med nettomiljøbelastninger i de toksiske påvirkningskategorier, hvoraf "Transport" i alle kategorier er den mest betydelige proces.

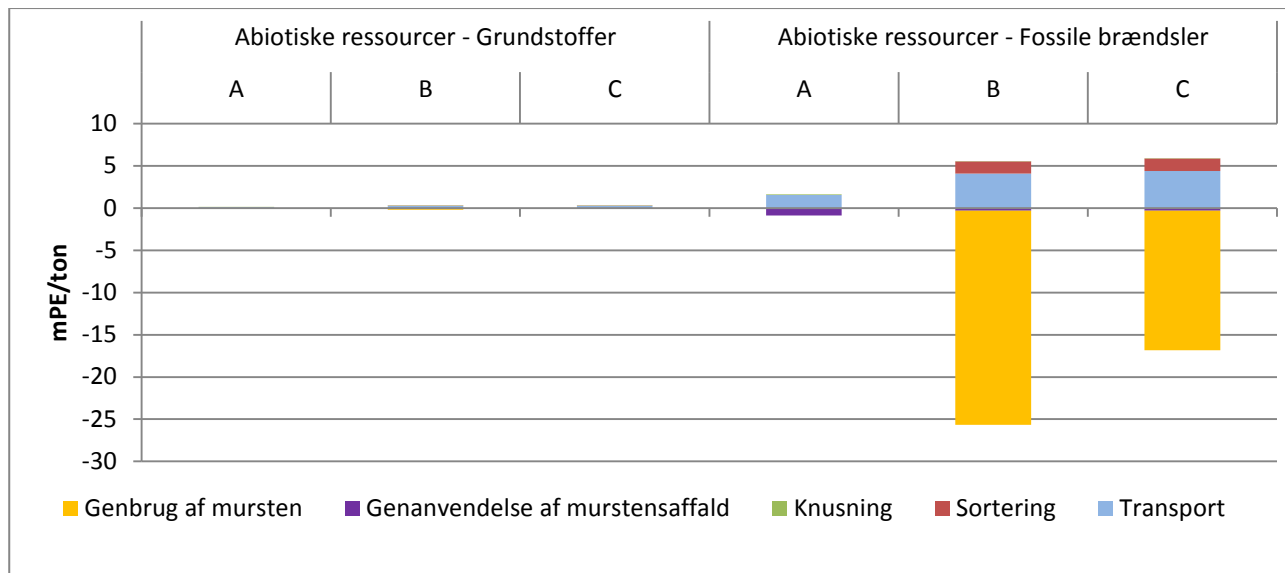


**FIGUR 8. SAMLEDE TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD FORDELT PÅ PROCESSER I GENANVENDELSESSCENARIET (A) OG GENBRUGSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,5 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C). HUM. TOX-C: HUMANTOKSICITET, CANCEREFFEKTER, HUM. TOX-NC: HUMANTOKSICITET, IKKE-CANCEREFFEKTER, ECOTOX: ØKOTOKSICITET, PM: PARTIKELEFFEKTER.**

Mht. påvirkningskategorien "humantoksicitet, cancereffekter" bidrager processen "Genanvendelse af knuste mursten" mest, hvor den potentielle miljøpåvirkning hovedsagelig skyldes udsivning af tungmetallet krom fra det knuste murstensaffald anvendt til vejbygning. Det ses, at miljøbelastningen fra denne proces er mindre i genbrugsscenarierne, da der kun produceres 35,4 % murstensaffald til vejbyggeri. Til gengæld er miljøbelastningen fra transport, som hovedsagelig skyldes krom og kviksølvsemissioner fra dieselforbruget, større i genbrugsscenarierne. Forklaringen på den længere ransport kan findes i afsnittet ovenfor.

### 4.2.3 Abiotisk ressourceforbrug fordelt på processer

Forbruget af ressourcer fordelt på underprocesser er vist på figur 9. Forbruget af grundstoffer er for alle scenarier ubetydeligt. I modsætning hertil er der ret stor forskel i forbruget af fossile brændsler. I alle tre scenarier er der en del forbrug af diesel til transport, som er højere i B og C grundet det større transportarbejde i genbrugsscenarierne. I scenarie B og C er der ydermere et forbrug af diesel i forbindelse med udsortering af genbrugelige mursten. Genbrug af mursten fører dog også til en godskrivning pga. undgået forbrug af naturgas, der ville have været anvendt i produktionen af nye mursten. Der er derfor en nettobesparelse af fossile brændsler i begge genbrugsscenarier.



**FIGUR 9. FORBRUG AF ABIOTISKE RESSOURCER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD FORDELT PÅ PROCESSER I GENANVENDELSESCENARIET (A) OG GENBRUGSSCENARIERNE (B, C). A REPRÆSENTERER 100 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD TIL VEJBYGNING. B OG C REPRÆSENTERER 64,5 % GENBRUG OG 35,4 % GENANVENDELSE AF MURSTENSAFFALD VED SUBSTITUTION AF HHV. FACADESTEN (B) OG BAGSTEN (C).**

De emissioner og processer, der bidrager mest til scenariernes potentielle miljøpåvirkninger, og som er diskuteret i de forudgående afsnit, er samlet i tabel 11. Der er medtaget emissioner og undgåede emissioner, der tilsammen bidrager med mere end 80 % af den samlede potentielle miljøpåvirkning inden for den pågældende påvirkningskategori.

Som det ses af tabellen, drejer det sig om ganske få stoffer, som står for den langt overvejende del af de potentielle miljøpåvirkninger. For de ikke-toksiske påvirkningskategorier spiller fossilt CO<sub>2</sub> samt forbrændingsprodukter som NO<sub>x</sub> og SO<sub>x</sub> stor rolle. Det ses, at det er genbrugsprocessen og transportprocesser, som er de væsentligste, hvilket skyldes besparelse af naturgas ved undgået murstensproduktion samt udnyttelse af brændstof ved transport. For de toksiske påvirkningskategorier er det i stor udstrækning tungmetaller, som bidrager mest til de potentielle miljøpåvirkninger. Det er, som for de ikke-toksiske påvirkninger, besparelser ved genbrug af mursten samt emissioner ved genanvendelse af mursten og transport, som er de væsentligste processer.

**TABEL 11. EMISSIONER OG MILJØBESPARELSER (UNDGÅEDE EMISSIONER) OG PROCESSER, DER BIDRAGER MEST TIL SCENARIERNES POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER.**

Miljøpåvirkningskategori	Emissioner	Processer
Drivhuseffekt	Udledning og besparelse: Fossilt CO <sub>2</sub>	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug
Stratosfærisk ozonnedbrydning	Udledning og besparelse: Halon	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug
Fotokemisk ozondannelse	Udledning og besparelse: NO <sub>x</sub>	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug
Forsuring	Udledning: NO <sub>x</sub> Besparelse: SO <sub>x</sub>	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug
Terrestrisk eutrofiering	Udledning og besparelse: NO <sub>x</sub>	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug
Ferskvandseutrofiering	Udledning til vand: Fosfat Besparelse til jord: P	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug
Humantoksicitet, cancereffekter	Udledning: Cr(VI) Besparelse: Cr(VI)	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug, samt genanvendelse af murstensaffald.
Humantoksicitet, ikke-cancereffek.	Udledning: Zn til luft og vand, Hg til luft Besparelse: As til vand, Zn til luft	Genanvendelse og genbrug af mursten leder til cirka samme besparelse. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug
Økotoksicitet	Udledning: Cr(VI), Zn til vand, Zn, Cu til luft Besparelse: Zn, Ba, As, Cr(VI) <sub>6</sub> til vand	Største besparelse er undgået transport, dernæst genbrug af mursten. Største udledning er fra transport
Partikler	Udledning: Partikler Besparelse: SO <sub>x</sub>	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug
Grundstoffer	Udledning: Pb, Cd Besparelse: Cd, Pb, Au	Vigtigst transport og undgået transport. Genanvendelse leder til større besparelse end genbrug af mursten.
Fossile brændsler	Forbrug: Olie Besparelse: Naturgas, Kul	Største besparelse er fra genbrug af mursten. Største udledning er fra transport af mursten til genbrug

#### 4.2.4 Konklusioner mht. potentielle miljøpåvirkninger fordelt på processer

- Ser man på delprocesser, som indgår i scenarierne, havde genbrugsscenerierne større miljøbesparelser, men også større miljøbelastninger end genanvendelsesscenariet. Den numerisk mest betydende proces i de ikke-toksiske miljøpåvirkningskategorier var "genbrug af mursten" som resulterer i miljøbesparelser ved undgået fremstilling af nye mursten. Forbruget af naturgas og den medfølgende emission af fossilt CO<sub>2</sub> ved brænding af mursten spiller langt den største rolle; miljøbesparelser ved undgået lergravning var ubetydeligt i forhold til dette.
- I kategorien drivhuseffekt resulterede processen "genanvendelse af murstensaffald" i mindre miljøbesparelser per ton end processen "genbrug af mursten".
- Mht. de toksiske påvirkningskategorier kom de fleste miljøbesparelser fra "genbrug af mursten". Transportprocesser bidrog både med miljøbesparelser og belastninger. "Genanvendelse af murstensaffald" bidrog med miljøbelastninger hovedsagelig fra udsivning af tungmetaller (Cr (VI) og Pb) fra det knuste murstensaffald anvendt til vejbygning.
- Den større miljøbesparelse ved substitution af facadesten skyldes, at energiforbruget ved fremstilling af nye facadesten er højere per sten end ved fremstilling af bagsten. Substitution af facadesten resulterer derfor i en højere energibesparelse per genbrugt sten end ved substitution af bagsten, hvilket medfører øgede miljøbesparelser

# 5. Følsomhedsanalyser

Der blev udført fire følsomhedsanalyser, hvor konsekvenserne af ændringer af forudsætninger for scenarierne blev beregnet:

- Effektiviteten af udsortering af genbrugelige mursten varieredes mellem 30 og 80 % af murstensaffaldet
- Transportstrækningen mellem oparbejdningsevirsomhed og nybyggeri, samt mellem murstensproducent og nybyggeri blev ændret.
- Nedknust murstensaffald antages at substituere søsten/sand i stedet for stabilgrus.
- Rekarboniseringsgraden (murstens optag af CO<sub>2</sub>) øges til 100 % af den teoretisk mulige værdi.

Desuden blev der kvalitativt gjort rede for betydningen af at ændre referenceår fra 2006 til 2011 for fremstillin af nye mursten, og det blev vurderet, hvor stor rolle brug af savsmuld som ikke-fossilt brændsel havde på energiressourceforbruget.

Rationalet for valget af følsomhedsanalyser er beskrevet nedenfor.

Ved vurdering af potentielle miljøpåvirkninger forbundet med genbrug af mursten er effektiviteten af udsortering af genbrugelige sten fra murstensaffald en vigtig parameter. Størrelsen af miljøbesparelsen ved undgået produktion af nye mursten per ton murstensaffald afhænger af denne parameter. På samme måde vil det have indflydelse på miljøbelastningerne forbundet med nedknusning af restaffaldet, idet en mindre effektiv udsortering af genbrugelige mursten vil resultere i en større mængde restaffald. Energiforbruget og dermed miljøbelastningen fra oparbejdningssproessen, er derimod den samme uanset, hvor mange genbrugelige mursten der udsortes. Alt i alt vil en oparbejdningssproce, der resulterede i ingen eller ganske få genbrugelige mursten, miljømæssigt set være væsentligt dårligere end genanvendelse ved nedknusning, da den ekstra miljøbelastning forbundet med oparbejdningssproessen i dette tilfælde ikke opvejes af undgået produktion af nye mursten.

Virksomheden "Gamle Mursten" oplyser, at effektiviteten ved udsortering af genbrugelige mursten fra murstensaffald ligger mellem 30 og 80 % af murstensaffaldet målt på vægtbasis. I hovedscenarierne beskrevet i kapitel 4, blev der benyttet 64,5 % for mængden af genbrugelige mursten, der svarer til en gennemsnitsværdi over en længere produktionsperiode som oplyst af "Gamle Mursten". Der blev derfor udførte en følsomhedsanalyse, hvor sorteringseffektiviteten varieredes, for på denne måde at få et indtryk af, hvor vigtig denne parameter er for genbrugsscenariernes miljøprofil. I de miljøpåvirkningskategorier, hvor øget genbrug medfører øgede miljøbesparelser, kan følsomhedsanalysen benyttes til at finde "break even" punktet, dvs. den genbrugsprocent, som medfører lige store potentielle miljøpåvirkninger fra genanvendelse som fra genbrug af mursten. Dette punkt repræsenterer altså minimumsgrænsen for effektiviteten af udsorteringen, som medfører en nettomiljøbesparelse i forhold til genanvendelse i form af nedknusning af murstensaffald til vejbygning.

En anden vigtig parameter er transportstrækningerne, som afhænger af den geografiske placering af virksomhederne. Her er især transportstrækningen fra "Gamle Mursten" til nybyggeriet, hvor de genbrugelige mursten anvendes, væsentlig. I hovedscenarierne blev det antaget, at mursten til genbrug transporteredes i gennemsnit 175 km – dette svarer til det halve af den maksimalt mulige strækning på ca. 350 km fra "Gamle Mursten" nuværende beliggenhed til Skagen. Ved udbygning af virksomheden, eller indtræden af andre aktører på markedet, kan denne transportstrækning formindskes væsentligt. Der blev derfor udført en følsomhedsanalyse, hvor transportafstanden antoges at udgøre 50 km svarende til den modellerede afstand fra knuseværk til vejbyggeri, hvilket også svarer til distancen anvendt for nye mursten fra produktionssted til nybyggeri. Herudover blev der foretaget en modellering med den fulde afstand på 350 km til Nordjylland som den maksimalt mulige transportafstand.

I hovedscenarierne antages det, at nedknust murstensaffald erstatter stabilgrus ved vejbyggeri, men det blev fremført i følgegruppen, at nedknuste mursten muligvis kan erstatte søsten eller sand fra sandsugning. Der blev derfor udført en følsomhedsanalyse for at undersøge, om dette have væsentlig indflydelse på de potentielle miljøpåvirkninger.

Som beskrevet i afsnit 3.4 dannes der ved brænding af mursten, som indeholder kalk, CO<sub>2</sub>, der bidrager til drivhuseffekten. Den modsatte proces, som kan kaldes rekarbonatisering, sker ved, at CO<sub>2</sub> under stenedens levetid trænger ind i stenene og danner kalk. På den måde fjernes CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, hvilket bør godskrives murstensfremstillingsprocessen. Størrelse af rekarbonatiseringen i forhold til den oprindelige kalkspaltning bygger på et skøn. Der er anvendt 60 % rekarbonatisering i hovedafsnittene i nærværende rapport. For at undersøge vigtigheden af denne parameter blev der derfor udført en følsomhedsanalyse, hvor rekarbonatiseringen antoges at være 100 % inden for LCA'ens systemiske tidsgrænse på 100 år.

Referenceåret for fremstilling af nye mursten har som beskrevet i afsnit 3.4 betydning for energieffektiviteten ved brændingsprocessen, hvilket har indflydelse på substitutionsværdien ved genbrug af mursten. Da substitution af nye mursten er en vigtig enkeltproces i LCA'en, er det relevant at undersøge betydningen af at skifte referenceår.

Savsmuld udgør en ret betydelig del af brændslet ved fremstilling af bagsten. Dette forbrug optræder ikke i opgørelsen af scenariernes brændselsforbrug, som kun inkluderer fossile brændsler. På sigt kan biomasse blive en begrænset ressource, hvorved det LCA-mæssigt bør indgå på lige fod med de fossile ressourcer. Derfor vurderedes den energimæssige andel, som savsmuld udgør ved fremstilling af bagsten.

## **5.1 Effektiviteten af udsortering af genbrugelige mursten**

Der blev udført en følsomhedsanalyse, hvor mængden af genbrugelige mursten i et ton murstensaffald varieredes mellem 0 og 100 %. Disse yderpunkter kommer ikke på tale ved oparbejdning af genbrugelige mursten, men på grund af EASETECH-modellens linearitet, når der som her ikke indgår biologisk nedbrydning af organisk materiale, kan alle værdier mellem 0 og 100 % genbrugelige mursten beskrives ved en ret linje mellem disse to yderpunkter.

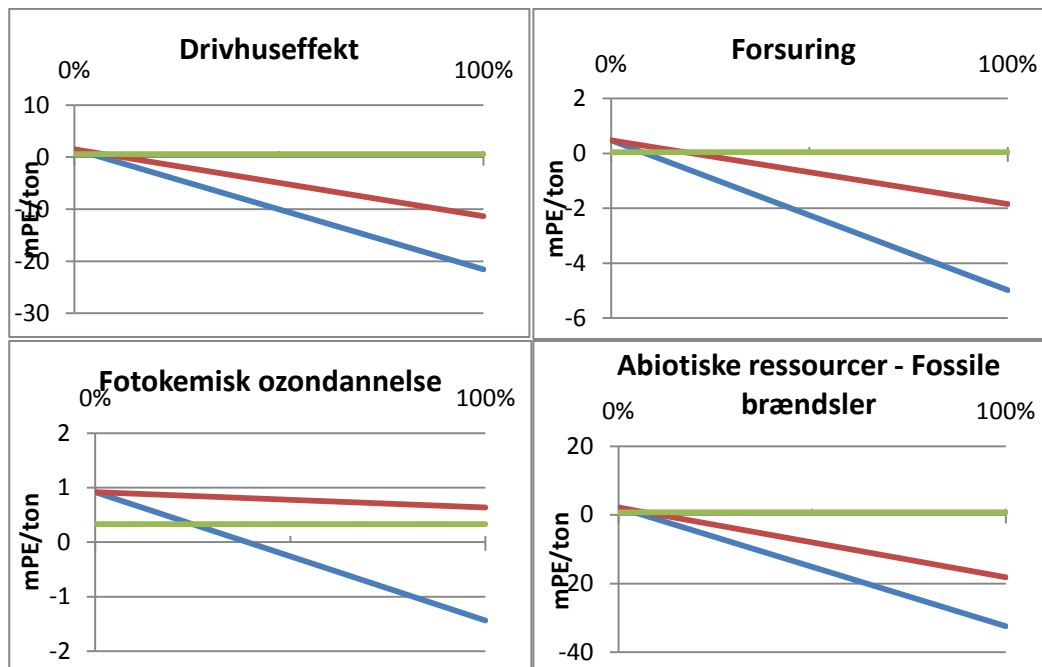
De potentielle miljøpåvirkninger målt i mPE som funktion af mængden af genbrugelige mursten i et ton murstensaffald er angivet i nedenstående figur 10, der er opdelt i ikke-toksiske påvirkningskategorier samt ressourceforbrug. Det er valgt at fokusere på de miljøpåvirkningskategorier, hvor det var muligt at rangordne scenarierne, dvs. drivhuseffekt, forsuring, fotokemisk ozondannelse og ressourceforbrug i form af fossile brændsler. I hver delgraf, der viser de potentielle miljøpåvirkninger i én af miljøpåvirkningskategorierne, indgår der tre rette linjer, som beskriver hhv. de to genbrugsscenarier og genanvendelsesscenariet. Den røde linje viser genbrug af mursten til nybyggeri ved substitution af facadesten. Den blå linje viser ligeledes

genbrug af mursten til nybyggeri, men med substitution af bagsten. Den vandrette grønne linje viser miljøpåvirkningerne ved genanvendelse af murstensaffald, dvs. ved nedknusning til vejbygning.

I alle delgrafer er miljøbelastningerne større eller miljøbesparelserne mindre ved 0 % genbrug (rød og blå streg) end ved genanvendelse (grøn streg). Det understreges, at 0 % genbrug ikke svarer til genanvendelsesscenarioet, da der sker en ekstra miljøbelastning ved først at sortere murstensaffaldet på oparbejdningsevirsomheden, selvom der ikke findes genbrugelige mursten i det. I de miljøpåvirkningskategorier, hvor øget genbrug medfører miljøbesparelser vil den røde og den blå linje skære den grønne linje i "break even" punktet, hvor miljøpåvirkningerne er lige store. Det bemærkes desuden, at værdierne ved 64,5 % genbrug svarer til resultaterne i hovedscenarierne i kapitel 4.

Figur 10 viser de potentielle miljøpåvirkninger i de ikke-toksiske miljøpåvirkningskategorier ved at variere effektiviteten af sortering af genbrugelige mursten mellem 0 og 100 %. For drivhuseffekt er der en lille miljøbelastning ved genanvendelse (grøn linje). Genbrugsscenarierne har en lille ekstra miljøbelastning ved lave genbrugsprocenter, men allerede ved 5 og 8 % genbrug skærer linjerne for genbrug med hhv. substitution af facadesten og bagsten den grønne linje, dvs. miljøbelastningen ved genanvendelse og genbrug er ens. Ved højere genbrugsprocenter er genbrug miljømæssigt set bedre end genanvendelse. "Gamle Mursten" oplyser, at genbrugsprocenten kan svinge mellem 30 og 80 %; i hele dette interval er der således en nettomiljøbesparelse ved genbrug i kategorien drivhuseffekt. Det samme er tilfældet for genbrug med substitution af facadesten i de andre kategorier vist på figur 10.

Genbrug med substitution af bagsten følger samme mønster som genbrug med substitution af facadesten mht. drivhuseffekt, forsurening og brug af fossile ressourcer. Her er der større miljøbesparelser ved genbrug end ved genanvendelse i hele intervallet fra 30 til 80 % genbrug. Kategorien fotokemisk ozondannelse udgør en undtagelse, idet genanvendelse med substitution af bagsten har større miljøbelastning end genanvendelse i hele intervallet.



**FIGUR 10. IKKE-TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER OG RESSOURCEFORBRUG AF FOSSILE BRÆNDSLERMÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD VED ANTAGELSE AF GENBRUGSEFFektivITET MELLEM 0 OG 100 %. BLÅ LINJE: GENBRUG MED SUBSTITUTION AF FACADESTEN. RØD LINJE: GENBRUG MED SUBSTITUTION AF BAGSTEN. GRØN LINJE: 100 % GENANVENDELSE.**

De vigtigste resultater, som kan udlæses af figur 10, er samlet i tabel 12. Her vises de potentielle miljøpåvirkninger i miljøpåvirkningskategorierne ved 30 og 80 % genbrug, dvs. ved yderpunkterne af intervallet for sorteringseffektivitet af genbrugelige mursten fra murstensaffald. For drivhuseffekt er de potentielle miljøpåvirkninger desuden angivet som kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald. I tabellen findes ligeledes "break even" værdien for genbrug i forhold til genanvendelse, dvs. den genbrugsprocent, hvor de potentielle miljøbelastninger ved genbrug og genanvendelse er lige store.

Potentialet for genbrug repræsenterer således ifølge oparbejdningsevirsomheden 80 % af murstensaffaldet. Det ses af tabel 12, at miljøbesparelserne i kategorien drivhuseffekt, når man antager at hele potentialet af genbrugelige mursten (dvs. 80 % af murstensaffaldet) substituerer nye facadesten, andrager -16,9 mPE/ton murstensaffald svarende til 130 kg CO<sub>2</sub>-ækv./ton murstensaffald. Det bemærkes samtidigt, at miljøbesparelsen er væsentlig mindre svarende til 68 kg CO<sub>2</sub>-ækv./ton murstensaffald ved antagelse af substitution af bagsten. Det andet yderpunkt, 30 % genbrug, repræsenterer et "worst case" scenarie, hvor kvaliteten af mursten i murstensaffaldet er ringe, og genbrugsprocenter derfor bliver lav. Miljøbesparelserne i kategorien drivhuseffekt, når man antager at samtlige genbrugelige mursten substituerer nye facadesten, andrager i dette tilfælde -5,4 mPE/ton murstensaffald svarende til 42 kg CO<sub>2</sub>-ækv./ton murstensaffald.

"Break even" værdierne repræsenterer den genbrugsprocent, man som minimum skal opnå, for at genbrugsscenarierne er bedre end genanvendelse. Det kan konkluderes, at denne værdi er forskellig fra miljøpåvirkningskategori til miljøpåvirkningskategori samt er afhængig af, om de genbrugelige mursten substituerer facadesten eller bagsten.

I kategorierne drivhuseffekt, forsuring og forbrug af abiotiske ressourcer – fossile brændsler, var genbrug miljømæssigt set bedre både ved substitution af facadesten og bagsten i hele genbrugsintervallet fra 30 til 80 %. Mht. fotokemisk ozondannelse var dette også tilfældet mht. genbrug med substitution af facadesten, men genbrug med substitution af bagsten havde større nettomiljøbelastning end genanvendelse i hele intervaller fra 30 til 80 % genbrug.

Sammenlignes med tabel 7, som viser rangordenen af hovedscenarierne, kan det konkluderes, at LCA'en er meget robust over for ændringer i genbrugsprocenten i intervallet 30 til 80 % i forhold til basisværdien på 64,5 %, idet det kun var i kategorien fotokemisk ozondannelse, at rangordenen af scenarier kunne påvirkes, og det kun i det tilfælde at genbrugsprocenten lå under 35 % for genbrug med substitution af facadesten.



**TABEL 12. POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER VED 30 % GENBRUG ("WORST CASE") OG 80 % GENBRUG (MAKSIMALT POTENTIALE) SAMT "BREAK EVEN" VÆRDI, DVS. DEN GENBRUGSPROCENT, HVOR POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER VED GENANVENDELSE OG GENBRUG ER LIGE STORE. TAL I PARENTES ANGIVER POTENTIEL DRIVHUSEFFEKT I KG CO<sub>2</sub>-ÆKV./TON MURSTENSAFFALD. "-" ANGIVER, AT GENANVENDELSE ER BEDRE END GENBRUG FOR ALLE GENBRUGSPROCENTER.**

Ikke-toksiske påvirkningskategorier		Enhed	30 % genbrug	80 % genbrug	"Break even" (% genbrug)
Drivhuseffekt	Facadesten	mPE/ton	-5,4 (-42)	-16,9 (-130)	6
	Bagsten	mPE/ton	-2,37 (-18)	-8,80 (-68)	9
Fotokemisk ozondannelse	Facadesten	mPE/ton	0,21	-0,97	25
	Bagsten	mPE/ton	0,83	0,69	-
Forsuring	Facadesten	mPE/ton	-1,16	-3,89	8
	Bagsten	mPE/ton	-0,22	-1,38	19
<b>Forbrug af abiotiske ressourcer</b>					
Fossile brændsler	Facadesten	mPE/ton	-8,17	-25,46	4
	Bagsten	mPE/ton	-3,91	-14,09	8

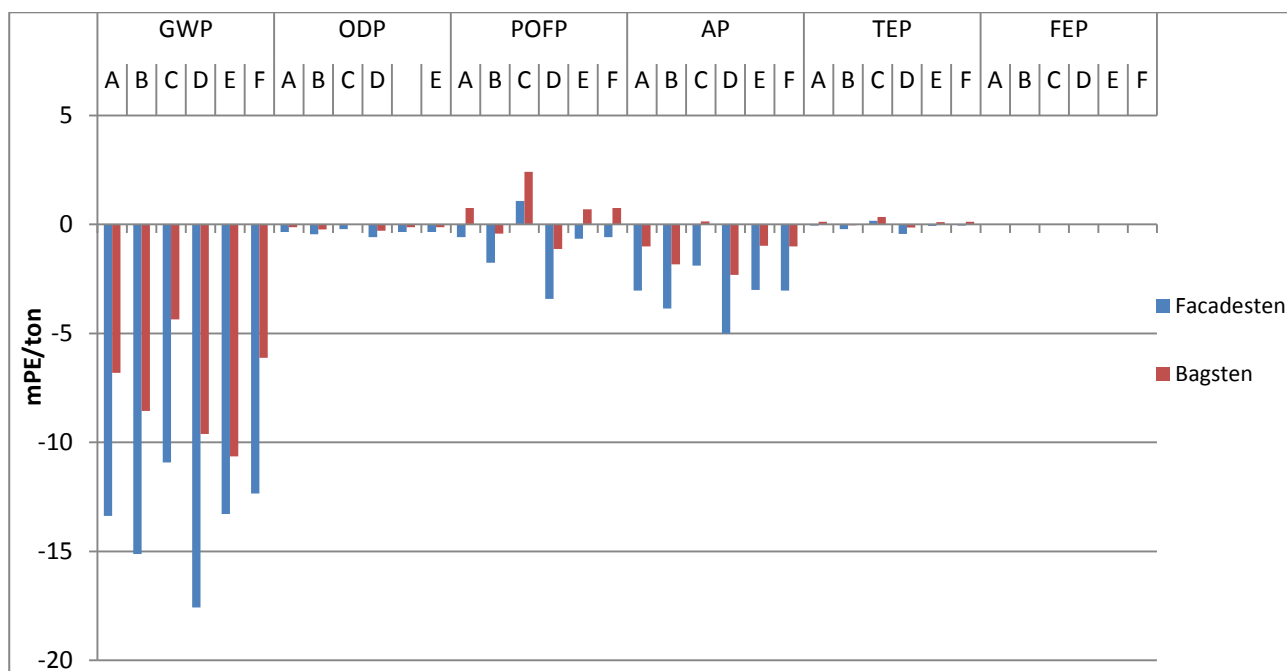
## 5.2 Transportafstande, substitution af søsten/sand og øget rekarbonatiseringsgrad

Figur 11 og 12 viser de potentielle ikke-toksiske miljøpåvirkninger samt ressourceforbrug i genbrugsscenarierne ved ændrede transportafstande, substitution af søsten/sand og øget rekarbonatiseringsgrad (de toksiske miljøpåvirkninger er udeladt i disse følsomhedsanalyser). Følsomhedsanalyserne blev udført med varierende afstande for transport af genbrugelige mursten til nybyggeri vha. to scenarier med 50 km transport (scenarie B<sup>2</sup>) og 350 km transport (scenarie C), som repræsenterer hhv. den mindste og største transportafstand, der kan komme på tale i Danmark. Til sammenligning vises basisscenariet for genbrug med 175 km transport til nybyggeri også på figurerne (scenarie A).

For at undersøge effekten af størrelsen af transportafstandene ved anden geografisk placering af teglværker blev genbrugsscenariet modeleret med 350 km undgået transport fra murstensproducent til nybyggeri (scenarie D). Desuden blev der udført en følsomhedsanalyse for genbrugsscenariet, hvor det blev antaget, at nedknust murstensaffald substituerede søsten eller sand i stedet for stabilgrus (scenarie E). Endelig blev der udført en følsomhedsanalyse med antagelse af at rekarbonatiseringsgraden var 100 % i løbet af LCA'en tidsmæssige systemgrænse på 100 år (scenarie F).

I scenarie B blev transportafstanden af genbrugelige mursten som nævnt sat ned til 50 km i stedet for 175 km, som benyttedes i hovedscenarierne. Dette medførte hhv. en stigning i miljøbesparelser og et fald i miljøbelastninger i forhold til basisscenariet. Scenarie C, som repræsenterer den anden yderlighed med maksimal transport af genbrugelige mursten, viste ikke overraskende et dårligere resultat end basisscenariet.

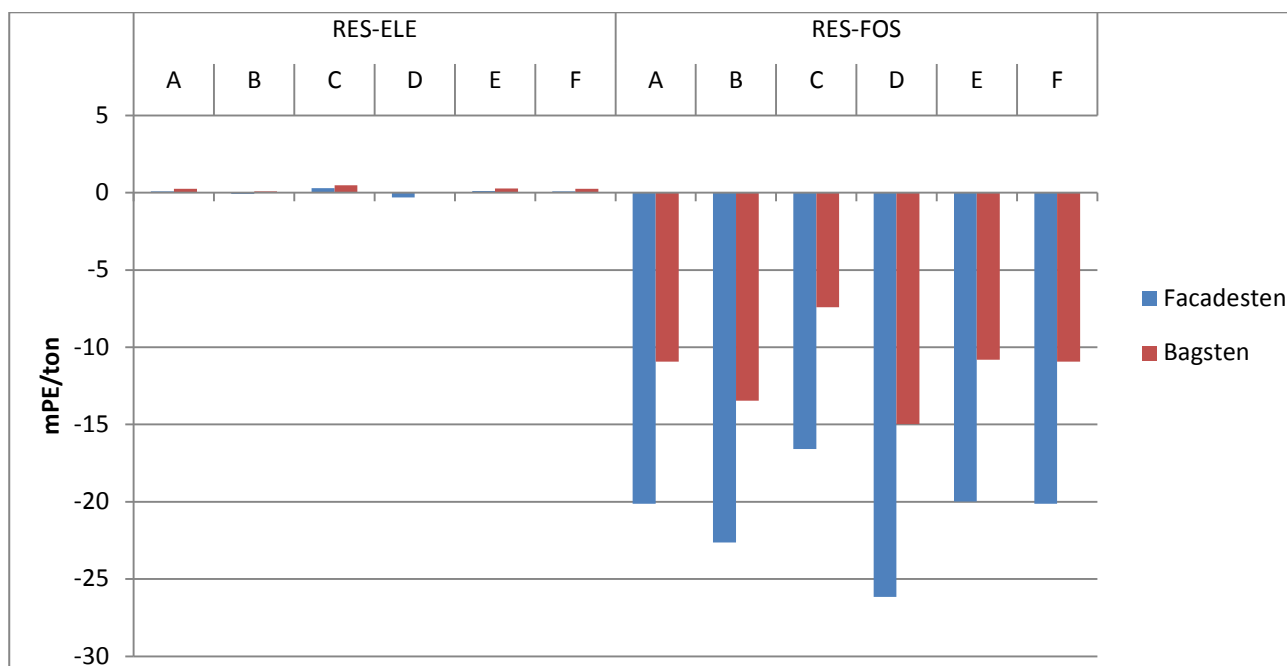
<sup>2</sup> Det gøres opmærksom på, at scenarionavnene i dette afsnit af rapporten repræsenterer andre scenarier end i de forudgående afsnit.



FIGUR 11. SAMLEDE IKKE-TOKSISKE POTENTIELLE MILJØPÅVIRKNINGER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD I GENBRUGSSCENARIET (A), GENBRUGSSCENARIET MED 50 KM TRANSPORT AF GENBRUGELIGE MURSTEN TIL NYBYGGERI (B), GENBRUGSSCENARIET MED 350 KM TRANSPORT AF GENBRUGELIGE MURSTEN TIL NYBYGGERI (C), GENBRUGSSCENARIET MED 350 KM UNDGÅET TRANSPORT AF NYE MURSTEN OG 175 KM TRANSPORT AF NEDKNUST MURSTENSAFFALD (D), GENBRUGSSCENARIET MED SUBSTITUTION AF SØSTEN/SAND I STEDET FOR GRUS (E) OG (F) 100 % REKARBONATISERING. GWP: DRIVHUSEFFEKT, ODP: STRATOSFÆRISK OZONNEDBRYDNING, POFP: FOTOKEMISK OZONDANNELSE, AP: FORSURING, TEP: TERRESTRISK EUTROFIERING, FEP: FERSKVANDSEUTROFIERING.

Teglværkernes placering har også betydning, hvilket kan ses af scenarie D, som viste sig at være det bedste scenarie. Hvis man sparer lang transport af nye mursten ved genbrugsprocessen har det således en relativ stor indflydelse på denne proces' miljøprofil.

Den anden følsomhedsanalyse, substitution af søsten/sand i stedet for grus, udviste praktisk taget ingen forskel i forhold til basisscenarie A. Substitution af grus og søsten/sand er ligeværdigt, og det har derfor ringe miljømæssig betydning, hvilket af disse materialer, som det nedknuste murstensaffald erstatter. Scenarie F, som repræsenterer 100 % rekarbonatisering, dvs. nye murstens genoptag af CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, som fuldstændig opvejer emission af CO<sub>2</sub> ved brænding af kalkholdige mursten, var lidt dårlige end basisscenariet mht. drivhuseffekt. Dette skyldes, at værdien af at substituere nye mursten ved genbrug falder en anelse, da CO<sub>2</sub>-belastningen ved produktion af nye mursten bliver mindre. Følsomhedsanalysen viste dog, at rekarbonatiseringsgraden ikke har betydning for LCA'ens overordnede konklusioner.



FIGUR 12 SAMLET FORBRUG AF ABIOTISKE RESSOURCER MÅLT I MILLIPERSONÆKVIVALENTER PER TON MURSTENSAFFALD I GENBRUGSSCENARIET (A), GENBRUGSSCENARIET MED 50 KM TRANSPORT AF GENBRUGELIGE MURSTEN TIL NYBYGGERI (B), GENBRUGSSCENARIET MED 350 KM TRANSPORT AF GENBRUGELIGE MURSTEN TIL NYBYGGERI (C), GENBRUGSSCENARIET MED 350 KM UNDGÅET TRANSPORT AF NYE MURSTEN OG 175 KM TRANSPORT AF NEDKNUST MURSTENSAFFALD (D), GENBRUGSSCENARIET MED SUBSTITUTION AF SØSTEN/SAND I STEDET FOR GRUS (E) OG GENBRUGSSCENARIE MED 100 % REKARBONATISERING. RES-ELE: ABIOTISKE RESSOURCER – GRUNDSTOFFER, RES-FOS: ABIOTISKE RESSOURCER – FOSSILE BRÆNDSLER.

### 5.3 Referenceår for murstensfremstilling og energiresourceforbrug i form af savsmuld

Pga. den internationale finanskrisen faldt aktiviteten i byggesektoren kraftigt mellem 2006 og 2011. Dette resulterede i et fald i produktion af nye mursten, og som nævnt i afsnit 3.4 har det betydning for energieffektiviteten på teglværkerne, idet ovnene samt tørringsanlæggene ikke kan drives energimæssigt optimalt. På baggrund af Kalk- og Teglværksforeningens opgørelser har DTU beregnet, at det specifikke energiforbrug ved murstensfremstilling er steget ca. 10 % i 2011 i forhold til energiforbruget i 2006. Ifølge tabel 4 i afsnit 3.4.2 udgør CO<sub>2</sub> fra brændslet ca. 56 % af den samlede CO<sub>2</sub>-belastning fra produktion af facadesten. En stigning i brændselsforbruget vil således forøge CO<sub>2</sub>-belastning ved produktion af facadesten med omkring 6 %. Den forøgede miljøbesparelse mht. drivhuseffekt ved genbrug af mursten med substitution af facadesten vil derfor andrage mindre end 6 % - ændringen for de resterende miljøpåvirkningskategorier vil være af samme størrelsesorden.

Energiforbruget i form af savsmuld ved brænding af bagsten kan beregnes ud fra data om mængden af savsmuld, der anvendes per bagsten. Ifølge tabel 4 i afsnit 3.4.2 benyttes der 0,162 m<sup>3</sup> savsmuld per ton bagsten. Ved antagelse af en rumvægt på 170 kg/m<sup>3</sup> og en brændværdi på 15,2 GJ/ton (<http://www.reka.com>) er energiforbruget i form af savsmuld ca. 0,4 GJ/ton bagsten. Fra tabellen kan det beregnes, at energiforbruget i form af naturgas er ca. 1,8 GJ/ton bagsten, og brændselsenergien fra savsmuld udgør således 18 % af det totale energiforbrug til brændingsprocessen. Hvis biomasse, inklusiv savsmuld, på et tidspunkt bliver en begrænset ressource, bør dette ekstra energiforbrug indgå i miljøvurderingen.

## 5.4 Konklusioner mht. følsomhedsanalyser

- I kategorierne drivhuseffekt, forsuring og forbrug af abiotiske ressourcer – fossile brændsler, var genbrug miljømæssigt set bedre både ved substitution af facadesten og bagsten i hele intervallet fra 30 til 80 % genbrug. Mht. fotokemisk ozondannelse var dette også tilfældet mht. genbrug med substitution af facadesten, men genbrug med substitution af bagsten havde større nettomiljøbelastning end genanvendelse i hele intervaller fra 30 til 80 % genbrug.
- Det kan dog konkluderes, at LCA'en var robust over for ændringer i genbrugsprocenten i intervallet 30 til 80 %, idet det kun var i kategorien fotokemisk ozondannelse, at rangordenen af scenarier blev påvirket, idet rangordenen mellem genanvendelse og genbrug med substitution af facadesten byttede plads, hvis genbrugsprocenten lå mellem 30 og 35 %.
- Ved nedsætning af transportafstanden af genbrugelige mursten til 50 km i stedet for 175 km, som benyttedes i hovedscenarierne, medførte det hhv. en stigning i miljøbesparelser og et fald i miljøbelastninger i forhold til basisscenariet som funktion af nedsat dieselforbrug. Scenariet, som repræsenterede den anden yderlighed med maksimal transport af genbrugelige mursten, viste ikke overraskende et dårligere resultat end basisscenariet.
- Teglværkernes placering viste sig også at have betydning. Hvis man sparer lang transport af nye mursten ved genbrugsprocessen har det således en relativ stor indflydelse på denne proces' miljøprofil i positiv retning.
- Substitution af søsten/sand i stedet for grus resulterede praktisk taget ikke i nogen miljømæssig forskel, og det har ringe miljømæssig betydning, hvilket af disse materialer, som det nedknuste murstensaffald erstatter.
- Ændring af rekarboniseringsgraden (nye murstens optag af CO<sub>2</sub> gennem deres levetid) havde kun ringe betydning for LCA'en overordnede resultat.
- Ændring af referenceår for murstensfremstilling vurderedes at resultere i øgede (konjunkturbestemte) miljøbesparelser ved genbrug af mursten med substitution af facadesten på omkring 6 %.
- Brændselsenergien fra savsmuld udgør 18 % af det totale energiforbrug til brændingsprocessen ved fremstilling af bagsten. Hvis biomasse, inklusiv savsmuld, på et tidspunkt bliver en begrænset ressource, bør dette ekstra energiforbrug indgå i miljøvurderingen.

# 6. Overordnede konklusioner

De potentielle miljøpåvirkninger i en række ikke-toksiske og toksiske kategorier samt ressourceforbrugskategorier blev vurderet for oparbejdning af gamle mursten til nybyggeri og genanvendelse af nedknust murstensaffald til vejbygning. Genbrug blev modelleret med substitution af hhv. facadesten og bagmursten.

Det er vigtigt først at understrege, at miljøvurderingens resultater bygger på en række forudsætninger, hvor især den antagelse er afgørende, at en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud - teknisk og funktionelt - erstatter en ny mursten i form af facadesten eller bagsten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. Det forudsættes desuden, at murstensaffaldet, som ankommer til oparbejdning på oparbejdningens virksomheden indeholder en vis (større) mængde genbrugelige mursten. Der er altså ikke tale om oparbejdning af murstensaffald til genbrug af mursten fra gennemsnitligt dansk byggeaffald, og tallene for potentielle miljøpåvirkninger angivet per tons murstensaffald kan ikke uden videre opskaleres til at gælde på landsplan. Det gøres desuden opmærksom på, at den angiveligt bedre varmeisoleringssevne ved brug af nye bagmurstens i forhold til genbrugelige mursten ikke indgår i LCA'ens beregninger.

Overordnet kan det konkluderes, at oparbejdning af murstensaffald med henblik på genbrug giver anledning til en række miljøbesparelser (dog ikke i alle miljøpåvirkningskategorier) i forhold til genanvendelse i form af nedknusning af murstensaffald til vejbygning. Dette skyldes hovedsagelig, at man ved genbrug erstatter nye mursten, hvorved man undgår de miljømæssige omkostninger ved fremstilling af mursten, herunder energiforbrug og tilhørende emissioner. Da energiforbrug og emissioner ved oparbejdningssprocessen til genbrug er mindre end ved produktion af nye mursten, leder det til potentielle nettobesparelser i en række påvirkningskategorier ved genbrug af mursten.

De enkelte scenariers miljømæssige placering bygger på fire ud af tolv miljøpåvirkningskategorier, idet de potentielle miljøpåvirkninger i de resterende otte påvirkningskategorier (to ikke-toksiske, fem toksiske og én ressourceforbrugskategori) skønnedes at være behæftede med for stor usikkerhed usikre eller være for små til at tillade rangordning af scenarierne.

I de fire miljøpåvirkningskategorier drivhuseffekt, forsuring, fotokemisk ozondannelse og ressourceforbrug i form af fossile brændsler, hvor scenarierne kunne rangordnes, ledte genbrug af mursten med substitution af nye facadesten til de største miljøbesparelser i samtlige kategorier. Genbrug med substitution af bagsten udviste ligeledes større potentielle miljøbesparelser end genanvendelse i tre kategorier; i kategorien fotokemisk ozondannelse var miljøbelastningen dog større end ved genanvendelse.

Mht. drivhuseffekt resulterede genbrug (med en udsorteringseffektivitet fra murstensaffald på 64,5 %) af mursten til nybyggeri med substitution af facadesten i en potentiel miljøbesparelse på -13,4 mPE/ton murstensaffald (-103,6 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald). Ved genbrug med substitution af bagsten var den potentielle miljøbesparelse mindre og androg -6,8 mPE/ton murstensaffald (-52,6 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald). Genanvendelse ved nedknusning til vejbygning ledte til en lille potentiel nettomiljøbelastning på 0,6 mPE/ton murstensaffald (4,5 kg CO<sub>2</sub>-ækvivalenter/ton murstensaffald). Der var en lignende forskel på forbruget af fossile brændsler. I genanvendelsesscenariet var der et nettoforbrug af fossilt brændsel på 0,8 mPE,

hvorimod der i genbrugsscenarierne var besparelser på -20 mPE ved genbrug med substitution af facadesten og -11 mPE per ton murstensaffald ved substitution af bagsten.

Det kan på den baggrund konkluderes, at når man tager hensyn til rangordenen af scenarier i miljøpåvirkningskategorierne drivhuseffekt, forsuring, fotokemisk ozondannelse og forbrug af fossile brændsler, er genbrug med substitution af facadesten miljømæssigt set en mere fordelagtig behandlingsmetode end genanvendelse.

# 7. Referencer

Anon. (2009) Grønt regnskab for teglværk 2008/2009 (fortroligt).

Andreasen, K.H. (2012) Energoptimering af sand- og ralsuger M/S Baltic. Bachelorprojekt. Aarhus maskinmesterskole. 2012.

Clavreul, J., Baumeister, H., Christensen, T.H., Damgaard, A. (2013) EASETECH – an Environmental Assessment System for Environmental TECHNOlogies. Under review: Environmental Modelling & Software.

CML (2012) CML-IA Characterisation Factors. Excel spreadsheet [Online]  
<http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/databases/cmlia/cmlia.zip>, Tilgæet 31 januar 2013.

DANAK (2005) Prøvningsrapport ang. fluoridindhold i ubrændt og brændt sten (fortroligt).

Dansk Standard (2012) DS/EN 15804. Bæredygtighed inden for byggeri og anlæg – Miljøvaredeklarationer – Grundlæggende regler for produktkategorien byggevarer. 1. udgave 2012-02-29.

Dieselnet (2013) US EPA Nonroad Diesel engines emission standards [Online].  
<http://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php#tier3>. Tilgæet 13 maj 2013.

ecoinvent. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2013) ecoinvent database V2.2. og 3.0 [Online]  
<http://www.ecoinvent.com/>, Tilgæet 31 januar 2013.

ELCD (2013) European reference Life Cycle Database V3.0. [Online]  
<http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm> Tilgæet 31 januar 2013.

Energistyrelsen (2013) Standardfaktorer for brændværdier og CO<sub>2</sub>-emissioner – indberetning af CO<sub>2</sub>-udledning for 2012. Miljø- og Energiministeriet.

European Commission (2011) Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2011.

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Hec, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M. & Wernet, G. (2007) Overview and Methodology, ecoinvent report No. 1. Swiss centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.

Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Joliet, O., Margni, M., Schryver, A., Humbert, S., Laurent, A., Sala, S., Pant, R. (2012) Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18, 683–697.

- Huijbregts, M.a.J., Breedveld, L., Huppés, G., de Koning, A., van Oers, L., Suh, S. (2003) Normalisation figures for environmental life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 11, 737–748.
- Humbert, S. (2009) Geographically Differentiated Life-cycle Impact Assessment of Human Health. Doctoral dissertation, University of California, Berkeley, Berkeley, California, USA.
- Jacobsen, J.B., Møller, J., Kromann, M., Jensen, M.B. & Neidel, T.L. (2012) Miljø- og samfundsøkonomisk vurdering af muligheder for øget genanvendelse af papir, pap, plast, metal og organisk affald fra dagrenovation. 148 p. Miljøprojekt nr. 1447, Miljøministeriet, Miljøstyrelsen.
- Kalk- og Teglværksforeningen (2008) Benchmarking 2007 (fortroligt).
- Laurent, A., Olsen, S.I., Hauschild, M.Z., (2011a) Normalization in EDIP97 and EDIP2003: updated European inventory for 2004 and guidance towards a consistent use in practice. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(5), pp.401–409.
- Laurent, A., Lautier, A., Rosenbaum, R. K., Olsen, S. I., Hauschild, M. Z. (2011b) Normalization references for Europe and North America for application with USEtox™ characterization factors, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, no. 8, pp. 728–738.
- LIPASTO (2013): LIPASTO-emission calculation system, VTT Technical Research Centre of Finland, [Online]  
<http://www.lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kamaanstiee.htm>, Tilgæet 31 januar 2013.
- Miljøstyrelsen (2000) Renere teknologi i tegl- og mørtelbranchen. Miljøprojekt Nr. 499. Miljø- og Energiministeriet.
- Oers, L. van, A. de Koning, J.B. Guinée & G. Huppés, 2002. Abiotic resource depletion in LCA - Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. DWW report, Delft; see  
<http://www.cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/abiotic-depletion-lcia.html>.
- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLoad, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D. & Hauschild, M.Z. (2008) USEtox – the UNEP-SETEC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int J life Cycle Assess* 13: 532-546.
- Sleeswijk, A. W., van Oers, L. F. C. M., Guinée, J. B., Struijs, J., Huijbregts, M.a.J. (2008) Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000., *The Science of the Total Environment*, vol. 390, no. 1, pp. 227–40.
- USEtox (2013). USEtox hjemmeside. Karakteriseringsfaktorer for USEtox [Online]  
<http://www.usetox.org/>, Tilgæet 31. januar 2013.
- Wahlström, M. Laine-Ylijoki, J., Järnström, H., Erlandsson, M., Wik, O., Suer, P., Hjelmar, O., Oberender, A., Birgisdottir, H., Astrup, T., Cousins, AP., Butera S., Jørgensen, A.(2013) Environmentally Sustainable Construction Products and Materials – Assessment of release and emissions. Nordic Innovation Publication. Nordic Innovation, Oslo, Norway.



## Bilag 1: Liste over processer fra eksterne databaser

### PROCESSER IMPORTERET FRA ECOINVENT (2013) OG ELCD (2013).

<b>Database</b>	<b>Importeret Process</b>
ecoinvent 2.2	Transport, lorry 16-32t, EURO5, RER
ecoinvent 2.2	Propane/Butane, at refinery, RER
ecoinvent 2.2	Diesel, burned in building machine, GLO
ecoinvent 2.2	gravel, crushed, at mine, CH
ecoinvent 2.2	wood chips, softwood, u=140%, at forest, RER
ecoinvent 2.2	Natural gas, high pressure, at consumer, RER
ecoinvent 2.2	polyethylene, HDPE, granulate, at plant, RER
ecoinvent 2.2	Diesel, at regional storage, RER
ecoinvent 3.0	Clay pit, GLO
ecoinvent 3.0	lime production, hydrated, packed, GLO
ecoinvent 3.0	manganese dioxide production, RoW
ELCD 3.0	Process Water, RER
ELCD 3.0/LIPASTO (2013)	Earth moving lorry, Gross vehicle mass 32t, payload capacity 19t. Highway driving, EURO4, LIPASTO

**Bilag 2: Kritisk gennemgang af livscyklusvurdering af genbrug af gamle mursten – afsluttende review af FORCE Technology**



# Kritisk gennemgang af livscyklusvurdering af genbrug af gamle mursten – afsluttende review

---

**Af Anders Schmidt**

**FORCE Technology**

**Oktober, 2013**

# 1 Indledning

Den nærværende kritiske gennemgang af rapporten "LCA af genbrug af gamle mursten" er foretaget i tidsrummet fra d. 25/9-2/10-2013. Gennemgangen er det tredje og afsluttende trin i den samlede plan for en kritisk gennemgang af projektet.

Gennemgangen sker efter de overordnede ønsker til opgaven, Miljøstyrelsen har beskrevet i en e-mail (dateret 11/1-2013) fra Anne-Sophie Nielsen (Miljøstyrelsen) til FORCE Technology, nemlig at "... miljøvurderingen skal udføres i fuld overensstemmelse med ISO-standarderne for "best practise" for LCA. Derfor skal DTU Miljø's arbejde vurderes af en uafhængig LCA-ekspert/reviewer. Da der er tale om en såkaldt sammenlignende LCA, som er beregnet til offentliggørelse, vil interessenter (*stakeholders*) endvidere blive inddraget i processen som medlemmer af en følgegruppe."

Det bemærkes her, at der ikke er tale om et egentligt review-panel, men at følgegruppens medlemmer i hele forløbet har haft mulighed for at kommentere på projektgruppens arbejde, både ved de to følgegruppemøder, der er blevet afholdt, om som skriftligt supplement til den formelle del af reviewet, som er udarbejdet af FORCE Technology ved Anders Schmidt. Muligheden for at inkludere supplerende kommentarer har også været til stede i forbindelse med dette afsluttende review.

## 1.1 Formålet med den kritiske gennemgang

Ifølge ISO 14044 (2006) skal processen for kritisk review sikre, at

- Metoderne anvendt til at udføre livscyklusvurderingen er i overensstemmelse med denne internationale standard
- Metoderne til at udføre livscyklusvurderingen er naturvidenskabeligt og teknisk gyldige
- De anvendte data er hensigtsmæssige og fornuftige i forhold til vurderingens formål
- Fortolkningerne afspejler de identificerede begrænsninger og vurderingens formål
- Vurderingsrapporten er gennemskuelig og konsekvent.

De ovenstående fem punkter anvendes som overordnet disposition, men der er dog et naturligt overlap mellem mange af punkterne.

## 1.2 Aktiviteter i den kritiske gennemgang

Den formelle del af projektet er startet i januar 2013.

Reviewet var planlagt til at foregå i tre trin:

- Review af projektets Goal and Scope
- Review af udkast til færdig rapport
- Review af slutrapport

Det nærværende review er det afsluttende dokument i denne proces. Derudover har der været afholdt et møde med deltagelse af projektgruppen fra DTU Miljø, Miljøstyrelsen og FORCE Technology, hvor projektets formål og omfang har været diskuteret og to møder i følgegruppen. Der har været hyppig – uformel - telefonkontakt mellem projektgruppen og revieweren, og revieweren har i hele projektperioden endvidere stået til rådighed for følgegruppens medlemmer for en faglig diskussion af projektet indhold og dets resultater.

Tidsplanen for projektet er blevet ændret flere gange undervejs, i alle tilfælde efter aftale med både reviewer og følgegruppe.

## 2 Formål og omfang af undersøgelsen

Formålet med projektet "LCA af genbrug af mursten" var at udføre en livscyklusbaseret miljøvurdering af genbrug af murstensaffald ved oparbejdning af mursten til nybyggeri sammenlignet med genanvendelse af murstensaffaldet ved nedknusning og anvendelse af dette til vejfyld eller opfyldning i forbindelse med andet anlægsarbejde.

Omfanget af projektet er overordnet set relativt beskedent, med to processer der er centrale for resultaterne, nemlig produktion af nye mursten og oparbejdning af gamle mursten til genbrug. I projektforsøget – og dermed også i slutrapporten har det været vigtigt at få understreget, at projektets resultater kun er gældende for den del af de oparbejdede mursten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. En genbrugelig mursten skal således fuldt ud kunne erstatte enten en ny facadesten eller en ny bagsten. I hvilken grad dette er tilfældet, undersøges i et sideløbende projekt, der endnu ikke er afsluttet.

Det vurderes, at denne begrænsning i anvendelsen af projektets resultater er beskrevet på passende måde flere steder i rapporten. Muligheden for en fejlagtig fortolkning og brug af resultaterne skønnes derfor at være minimale.

## 3 Anvendte metoder

Det grundlæggende metodevalg til beregning af miljøpåvirkninger er det samme, som anvendes til belystning af byggevarers miljøbelastning i CEN-standarden EN 15804, nemlig den såkaldte CML-metode. Efter ønske fra Miljøstyrelsen er de grundlæggende metoder suppleret med beregninger efter USEtox, der er en internationalt anerkendt og anbefalet metode til vurdering af påvirkningen af mennesker og økosystemer, samt en beregning af partiklers påvirkning af menneskers sundhed. Der mangler i rapporten en helt præcis beskrivelse af kilden til de karakteriseringsfaktorer, der er anvendt i vurderingen. For de påvirkningskategorier, der er inkluderet i EN 15804, er der udarbejdet et Annex med alle relevante karakteriseringsfaktorer, og det bør fremgå, hvis det er disse, der benyttes. Set i lyset af, at den danske UMIP-metode indeholder væsentligt flere karakteriserede stoffer, specielt for forurening og eutrofiering, vil det i princippet være mest rigtigt at modificere CML-metoderne, så de bliver sammenlignelige med de danske. På den måde vil man undgå, at udledning af forurenende stoffer som HCl og HF (hydrogenchlorid og hydrogenfluorid) negligeres i vurderingen. Det er tvivlsomt, at de "manglende" stoffer bidrager til diverse påvirkninger i nævneværdigt omfang, men den præcise kilde til karakteriseringsfaktorer skal som sagt beskrives på et passende sted i rapporten.

Belastningerne normaliseres efterfølgende, med henblik på at kunne vurdere hvilke belastninger, der er de væsentligste i de undersøgte systemer. Til normaliseringen anvendes en bred vifte af referencer, men det vurderes at kombinationen af metodevalg og normaliseringsreference er den bedst mulige, når vurderingen skal baseres på tilgængelige videnskabs-baserede kilder.

Det grundlæggende metodevalg vurderes således at være velegnet til formålet, og det bemærkes at den relativt store usikkerhed, der er i vurderingen af påvirkningen af økosystemer og menneskers sundhed, er behandlet på forsvarlig måde.

Til sammenligning mellem genbrug af mursten (i byggeri) og genanvendelse af nedknuste mursten (som vejfyld) anvendes konsekvens-LCA, med systemudvidelse som et væsentligt element. Denne tilgang er i fuld overensstemmelse med dansk praksis indenfor LCA og med ISO's anbefalinger af systemudvidelse frem for allokering. Det er vigtigt også i denne forbindelse at gøre opmærksom på de forudsætninger, der er omkring

oparbejdede mursten, nemlig at de lovligt kan genbruges og markedsføres samt at en genbrugelig mursten således fuldt ud skal kunne erstatte enten en ny facadesten eller en ny bagsten.

## 4 Naturvidenskabelig og teknisk gyldighed

Det vurderes overordnet, at de anvendte metoder er naturvidenskabeligt og teknisk gyldige, og at de er velegnede til det aktuelle formål.

## 5 Anvendte data

Vurderingen baseres i udstrakt grad på to datasæt for henholdsvis produktion af nye mursten og oparbejdelse af gamle mursten til genbrug. Begge datasæt er leveret af danske aktører og repræsenterer henholdsvis et repræsentativt dansk teglværk, der producerer både nye facade- og bagsten og en enkelt dansk virksomheds proces til oparbejdning af gamle mursten. Begge datasæt vurderes at være tilstrækkeligt dækkende til at give et brugbart billede i den givne sammenhæng. De potentielle svagheder, der er i de to datasæt (ældre (2006) data for nye mursten; ukendt eller dårligt belystrepræsentativitet for både nye og gamle mursten), belyses i relevante følsomhedsanalyser, således at det er muligt at drage mere generelle konklusioner.

De primære datasæt suppleres af en række generiske datasæt, hovedsageligt fra den internationalt anerkendte databaseecoinvent. Disse data spiller en mindre rolle for vurderingens resultater, og det er derfor ikke så vigtigt, at datasættene efterhånden har en del år på bagen. Der er således langt hen ad vejen tale om teknologier, der ikke ændrer sig væsentligt over tid, f.eks. grusgravning.

Rapportens samlede vurdering af datakvaliteten for *inventory*-data afspejler de ovenstående bemærkninger på passende måde. Datakvaliteten for de to centrale datasæt er høj, mens de generiske datasæt mangler kvalitet på et eller flere områder. Man kunne måske være endnu mere kritisk overfor kvaliteten af de generiske datasæt, men det understreges, at de dels er de bedst tilgængelige med det ønskede detaljeringniveau, dels ikke spiller en væsentlig rolle.

Det skal dog bemærkes, at der ikke er fuld symmetri i de anvendte datasæt. I enkelte datasæt er der et højt detaljeringniveau med hensyn til f.eks. nedsivning til grundvand, mens der i andre datasæt er et højt detaljeringniveau omkring f.eks. udledning af tungmetaller ved udvinding af primær energi. Helt basalt medfører denne asymmetri i opgørelsen ("*inventory*"), at det er vanskeligt at sammenligne resultaterne for påvirkning af økosystemer og menneskers sundhed. Når der desuden skal tages hensyn til de store usikkerheder, der er i metoderne til vurdering og normalisering af de samme påvirkningskategorier, er det i praksis umuligt at give en videnskabelig fortolkning af resultaterne. Denne erkendelse er kommet gradvist gennem projektet, og den afsluttende rapport vurderes at give et hæderligt billede af dette.

Til beregningerne anvendes det af DTU Miljø udviklede software, EASETECH. Revieweren har haft adgang til dokumentation af, at programmet dels "regner rigtigt", dels anvender primære og generiske datasæt på en måde, der er i overensstemmelse med de anvendte metoder. Der er tale om software, der knap nok er kommercialiseret endnu, og det har ikke været muligt indenfor reviewets rammer at gennemføre en form for kvalitetskontrol. Gennem dialog med projektgruppen er det dog sandsynliggjort, at resultaterne ville være præcist de samme, hvis der havde været anvendt et mere kendt softwareværktøj som SimaPro eller GaBi.

## 6 Præsentation og fortolkning af resultater

Rapporten præsenterer alle resultater under en enkelt nummereret overskrift, nemlig "Samlede potentielle miljøpåvirkninger" i afsnit 4.1. Der er med andre ord i den grundlæggende struktur ikke taget udgangspunkt i, at det er hensigtsmæssigt at holde de to trin for hhv. *Karakteriserede* og *Normaliserede* resultater adskilt. I praksis gennemføres vurderingen dog i de to trin, men i flere omgange.

Der sker ved - via unummererede overskrifter – at skelne mellem "Ikke-toksiske miljøpåvirkninger", "Toksiske miljøpåvirkninger" og "Forbrug af abiotiske ressourcer", og for hver af disse først præsenterer og diskuterer de karakteriserede resultater i tabelform og derefter de normaliserede resultater i figurform. Revieweren finder ikke, at denne opdeling/struktur er hensigtsmæssig, men den er ikke nødvendigvis i modstrid med kravene i gældende standarder. Det bemærkes at man traditionelt i dansk LCA opdeler efter den geografiske skala, dvs. i henholdsvis **globale/regionale** miljøbelastninger **og lokale** påvirkninger af økosystemer og menneskers sundhed, som kan suppleres med en vurdering af ressourceforbruget (hvilket i parentes bemærket ikke i sig selv er en belastning af miljøet). En konsekvensretning vil dog være meget omfattende, og de ovenstående bemærkninger kan derfor bedst tjene til at overveje, hvilken terminologi og struktur der skal bruges i fremtidige LCA'er. Det anbefales dog på det kraftigste, at forsyne hele kapitlet med overskrifter på niveau 3, så det er klart hvilket element i vurderingen, der er tale om.

Opbygningsmæssigt virker det også unaturligt, at vurderingen af de normaliserede værdier for globale/regionale påvirkninger starter med at beskrive de fund, der er af mindst betydning, hvorefter der fokuseres på de største påvirkninger. Dette er ikke forkert, men gør det efter reviewerens mening svært at holde fokus på, hvad der er de vigtigste fund.

Afslutningsvis i resultatafsnittet findes der i tabelform et godt overblik over, hvor de vigtigste forskelle er mellem genbrug og genanvendelse af gamle mursten. Overblikket består ganske enkelt af en rangordning af de tre scenarier, og denne fremgangsmåde giver et rigtig godt fokus for den videre fortolkning. Det bemærkes, at revieweren er enig i de konklusioner, der er truffet på baggrund af rangordningen. Som en enkelt kritisk bemærkning kan ordvalget i den første *bullet point* i konklusionerne i afsnit 4.2 måske misforstås. Udtrykket "Relativt store miljøbesparelser" med hensyn til drivhuseffekten mangler et sammenligningsgrundlag, og kunne med fordel erstattes med et udsagn a la "Der var signifikante forskelle med hensyn til påvirkning af klimaet" eller "Kategorien drivhuseffekt fremstår som den vigtigste med hensyn til ....".

I afsnit 4.3 analyseres resultaterne gennem at se på hvilke processer, der er vigtigst i det samlede billede. Overordnet set er det lidt forvirrende, at der ved opdeling af scenarier i underprocesser er et sammenfald mellem scenariets navn og navnet på en (vigtig) underproces (fx "Genbrug af mursten"). I underprocessen indgår en eller flere delprocesser: I "Genbrug af mursten" indgår således "Undgået produktion af nye mursten" og (undgået?) "Iergravning", mens der i underprocessen "Transport" indgår seks transportprocesser, hvoraf fire er relateret til oparbejdningen af mursten og to er relateret til den undgåede produktion af nye mursten (i.e. "Undgået transport af nye mursten til nybyggeri" og "Undgået transport af grus fra grusgrav til vejbyggeri"). Disse to transportprocesser er således en del af de to scenarier for "Genbrug af mursten" men de er ikke en del af underprocessen "Genbrug af mursten".

Det lidt uheldige valg af terminologi vanskeliggør efter reviewerens mening tolkningen af resultaterne. Det kunne måske hjælpe, hvis der blev taget udgangspunkt i et instruktivt eksempel, men der begyndes i praksis også i dette afsnit med en ret detaljeret gennemgang af de elementer, der ikke er vigtige i den store sammenhæng, mens de mest betydende faktorer først berøres senere. Med de mange ubetydende resultater mister rapporten igen sit fokus, men det er vigtigt at understrege, at ingen af de mange detaljer

er forkerte. Det gør det i øvrigt ikke nemmere at gennemskue de mange detaljer, at farvevalget for de tre mest prominente processer (genbrug, genanvendelse og transport) i figurene alle er nuancer af blå.

I mængden af detaljer fremstår "Genbrug af gamle mursten" som den mest betydende proces, hvilket jo ikke er overraskende efter gennemgangen af hovedresultaterne. Fremgangsmåden fungerer dog OK som en introduktion til de følsomhedsanalyser, der gennemføres i det følgende afsnit. Man kommer rundt om alle detaljer, og for hver af undersøgte påvirkningskategorier opsummeres de væsentligste bidrag og besparelser i en samlet tabel. Denne tabel indeholder derfor en del information, men den er efter reviewerens mening svær at forholde sig til, måske fordi den ikke fokuserer på det, der er vigtigt i det samlede billede. Det skal dog understreges, at tabellen ikke indeholder forkerte informationer.

Det efterfølgende afsnit 4.4. hvor der drages konklusioner, fremstår heller ikke som specielt klart. Det er uden tvivl konceptet omkring konsekvens-LCA, der bidrager til den potentielle forvirring hos revieweren/læseren. Et scenarie kan således på samme tid have både større besparelser og større belastning end et andet scenarie, og en proces kan bidrage med både belastninger og besparelser. Der er heller ikke her tale om forkerte oplysninger, men om udsagn, der i konklusionerne ikke suppleres med en "naturlig forklaring". Ofte kan forklaringen findes i det forudgående analyseafsnit, men man skal som sagt lede blandt rigtig mange udsagn for at finde essensen.

De afsluttende følsomhedsanalyser i afsnit 5 giver et godt billede af, at der er tale om robuste konklusioner for de grundlæggende scenarier. Specielt er følsomhedsvurderingen af udsortering vigtig, fordi der ganske givet vil være tale om ganske store forskelle mellem andelen af genbrugelige mursten fra forskellige nedrivningsopgaver. Det er også vigtigt at få kvantificeret betydningen af, at nye mursten vil optage CO<sub>2</sub> gennem de første mange år af deres levetid. Den semi-kvantitative gennemgang af betydning af referenceåret for produktionen af nye mursten, giver en god baggrund for at forstå variationen i specielt energiforbruget over tid – og den derved introducerede usikkerhed i sammenligningen af scenarier.

Konklusionerne i afsnit 6 giver et meget ligefremt billede af undersøgelsens resultater. Der fokuseres på de vigtigste fund, uden at der gives unødvendige detaljer. En vigtig detalje er, at en vigtig begrænsning ved undersøgelsen fremhæves, nemlig at vurderingen kun gælder i de tilfælde, hvor sten fra en nedrivningsproces lovligt kan genbruges og markedsføres.

I relation til kravene til en LCA i ISO 14044 vurderes det helt overordnet, at fortolkningerne afspejler de identificerede begrænsninger og vurderingens formål. Det er også et krav i ISO 14044, at vurderingsrapporten er gennemskuelig og konsekvent. Set i lyset af de kritiske bemærkninger ovenfor vurderes det overordnet for disse aspekter, at en mere konsekvent struktur og terminologi vil kunne gøre rapporteringen meget mere gennemskuelig. Der er dog ikke tale om, at rapporten i sin nuværende form indeholder fejlagtige oplysninger, fortolkninger eller konklusioner. Der er dog heller ikke tvivl om, at en opstramning af specielt resultatafsnittene vil give ikke-specialister på LCA-området en bedre mulighed for at forstå den teknisk-videnskabelige proces, der ligger bag de mange ord.

## **7 Følgegruppens kommentarer**

Følgegruppen har som uformelt reviewpanel som nævnt haft mulighed for at kommentere både skriftligt og mundtligt på projektgruppens arbejde, også i forbindelse med den afsluttende rapport. Denne mulighed har Tommy Bisgaard fra Kalk- og Teglværksforeningen benyttet sig af, og hans kommentarer er i sin fulde længde vedhæftet reviewet.



Den formelle reviewer takker for dette supplement, der på nogle områder fremstår mere som et partsindlæg til den fremtidige perspektivering og brug af rapportens resultater end som en kritik af rapportens metoder, ordvalg og konklusioner.

Kalk- og Teglværksforeningen er en central aktør i relation til substitution af nye mursten med genbrugssten, og det er derfor vigtigt for brancheforeningen at sikre, at rapportens forudsætninger er klart beskrevet. Med syv forskellige beskrivelser af forudsætningerne er dette ikke tilfældet, og revieweren anbefaler derfor, at der strammes op på teksten også på dette område.

Det hører dog med i billedet, at de mange formuleringer ikke har til formål at tegne forskellige billeder, der hvor de anvendes. Der er efter reviewerens mening snarere tale om, at det er blevet mere klart i projektets forløb, at forudsætningerne skulle nævnes flere steder i rapporten for at undgå en over- eller fejlfortolkning af resultaterne. Dette er så gjort med et mere eller mindre tilfældigt ordvalg, tilpasset den konkrete situation.

Kommentarerne fra Kalk- og Teglværksforeningen peger desuden på tre konkrete kritikpunkter. For det første stilles der spørgsmål ved, om genbrugsprocenten er realistisk, for det andet fremføres det, at energibesparelser ved brug af nye bagsten ikke er inddraget på passende måde og for det tredje anføres det, at levetiden af mursten bør inddrages i vurderingen.

Revieweren finder, at der er tilstrækkelig dokumentation for, at genbrugsprocenten dækker den aktuelle situation. En følsomhedsanalyse dækker et meget bredt spektrum af genbrugsprocenter, hvilket primært tjener til at belyse, hvor robuste resultaterne er. Dette aspekt er derfor behandlet på passende måde efter reviewerens mening.

Der er ikke i projektet taget hensyn til de potentielle energibesparelser ved brug af nye bagsten med en angiveligt bedre isoleringsevne end genbrugte mursten. Denne forudsætning er kun nævnt et enkelt sted i rapporten, og da der ikke er viden om betydningen i praktisk byggeri, anbefales det af revieweren også at nævne denne forudsætning i sammenfatningen og i de overordnede konklusioner.

Endelig nævner Kalk- og Teglværksforeningen levetid som en vigtig parameter i en undersøgelse af denne type. Revieweren er principielt enig i dette, men mener ikke, at man skal se på levetiden af mursten som et isoleret element, men som en integreret del af en samlet vurdering af et byggeri. Levetiden bliver derfor en parameter på linje med andre tekniske egenskaber, der belyses i et parallelt projekt.

## **8 Konklusioner på reviewet**

Det konkluderes, at LCA-rapporten om genbrug af mursten i al væsentlighed lever op til de formelle krav i ISO 14044. De anvendte metoder er videnskabeligt gyldige og i overensstemmelse med standarden, både med hensyn til anvendelse af konsekvens-LCA og hvad angår vurderingen af de enkelte påvirkningskategorier. På samme måde er de anvendte data hensigtsmæssige og fornuftige i forhold til vurderingens formål.

Vurderingerne har på grund af diverse forudsætninger en række begrænsninger, hvoraf de vigtigste fremhæves på passende måde på centrale steder i rapporten. Fortolkningen afspejler således de identificerede begrænsninger i relation til formålet med vurderingen.

Rapporten indeholder en mængde detaljer, der i realiteten er uden betydning for hverken de basale konklusioner eller fortolkningen. Dette er naturligvis ikke forkert i sig selv, men sammen med en svag struktur og en uhensigtsmæssig terminologi betyder det, at rapporten visse steder fremstår som rodet og

uigennemsigtig. Dette betyder ikke, at rapporten indeholder forkerte resultater og fortolkninger, kun at det for mange ikke-specialister kan være svært at fokusere på de essentielle fund i rapporten.

Afslutningsvis bemærkes det, der i reviewet peges på et par reelle mangler. Disse forventes at være håndteret ved den afsluttende redigering. Der gives også en række anbefalinger til, hvor der konkret kan strammes op på teksten i rapporten. Det er håbet, at disse anbefalinger følges, så rapporten fremstår mere gennemarbejdet.

## **Bilag 3: DTU's kommentarer til reviewet**

### **Indledning**

Nærværende LCA-rapport er blevet reviewet, dvs. gennemgået med kritiske øjne, af LCA-eksperten Anders Schmidt fra FORCE Technology. Anders Schmidts endelige version af reviewet foreligger som Bilag 2 i denne rapport. I det følgende adresserer DTU Miljø de væsentligste punkter, som Anders Schmidt behandler i sit review og beskriver, hvordan DTU Miljø forholder sig til dem, samt på hvilken måde det har haft indflydelse på udformningen af den endelige rapport.

Som Anders Schmidt beskriver i reviewet, har der været en, efter DTU Miljø's mening, meget frugtbar proces gennem hele projektet, hvor revieweren har kommenteret/gennemgået dele af projektet, efterhånden som de blev afrapporteret. Derudover har der været hyppig kontakt mellem revieweren og DTU Miljø af mere uformel art i form af mails og telefonsamtaler. Alt i alt har denne proces været medvirkende til at sikre, at rapporten lever op til de i sektion 2.1 "Overordnede principper" opstillede kvalitetskrav.

I reviewet vurderes LCA-rapporten på en række punkter som beskrevet i ISO-standarden, herunder om formål og omfang af LCA'en er præcist beskrevet, validiteten af de anvendte LCA-metoder, den naturvidenskabelige og tekniske gyldighed af metoderne, kvaliteten af de anvendte data samt om præsentation og tolkning af resultater lever op til standarden. Nedenfor kommenterer DTU reviewet under de overskrifter, som anvendes i reviewet.

### **Formål og omfang af undersøgelsen**

Med hensyn til LCA'ens formål og omfang var det, udover at beskrivelsen var præcis, et vigtigt punkt for DTU, at undersøgelsens begrænsninger klart fremgik for at undgå misbrug af undersøgelsens resultater. Revieweren er enig i dette punkt og skriver: "Det vurderes, at denne begrænsning i anvendelsen af projektets resultater er beskrevet på passende måde flere steder i rapporten. Muligheden for en fejlagtig fortolkning og brug af resultaterne skønnes derfor at være minimale".

### **Anvendte metoder**

Revieweren vurderer derefter de anvendte metoder til beregning af miljøpåvirkninger, og konkluderer at: "Det grundlæggende metodevalg vurderes således at være velegnet til formålet...". Der rejses dog et spørgsmål af revieweren angående den præcise kildeangivelse for karakteriseringsfaktorerne, som anvendes i rapporten. DTU har derfor tilføjet en mere detaljeret forklaring i fjerde afsnit af sektion 2.6 "Miljøpåvirkningskategorier, LCIA-metoder og fortolkning af resultater" samt i fodnoterne til tabel 1, som beskriver, hvor karakteriseringsfaktorerne stammer fra med angivelse af referencerne UseTox (2013), CML (2012) og ecoinvent (2013), der kan findes i referencelisten.

Der har igennem projektet været en diskussion mellem revieweren og DTU om, hvilken betydning resultater fra de toksiske miljøpåvirkningskategorier bør tillægges. DTU er enig i, at disse påvirkningskategorier på grund af deres iboende relativt store usikkerhed bør tillægges mindre betydning end de ikke-toksiske kategorier, hvilket ligeledes afspejles i rapportens præsentation af resultater og konklusioner. Revieweren bemærker hertil, at: "... det bemærkes at den relativt store usikkerhed, der er i vurderingen af påvirkningen af økosystemer og menneskers sundhed, er behandlet på forsvarlig måde".

### **Naturvidenskabelig og teknisk gyldighed**

Reviewet angiver kort til dette punkt at: "Det vurderes overordnet, at de anvendte metoder er naturvidenskabeligt og teknisk gyldige, og at de er velegnede til det aktuelle formål".

### **Anvendte data**

De væsentligste data, som indgår i projektet, er inventories for de to processer ” Produktion af nye mursten ” og ”Oparbejdning af mursten til genbrug”. En del af projektets ressourcer er gået til at fremskaffe data af høj kvalitet for disse processer, således at de på korrekt vis repræsenterer den nuværende situation i Danmark. Det er lykkedes i samarbejde med projektets interessenter at få samlet data til en detaljeret LCI for dansk murstensfremstilling og ligeledes indhente repræsentative data for oparbejdelsesprocessen, som repræsenterer et fremskridt fra tidligere livscyklusopgørelser. I den forbindelse kommenterer revieweren at: ”Begge datasæt vurderes at være tilstrækkeligt dækkende til at give et brugbart billede i den givne sammenhæng”.

For at beskrive de resterende processer i projektet, er der i stor udstrækning benyttet generiske data fra et antal kommercielt tilgængelige LCA-databaser. Der stilles i reviewet spørgsmålstegn ved de generiske processers kvalitet, f.eks. med hensyn til tidsmæssig overensstemmelse, idet det konkluderes at: ”Man kunne måske være endnu mere kritisk overfor kvaliteten af de generiske datasæt”, men revieweren fortsætter: ”men det understreges, at de dels er de bedst tilgængelige med det ønskede detaljeringniveau, dels ikke spiller en væsentlig rolle.” DTU hæfter sig ved, at revieweren på trods af manglerne er enig i, at datasættene er de bedst tilgængelige.

### **Præsentation og fortolkning af resultater**

Det bemærkes i reviewet, at der efter reviewers mening er en uhensigtsmæssig manglende opdeling af resultatafsnittene i karakteriserede og normaliserede resultater. Reviewer kritiserer videre rapporten opdeling/struktur på dette område, men konkluderer dog at: ”den (opdeling/strukturen) er ikke nødvendigvis i modstrid med kravene i gældende standarder”. Revieweren foreslår slutteligt at forsyne kapitel 4 med overskrifter på niveau 3, hvilket DTU har gjort i den endelige version af rapporten. Revieweren er ikke enig med DTU om rækkefølgen, som resultaterne præsenteres i – DTU mener på dette punkt, at der er tale om mere personlige præferencer og opretholder den anvendte rækkefølge.

Med hensyn til en central tabel i rapporten, som viser scenariernes rangorden i de forskellige miljøpåvirkningskategorier (tabel 9 i afsnit 4.1.4) siger reviewer: ”Overblikket består ganske enkelt af en rangordning af de tre scenarier, og denne fremgangsmåde giver et rigtig godt fokus for den videre fortolkning. Det bemærkes, at revieweren er enig i de konklusioner, der er truffet på baggrund af rangordningen”. DTU hæfter sig ved at reviewer er enig i konklusionerne mht. dette kernepunkt i rapporten.

Der diskuteres derefter hensigtsmæssigheden i opdelingen af underprocesser i afsnit 4.3, hvor der gøres opmærksom på placeringen af især transportprocesser. Der vil ofte være en diskussion af, om transport skal ses som en proces for sig, eller om det skal indgå som underprocesser i andre processer. DTU har valgt at se transport som en samlet proces, hvilket er baggrunden for den anvendte opdeling.

DTU noterer sig, at revieweren finder at følsomhedsanalyserne i kapitel 5 ”giver et godt billede af, at der er tale om robuste konklusioner for de grundlæggende scenarier”.

Der kan være et skisma mellem ønsket om at fremlægge resultater i alle detaljer og på samme tid opretholde en kortfattet og præcis form. Som konsekvens af diskussioner med følgegruppemedlemmer under projektets forløb fremstod det vigtigt for DTU at præsentere alle detaljer i de genererede resultater, herunder også resultater, som viste sig ikke at have betydning for de overordnede konklusioner. På den måde opnås transparens, og formodninger om at ”noget” ikke er undersøgt undgås. På trods af de mange detaljer i resultatafsnittene ender revieweren dog med at konkludere om konklusionsafsnittet i kapitel 6 at: ”Konklusionerne i afsnit 6 giver et meget

ligefremt billede af undersøgelsens resultater. Der fokuseres på de vigtigste fund, uden at der gives unødvendige detaljer.”

Til slut i reviewets afsnit om præsentation og fortolkning af resultater bemærker revieweren at: ”I relation til kravene til en LCA i ISO 14044 vurderes det helt overordnet, at fortolkningerne afspejler de identificerede begrænsninger og vurderingens formål”.

### **Følgegruppens kommentarer**

Revieweren behandler i dette afsnit følgegruppens kommentarer til rapporten, som hovedsageligt består i et notat fra Kalk- og Teglværksforeningen, der er gengivet i sin fulde længde i Bilag 4. Revieweren er enig med Kalk- og Teglværksforeningen i, at den sproglige formulering af rapporten væsentligste forudsætninger bør strammes op. Som revieweren bemærker, er der fra DTU's side ingen hensigt om at give forskellige versioner af forudsætningerne, men der er tale om en proces, hvor der løbende er kommet mere fokus på at præsentere forudsætningerne gentagne gange i forskellig sammenhæng. DTU vil dog gerne følge reviewer og Kalk- og Teglværksforeningens opfordring til at tilrette beskrivelsen af projektforsætninger – se DTU's svar til Kalk- og Teglværksforeningen i Bilag 5.

Revieweren behandler dernæst tre kritikpunkter som Kalk- og Teglværksforeningen rejser – det drejer sig om de anvendte genbrugsprocenter, inddragelse af bagstens varmeisoleringssevne samt antagelaser om murstens levetid. DTU er enig med revieweren i hans behandling af disse punkter og tilslutter sig fuldt ud til hans konklusioner. Revieweren foreslår, at det nævnes yderligere at par steder i rapporten, at bagstens varmeisoleringssevne ikke indgår i rapportens beregninger. DTU har implementeret dette i den endelige version af rapporten.

### **Konklusion på reviewet**

De ovennævnte betragtninger leder til revieweren generelle konklusion, at: ” LCA-rapporten om genbrug af mursten i al væsentlighed lever op til de formelle krav i ISO 14044.” DTU tager revieweren bemærkninger mht. rapportens struktur og terminologi til efterretning, men understreger, at DTU og revieweren overordnet set er enige om validiteten af rapportens metodevalg, datagrundlag, præsentation og fortolkning af resultater samt beskrivelse af rapportens forudsætninger og begrænsninger.

De to reelle mangler, som revieweren omtaler til sidst i reviewet, er udbedret som beskrevet under de relevante afsnit ovenfor.

**Bilag 4: Notat med Kalk- og Teglværksforenings kommentarer til rapporten**



---

## **LCA FOR GENBRUG AF MURSTEN**

### **Kommentarer**

I det følgende er givet vor forenings kommentarer til ”DTU - LCA af genbrug af mursten, september 2013, Udkast til endelig rapport”.

#### **Generelt**

Overordnet finder vi, at rapporten kunne være meget bedre struktureret, mere læseværdig samt ikke mindst en mere præcis formuleret rapport med væsentligt klarere og konklusioner, hvori man også inkluderer de mange vigtige forudsætninger/antagelser, så dette kan læses i sin helhed.

Vi må f.eks. også overordnet tage afstand fra følgende subjektive konklusioner:

Side 9:

*Besparelsen skyldes, at der bruges en relativ stor mængde naturgas i produktion af nye mursten”,*

samt side 41:

*”I kategorien drivhuseffekt var der relativt store miljøbesparelser i genbrugsscenerierne på -13,4 mPE og -6,8 mPE/ton murstensaffald ved substitution af hhv. facadesten og bagsten”.*

At tale således kvantitativt om ”store mængder naturgas” eller ”store miljøbelastninger” er ikke korrekt eller fair i en sådan rapport.

I rapporten har man valgt at tage udgangspunkt i 1 tons murværksaffald. I andre kendte LCA-sammenligninger har man tages udgangspunkt i en mursten eller 1 m<sup>2</sup> væg. Da 1 tons bagmursten (ca. 625 mursten) er nok til 10 m<sup>2</sup> bagvæg, havde man således fået en besparelse, der kun var 10 % af den angivne forskel i energi, dersom man havde talt om 1 m<sup>2</sup> mur.

Det er derfor også en myte, at der går meget energi til fremstilling af mursten til f.eks. et enfamiliehus samt det er trist, at der bliver fokuseret så ukorrekt på murstens CO<sub>2</sub>-belastning, uden at man sætter konkrete tal herpå, og dermed i rapporten gør nogle virkelige sammenligninger med dagligdagens CO<sub>2</sub>-emission omkring.

Eksempler herpå er som følger:

Tager en almindelig familie på fire personer på en rejse til f.eks. Thailand, vil alene flyrejsen tur-retur betyde en CO<sub>2</sub>-emission på ca. 1.5 t CO<sub>2</sub> pr. person, altså ca. 6 t CO<sub>2</sub> i alt for familien.

Hvis den samme familie har en lidt ældre benzinbil i mellemklassen og kører ca. 40.000 km pr. år, resulterer denne bilkørsel i en yderligere årlig CO<sub>2</sub>-emission også på ca. 6 t CO<sub>2</sub>.

Bor samme familie endvidere i et hus fra 1970'erne med oliefyr, og der for dette hus ikke er foretaget større energireoveringer, vil oliefyret også give en CO<sub>2</sub>-emission på ca. 6 - 8 t CO<sub>2</sub> pr. år.

Bygger samme familie endeligt et traditionelt nyt fuldmuret enfamiliehus i tegl i formur og bagmur, udsendes der det år med ca. 6 - 8 t CO<sub>2</sub> fra fremstillingen af murstenene til hele dette hus.

Der er således ikke større forskel på CO<sub>2</sub>-belastningen til flyrejsen, bilen og oliefyret end der er på fremstillingen af de ønskede mursten til det nye drømmehus, men hvor disse mursten holder mere end 100 år stor set uden vedligehold, selv om de er fremstillet med en så lav CO<sub>2</sub>-emission.



Vedr. side 47:

*"Mht. de toksiske påvirkningskategorier kom de væsentligste miljøbesparelser fra "genbrug af mursten". Transportprocesser bidrog både med miljøbesparelser og belastninger. "Genanvendelse af murstensaffald" bidrog med miljøbelastninger hovedsagelig fra udsivning af tungmetaller (Cr (VI) og Pb) fra det knuste murstensaffald anvendt til vejbygning".*

Vi må her tage afstand fra udtrykket "de væsentlige miljøbesparelser", da vi mener, at en sådan tolkning ikke holder set på hele rapportens vægtning.

### **Generelle definitioner/formål/forudsætninger:**

Man bør sammenligne i rapporten flg. udsagn i form af definitioner, antagelser & formål:

Side 6:

*"Det er en hovedantagelse, at mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud kan erstatte nye mursten, dvs. der er teknisk og funktionel ækvivalens. Der er således som udgangspunkt en overensstemmelse mellem nye og gamle mursten mht. funktionaliteten, idet de genbrugelige mursten skal leve op til de samme krav som nye mursten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. En genbrugelig mursten vil skulle erstatte enten en ny facadesten eller en ny bagsten".*

Side 6:

*"De genbrugelige mursten kan enten erstatte nye facadesten (scenarie B) eller nye bagsten (scenarie C)".*

Side 11:

*"LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. Det forudsættes desuden, at murstensaffaldet, som ankommer til oparbejdning på oparbejdningsvirksomheden indeholder en vis (større) mængde genbrugelige mursten".*

Side 12:

*"Formålet med "LCA af genbrug af mursten" var at udføre en livscyklusbaseret miljøvurdering af genbrug af murstensaffald ved oparbejdning af mursten til nybyggeri (hvor der forudsættes fuld teknisk og funktionel ækvivalens mellem nye og genbrugelige mursten)".*

Side 14:

*"Genbrug/genanvendelse af 1 ton murstensaffald indeholdende en vis mængde mursten, der potentielt kan genbruges".*

Side 19:

*"Det er en hovedantagelse, at mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud kan erstatte nye mursten. Der er således som udgangspunkt en overensstemmelse mellem nye og gamle mursten mht. funktionaliteten, idet de genbrugelige mursten skal leve op til de samme krav som nye mursten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. En genbrugelig mursten vil typisk skulle erstatte enten en ny facadesten eller en ny bagsten".*





Side 57:

*”Det er vigtigt først at understrege, at miljøvurderingens resultater bygger på en række forudsætninger, hvor især den antagelse er afgørende, at en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud - teknisk og funktionelt - erstatter en ny mursten i form af facadesten eller bagsten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. Det forudsættes desuden, at murstensaffaldet, som ankommer til oparbejdning på oparbejdningsvirksomheden indeholder en vis (større) mængde genbrugelige mursten”.*

Man kommer således nemt til det resultat, at der i rapporten er brugt forskellige antagelser eller forudsætninger, når man ser på de 8 forskellige udsagn som angivet ovenfor.

Dette bør alle steder rettes, så der er overensstemmelse mellem de enkelte udsagn, antagelser, formål og forudsætninger.

Vi foreslår, at man – for at undgå forvirring – hele vejen igennem benytter flg. fælles hovedantagelse:

***Miljøvurderingens resultater bygger på en række forudsætninger, hvor især den antagelse er afgørende, at en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud - teknisk og funktionelt - erstatter en ny mursten i form af facadesten eller bagsten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. Det forudsættes desuden, at murstensaffaldet, som ankommer til oparbejdning på oparbejdningsvirksomheden indeholder en vis (større) mængde genbrugelige mursten”.***

**Dette er yderst vigtigt**, idet en genbrugssten i LCA'en skal kunne erstatte en ny mursten 1 til 1 (én til én) og skal kunne leve op til f.eks. de samme og klare krav, som der i dag er for en ny ”kategori I” mursten med f.eks. frostklasse ”F2” samt øvrige karakteristiske egenskaber givet i den europæiske obligatoriske fællesnorm EN 771-1, som i øvrigt ifølge Byggevaredirektivet er grundlag for korrekt og lovlig CE-mærkning for byggesten af tegl (også kaldet mursten).

Dertil kommer, at i stort set alle tilfælde, hvor en facademursten skal kunne anvendes lovligt – f.eks. i ”aggressivt miljø” - skal en mursten også have de deklarerede værdier underlagt 3. parts overvågning.

Når statistikken ifølge normerne bliver bragt på banen skyldes det, at det for mursten skal deklareres, om de tilhører Kategori I eller Kategori II. For kategori I sten gælder f.eks., at trykstyrken for et parti mursten skal deklareres med et konfidensniveau på 95 %, mens konfidensniveauet for kategori II stenene er 75 %. For at dokumentere dette er det nødvendigt at anvende en veldefineret statistik vurdering, hvilket stort set er umuligt ved genbrugssten, hvor de 95 % ikke kan opnås.

I Danmark er mere end 99 % af murstensproduktionen Kategori 1 sten med et så højt konfidensniveau statistisk set som på mindst 95 %.

Ser man på en genbrugssten er der for det første tale om, at f.eks. følgende karakteristiske egenskaber skal overholdes:



# KALK- OG TEGLVÆRKSFORENINGEN

af 1893

medlem af DI

- dimensioner, tolerancer og spredning
- trykstyrke
- konfiguration
- vandoptagelse
- frostfasthed
- indhold af aktivt opløseligt salt
- vanddampdiffusionsmodstand
- vedhæftningsstyrke

Vi er derfor rigtig kede af, at det er endnu ikke er blevet afgjort, om en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud – lovligt teknisk og funktionelt – overhovedet kan erstatte en ny mursten i form af facadesten eller bagsten, samt at vi i LCA'en sammenligner med genbrugssten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres.

Vi vil dog gerne til denne nævnte rapport fra DTU fremføre vort synspunkt, nemlig at en genbrugssten nok aldrig vil kunne erstatte 1 til 1 (én til én) en ny mursten eller vil kunne dokumentere denne erstatningsmulighed til facaden f.eks. i et ”aggressivt miljø”, som er krævet i langt de fleste facader i Danmark, samt nok aldrig vil kunne opnå f.eks. en vedhæftningsstyrke, som krævet i nye og moderne bærende murværkskonstruktioner endog som krævet i mange indermure, hvorfor en vurdering af CO2-belastningen mellem en ny dansk facadesten og en genbrugssten reelt er uden værdi.

## Genbrugsprocent

Vi er stadig helt uforstående overfor, at man angiver, at 64 % af murværksaffald kan oparbejdes til hele mursten, der bare som eksempel opfylder kravet i normen til korrekt format – uden manglende kanter eller hjørner.

Her er det vedr. manglende formatopfyldelse end ikke inddraget de mange andre parametre, som en genbrugssten skal leve op til. Vi lægger her endvidere vægt på, at over 20 % i murværksaffaldet er mørtel, samt at der i dette murstensaffald også er mange andre affaldsmængder i form af teglstumper, sand, jern, beton, pap, træ, plast etc. Vi mener derfor ikke, at de 64 % kan være et korrekt tal.

At rapporten endog angiver et udbytte på op til 80 % i følsomhedsanalyser, er en meget stor svaghed ved rapporten, idet man alene pga. af mørtelindholdet i murværksaffaldet aldrig vil kunne nå de 80 %.

## Varmebesparelser

På side 19 står der godt skjult:

*”Det gøres desuden opmærksom på, at den ekstra varmeisoleringsevne ved brug af bagmurstens i forhold til facadesten ikke indgår i LCA’ens beregninger”.*

Her har rapporten efter vores opfattelse et kæmpeproblem. For det første er denne meget vigtige antagelse helt gemt af vejen og ikke gengivet i hovedkonklusionen.



# KALK- OG TEGLVÆRKSFORENINGEN

af 1893

medlem af DI

For det andet angiver flere undersøgelser, at den nævnte CO<sub>2</sub>-besparelse ved, at en ny bagmurssten isolerer bedre end en genbrugssten – set over 100 år – er en CO<sub>2</sub>-besparelse i disse 100 år, der er væsentlig højere end den forskel, der er angivet som den besparelsesfordel for CO<sub>2</sub> ved genbrugssten samt givet også er højere end selve energiforbruget for fremstilling af denne ny mursten.

**Dette er således et yderst væsentligt forhold, at vi direkte mener, at rapporten giver den forkerte konklusion vedr. CO<sub>2</sub>-besparelser, idet man ikke indregner forskellen i varmeisolering.**

Det er også i den forbindelse vigtigt, at konklusionen kan læses i sin helhed, uden at man skal ind og læse visse eller alle sider for at forstå konklusionen, samt at alle forudsætninger (f.eks. side 19) for LCA'en specifikt er nævnt korrekt i konklusionen.

Det er desuden vigtigt, at alle konklusioner er korrekt formuleret, så de ikke kan misforstås, misfortolkes eller bygger på antagelser, der ikke tager usikkerheden i betragtning.

## Format

Flere genbrugsmursten i 1800-tallet er fremstillet i andre formater end det nuværende danske normalformat, hvorfor man umiddelbart ikke altid på grund af forskellen i formatet mellem nuværende dansk normalformat og de gamle formater fra 1800-tallet kan anvende en genbrugssten. En genbrugsmursten fremstillet i 1800-tallet vil heller ikke kunne overholde kravene til de nye murstensformater, der vil være i et smallere og slankere format samt have en bedre vedhæftning til mørtlen for at kunne have mere isolering mellem formur og bagmur.

Der anvendes i vore nabolande pt. ca. 24 forskellige formater. En dansk genbrugsmursten i et andet format vil ikke kunne anvendes til eksportformål og vil således ikke kunne erstatte den eksport, som de danske teglindustri har i dag. Dette betyder også, at man ved uheldig dansk regulering af produktionen af nye danske mursten kraftigt kan påvirke denne eksport i negativ retning.

## Levetid

En ny mursten har en forventet dokumenteret levetid på mindst 100 år, dvs. i hele LCA-perioden. Man sætter levetiden i mange tilfælde til 150 år, hvilket man også gør i de fleste EPD'er.

Det er ikke dokumenteret, at en mursten, der genbruges efter 125 års anvendelse overhovedet vil kunne holde yderligere 100 år, som LCA'en dækker.

Også i dette tilfælde er der tale om en parameter, der i LCA'en er taget ud, og som dermed uden dokumentation favoriserer en genbrugssten på en unfair måde. Det vil givet heller ikke være muligt for genbrugssten at deklarerer en forventet levetid på yderligere 100 år.

Med venlig hilsen

Tommy Bisgaard

9. oktober 2013

## **Bilag 5: DTUs svar på Kalk- og Teglværksforeningens notat**

### **Indledning**

I sin egenskab af medlem af projektets følgegruppe har Kalk- og Teglværksforeningen kommenteret rapporten i et notat, som foreligger i sin helhed i bilag 4. Nedenfor ses DTU's kommentarer til notatet under de samme overskrifter, som anvendes i notatet.

### **Generelt**

Indledningsvist har Kalk- og Teglværksforeningen indvendinger mod tre formuleringer, som man finder værdiladede. DTU har rettet som følger:

Side 9: "Besparselsen skyldes, at der bruges en relativ stor mængde naturgas i produktionen af nye mursten" - "en relativ stor mængde" er slettet. Side 36: "I kategorien drivhuseffekt var der relativt store miljøbesparelser i genbrugsscenerierne på -13,4 mPE og -6,8 mPE/ton murstensaffald ved substitution af hhv. facadesten og bagsten." - "relativt store" er slettet. Side 42. "Mht. de toksiske miljøpåvirkninger kom de væsentligste miljøbesparelser..." - "væsentligste" er udskiftet med "fleste".

### **Generelle definitioner/formål/forudsætninger**

Kalk- og Teglværksforeningen refererer en række definitioner i rapporten om de generelle forudsætninger for anvendelsen af genbrugelige mursten, som er afgørende for rapportens resultater. Det antydes, at der ikke er brugt de samme forudsætninger gennem rapporten. Dette er ikke tilfældet, idet der er tale om forskellige formuleringer af de samme grundlæggende forudsætninger, som indgår i flere sammenhænge i rapporten, og som derfor er formuleret på forskellig vis. Dette anerkendes ligeledes af revieweren (se punkt 7 i bilag 2), som dog anbefaler, at der strammes op på formuleringerne. DTU har derfor valgt at følge Kalk- og Teglværksforeningens forslag til en samlet formulering af rapportens hovedantagelser om anvendelse af genbrugelige mursten:

"Miljøvurderingens resultater bygger på en række forudsætninger, hvor især den antagelse er afgørende, at en mursten oparbejdet til genbrug fuldt ud - teknisk og funktionelt - erstatter en ny mursten i form af facadesten eller bagsten. LCA'en repræsenterer derfor udelukkende de sten, der rent faktisk lovligt kan genbruges og markedsføres. Det forudsættes desuden, at murstensaffaldet, som ankommer til oparbejdning på oparbejdningsvirksomheden indeholder en vis (større) mængde genbrugelige mursten".

Denne formulering er indsat i første afsnit på side 7 i kapitlet om "Konklusion og sammenfatning" under overskriften "Forudsætninger". Formuleringen er ligeledes anvendt i samme kapitel på side 10 under overskriften "Konklusioner" og på side 18 i afsnit 2.9. Dele af formuleringen er anvendt på side 12 i kapitel 1 "Formål" i første afsnit, og på side 14 i afsnit 2.3 ved beskrivelse af den funktionelle enhed.

### **Genbrugsprocent/varmebesparelser/levetid**

Med hensyn til disse emner henviser DTU til bilag 2 i reviewets punkt 7 "Følgegruppens kommentarer". De synspunkter, som revieweren dér fremfører om dokumentation af genbrugsprocenter og murstens levetid deler DTU fuldt ud, og anser det derfor ikke nødvendig at kommentere disse punkter yderligere. Revieweren anbefaler dog, at det faktum, at rapporten ikke tager hensyn til nye bagstens angivelig bedre varmeisoleringssevne i forhold til genbrugelige mursten, nævnes i sammenfatningen og de overordnede konklusioner. DTU har derfor tilføjet denne forudsætning de bemeldte steder i rapporten.

## **LCA af genbrug af mursten**

Der er gennemført en livscyklusbaseret miljøvurdering af genbrug af mursten. Modelleringen er baseret på, hvordan Virksomheden "Gamle Mursten" forbereder de gamle mursten med henblik på, at de kan anvendes i nybyggeri. Som alternativ til direkte genbrug nedknuses murstensaffaldet og anvendes som fyldmateriale ved anlægsarbejder. Under forudsætning af, at en genbrugt mursten teknisk og funktionelt erstatter en ny mursten, er genbrug i varierende grad en mere fordelagtig behandlingsmetode end genanvendelse i forhold til forskellige påvirkninger af miljøet..



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

Strandgade 29  
1401 København K  
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

**[www. mst.dk](http://www.mst.dk)**