



Automatisering af selektiv høstning og klargøring af murelementer til genbrug og upcycling MUDP-projekt

MUDP

Juni 2026

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Jørn Kiesslinger, Lendager

Liva Bjerg Linnet, Lendager

Frederik Høgdal, Lendager

Maja Olsson, Lendager

Karoline Fogh Gustafsson, Lendager

Kathrine Hagemann Snabe, Lendager

Ida Rud Krogh, Lendager

Peter Torben Tang, IPU

Kristoffer Blæsbjerg, IPU

Grafiker/bureau:

Lendager

Fotos:

Rasmus Hjortshøj, Coast Studio

ISBN: 978-87-7564-107-9

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. 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.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense| Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Sammenfatning

Denne rapport, *Automatisering af selektiv høstning og klargøring af murelementer til genbrug og upcycling*, undersøger innovative metoder til at fremme cirkulær økonomi i den danske byggebranche. Projektet, støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP), som administreres af Miljøstyrelsen, sigter mod at automatisere høstning og klargøring af murelementer til genbrug og adresserer væsentlige miljømæssige og økonomiske udfordringer ved traditionelle nedrivningsmetoder.

Hovedmål:

- **Automatisering:** Udvikle værktøjer og teknikker til selektiv nedrivning og klargøring af materialer med fokus på cementbundet murværk, der traditionelt er svært at genbruge.
- **Øget cirkularitet:** Øge genbrug af byggematerialer for at reducere affald, CO₂-udledninger og behovet for nye råmaterialer.
- **Effektiv implementering:** Forbedre proceseffektivitet, arbejdsmiljø og skalérbarhed for bredere implementering i branchen.

Baggrund og udfordringer:

Den danske byggebranche genererer cirka 225.000 tons murstensaffald årligt, hvoraf det meste downcycles, hvilket medfører betydelige ressourcetab. Cementmørtels høje styrke, som har været standard siden 1960'erne, gør det vanskeligt at adskille og genbruge mursten. Nuværende manuelle processer er tidskrævende og omkostningstunge, hvilket begrænser deres skaleringspotentiale. Ressourcerækkerne – et boligprojekt i Ørestaden København, Danmark fra 2019 – er lykkedes med at implementere udskårne murstenselementer med cementmørtel. Ressourcerækkerne fungerer som vidensgrundlag for dette projekt, hvorfra mange erfaringer og forbedringspunkter blev identificeret.

Innovative tilgange:

1. **Teknologisk udvikling:**
 - En semi-automatiseret "murhøster" blev designet til effektiv udskæring og udvinding af murelementer med minimal beskadigelse og mest mulige genbrugelige ressourcer.
 - Algoritmer blev udviklet til at optimere høstning og nedrivningsplaner baseret på bygningens karakteristika og omkostningseffektivitet.
2. **Procesoptimering:**
 - En ni-trins proces blev etableret til selektiv nedrivning, herunder screening af donorbbygninger, planlægning, høstning, kvalitetskontrol, transport, opbevaring og montering.
 - Fokusområder inkluderer tids- og omkostningsreduktion samt sikring af materialernes integritet.
3. **Case study prototyper:**
 - Demonstrerede anvendelsen af høstede murelementer i nybyggeri på udstillingen "Planetary Boundaries", hvilket fremhævede både succeser og forbedringsmuligheder inden for skalerbarhed, bygbarhed og miljøpåvirkning.

4. Økonomisk og miljømæssig indflydelse:

- Automatiseret høstning kan reducere CO₂-udledning ved at genbruge murværk og bevare indlejret energi.
- En detaljeret omkostningsanalyse identificerer nøglefaktorer for økonomisk rentabilitet, såsom udstyrsomkostninger, arbejds effektivitet og skalering.

Anbefalinger:

- **Teknologioptimering:** Fortsæt med at finjustere værktøjer og processer for at reducere omkostninger og øge effektiviteten.
- **Markedstilpasning:** Udvikl standardiserede metoder og markedsstrategier for at understøtte udbredelsen af høstede materialer.
- **Samarbejde:** Skab partnerskaber mellem interessenter, herunder udviklere, arkitekter og nedrivningsfirmaer, for at skabe incitament og fremme implementering.

Konklusion:

Projektet demonstrerer, at automatiseret høstning og genbrug af murelementer kan bidrage væsentligt til cirkulære byggepraksisser ved at reducere miljøpåvirkningen og bevare materialeværdien. Dog er yderligere innovation, branchetilpasning og politisk støtte nødvendigt for storskala implementering og langsigtet succes.

Summary

This report, *Automatisering af selektiv høstning og klargøring af murelementer til genbrug og upcycling*, explores innovative methods to promote circular economy practices in Denmark's construction industry. The project, developed under the Danish Environment Agency's program (MUDP), aims to automate the harvesting and preparation of masonry elements for reuse, addressing critical environmental and economic challenges posed by the traditional demolition and disposal process.

Key Objectives:

- **Automate Processes:** Develop tools and techniques for selective demolition and material preparation, focusing on cement-bonded masonry, which is traditionally difficult to reuse.
- **Enhance Circularity:** Increase the reuse of building materials to reduce waste, lower CO₂ emissions, and minimize the need for new raw materials.
- **Streamline Implementation:** Improve process efficiency, work environment, and scalability for broader industry adoption.

Background and Challenges:

The Danish construction industry generates approximately 225,000 tons of masonry waste annually, much of which is downcycled, leading to significant resource loss. The high strength of cement mortar, commonly used in masonry since the 1960s, makes separating and reusing bricks challenging. Current manual processes are labour-intensive and costly, limiting their feasibility at scale. The Resource Rows – a housing project in Ørestaden Copenhagen, Denmark from 2019 – has succeeded with implementing cut-out brick elements with cement mortar. The Resource Rows serves as the knowledge base for this project, from which many learnings and points for improvement were identified.

Innovative Approaches:

1. **Technological Development:**
 - A semi-automated "brick harvester" was designed to cut and extract masonry elements efficiently while minimising damage and maximising reusable resource output.
 - Algorithms were developed to optimize harvesting and demolition plans based on building characteristics and cost-efficiency.
2. **Process Optimization:**
 - A nine-step workflow was established for selective demolition, including donor building screening, planning, harvesting, quality control, transport, storage and reinstalling.
 - Key focus areas include reducing time and costs while maintaining material integrity.
3. **Case study prototypes:**
 - Demonstrated the use of harvested masonry panels in new construction at the exhibition "Planetary Boundaries", highlighting both successes and areas for improvement in scalability, buildability, and environmental impact.

4. **Economic and Environmental Impact:**

- Automated harvesting can reduce CO₂ emissions by reusing masonry materials and preserving embedded energy.
- A cost analysis identifies key factors influencing economic feasibility, such as equipment costs, labour efficiency, and the scale of operations.

Recommendations:

- **Technology Optimization:** Continue refining tools and processes to reduce costs and increase efficiency.
- **Market Integration:** Develop standardized methods and market strategies to support the widespread use of harvested materials.
- **Collaboration:** Foster partnerships across stakeholders, including developers, architects, and demolition firms, to align incentives and drive adoption.

Conclusion:

This project demonstrates that automated harvesting and reuse of masonry elements can significantly contribute to circular construction practices, reducing environmental impact while preserving material value. However, further innovation, industry alignment, and policy support are essential for large-scale implementation and long-term success.

Indhold

Sammenfatning	4
Summary	6
Forord	11
1. Introduktion	12
1.1 Problemstilling	12
1.2 Formål	14
1.3 Værdi	14
1.4 Projektgruppen	14
2. Vidensgrundlag	16
2.1 Introduktion til Ressourcerækkerne	16
2.1.1 Udsæringsgrundlag	17
2.1.2 Procesgrundlag	17
2.1.3 Designgrundlag	19
2.1.4 Skaleringsgrundlag	22
2.2 Potentialer og barrierer	23
2.2.1 Aftagerscenarier	23
2.2.2 Behov i værdikæden	24
2.3 Mål for projekt	25
3. Teknisk udvikling	26
3.1 Murhøsterens design og udvikling	26
3.1.1 Design og afgørende mekanismer	26
3.1.2 Udviklingsproces af værktøjet	27
3.1.2.1 Udvikling af prototype 1	27
3.1.2.2 Udvikling af prototype 2	28
3.2 Procesbeskrivelse for høstning af murelementer	29
3.2.1 Klargøring af murkrone	29
3.2.2 Frigørelse af murbindere	29
3.2.3 Positionering og fastgørelse af en løfteramme på murværket	30
3.2.4 Fastgørelse af skæreramme til løfteramme	30
3.2.5 Udsæring af et murelement	31
3.2.6 Nedkraning af udsåret murelement	32
3.2.7 Frigørelse af løfte og skærerammer	33
3.2.8 Returnering af skære- og løfteramme	33
3.2.9 Gentagelse af sekvens 2-8	34
3.3 Projektering af udsæringsmængder vha. billede algoritmen	34
3.3.1 Importer tegningsmateriale til programmet	34
3.3.2 Facadevæg og bygning elementer registreres	34
3.3.3 Projektering af murelementer på facademur	35
3.4 Økonomisk analyse og omkostninger vedrørende erhvervelse af værktøj	35
3.4.1 Overslagsberegning af omkostninger ved høstning af murelementer	35
3.4.2 Omkostninger ved erhvervelse og vedligehold af værktøjet	38

4.	Procesdesign - fra planlægning til pakkede murfelter	40
4.1	Proces omkring høstning af murelementer	40
4.2	Indledende screening af donorbygning	42
4.3	Kortlægning og analyse	43
4.3.1	Krav og kriterier til høstbar mur	43
4.3.2	Kvalificering af murværkets egnethed	45
4.3.3	Reparation og rensning	46
4.4	Planlægning og klargøring til nedtagning	47
4.4.1	Udbudsmateriale	47
4.4.1.1	Udvælgelseskriterium i tilbudstildelingen	48
4.4.2	Inkorporering i nedrivningsplan	48
4.4.2.1	Kendskab til udskæringsværktøjet og egnet udstyr	48
4.4.2.2	Tidsplan	49
4.4.2.3	Klargøring af mur	49
4.4.2.4	Logistiske synergier	49
4.4.3	Indretning af byggepladsen	49
4.5	Udskæring	50
4.5.1	Sagkyndig brug af det semiautomatiske udskæringsværktøj	50
4.5.2	Brugermanual	51
4.5.3	Erfaringer fra MUDP-projektets udførte udskæringstests	52
4.6	Kvalitetskontrol	53
4.7	Transport	54
4.7.1	Løft, pakning og flytning	54
4.8	Opbevaring	57
4.8.1	Opbevaring på nedrivningspladsen - on-site	57
4.8.2	Opbevaring på nedrivningspladsen - off-site	57
5.	Design, produktion og performance	59
5.1	Et nyt design	59
5.1.1	Udvikling af et nyt design	59
5.1.2	Det valgte design	62
5.2	Montering	64
5.2.1	Løft og placering	64
5.2.2	Fastgørelse af element til mur	65
5.2.3	Fugning	66
5.3	Produktion	67
5.3.1	Stålmurkonsol	67
5.4	Dokumentation	68
5.4.1	Ydeevnedeklaration	68
5.4.2	Dokumentation for fremtidige genbrugspotentialer	68
5.5	Arkitektoniske muligheder	69
5.6	Klimapåvirkning og økonomiske analyser	71
5.6.1	Carbon Footprint Assessment	71
5.6.2	Anlægsomkostning	74
6.	Markeds- og skaleringspotentiale	78
6.1	Marked	78
6.1.1	Markedstilstand og baggrund	78
6.1.2	Markedsstørrelsen	80
6.1.2.1	Høstbar mur i Danmark	80
6.1.2.2	Bygningstyper	80
6.1.3	Kundesegment	82
6.1.3.1	Etablere "matchmaking"	82
6.1.3.2	Udbuddets betydning & bygherres indflydelse	83

6.1.3.3	Det ideelle kundescenarie	83
6.1.4	Anvendelsesmuligheder	83
6.1.5	Vurdering af markedspotentialet	83
6.2	Forretningsmodel og implementeringsstrategi	83
6.2.1	Værdiskabelse	83
6.2.2	Etablering af virksomhed	84
6.2.3	Kerneaktiviteter	84
6.2.4	Konkurrencemæssig fordel	85
6.2.5	Prissætning	86
6.2.6	Variable i prissætning	87
6.2.7	Mulige forretningsmodeller	87
6.2.8	Opsummeret økonomisk potentiale	87
6.2.9	Forretningsmodel	88
6.2.9.1	Skaleringspotentiale	88
6.2.10	Implementering	89
6.3	Miljømæssig indflydelse på branchen	89
7.	Konklusion	90
7.1	Konklusion	90
Bilag 1.	Alternativer til udskæringsmetode af murværk med cementmørtel	92
Bilag 1.1	Robotteknologi til fræsning af fuger	92
Bilag 1.2	Cut n move – Odico	93
Bilag 1.3	Husqvarna vægsav	93
Bilag 1.4	Iver entreprise – udskæring af beton	93
Bilag 1.5	Øvrige metoder	94
Bilag 2.	Krav og motivationer fra aktører	95
Bilag 3.	Beregningsværktøj	97
Bilag 3.1	Overblik af overordnede antagelser og specifikationer af systemet	97
Bilag 3.2	Overblik af estimeret tid brugt på hver proces aktivitet	98
Bilag 4.	Notat fra trækstyrketest 15.05.2023	99
Bilag 5.	Brugermanual	103
Bilag 6.	Erfaringer fra tests	107
Bilag 7.	Tests	108
Bilag 7.1	Testudskæringer værktøj 1.0	108
Bilag 7.2	Testudskæringer værktøj 2.0	110
Bilag 8.	Designvurdering	118
Bilag 9.	Arkitektoniske muligheder	119
Bilag 9.1	Facadeudtryk	119
Bilag 9.2	Hjørnesamlinger	120
Bilag 10.	Beregningsgrundlag klimapåvirkning	121
Bilag 10.1	Antagelser til carbon footprint analyse	121
Bilag 10.2	Mængdeskema	121
Bilag 10.3	Processer	122
Bilag 11.	Beregningsgrundlag anlægsomkostninger	123
Bilag 11.1	Overslag på baggrund af forsøg (Murkonsol)	123
Bilag 11.2	Overslag på optimeret proces (optimeret)	124
Bilag 12.	Pris per element	125

Forord

Projektet er udført af Lendager, IPU samt G. Tscherning A/S under Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP), som administreres af Miljøstyrelsen - Område Cirkulær Økonomi og Genanvendelse. Projektet er udført i perioden 1. januar 2020 til 31. december 2021 og blev forlænget med tre år, frem til 31. december 2024.

MUDP-projektet har titlen Automatisering af selektiv høstning og klargøring af byggematerialer til genbrug og upcycling.

Projektet undersøger muligheden for at udvikle nye, automatiserede teknikker og processer til høstning og klargøring af byggematerialer fra eksisterende byggeri til upcycling i nye byggeprojekter. Specifikt fokuseres der på automatiseringen af høstning af cementbundet murværk fra eksisterende bygninger i større elementer. Projektets formål er at vise nye veje til at sikre kvaliteten i cirkuleringen, forbedre arbejdsmiljøet under nedrivning og øge effektiviteten af høstningen, så upcyclede byggematerialer kan udbredes i byggebranchen.

Af rapporteringen er opbygget med et kapitel for hver af de fem projektrelaterede arbejdsopgaver. Disse beskrives i kapitel 2 til 6.

Tak til Logik & Co for at bidrage med viden om byggeteknik særligt i brugen af brugte elementer og materialer, samt realiseringen af demonstrationsmodeller og mock-ups til udstilling.

Tak til Hempcrete DK for at bidrage med viden om byggeteknikker med materialet hempcrete, samt realiseringen af mock-up til udstilling.

Tak til Jaap Aanhaanen fra Cowi at bidrage med viden og ingeniørbistand til udviklingen af projektets mock-up model.

Tak for Det Kongelige Akademi for muligheden af projektets udviklede mock-up modeller kunne indgå i udstillingen Planetary Boundaries - Rethinking Architecture and Design i perioden fra den 21. september 2023 til den 5. april 2024.

Projektgruppen har bestået af:

Jørn Kiesslinger, Lendager

Maya Færch, Lendager

Tim Tolman, Lendager

Liva Bjerg Linnert, Lendager

Frederik Høgdal, Lendager

Peter Torben Tang, IPU

Nikolas Aulin Paldan, IPU

Kristoffer Blæsbjerg, IPU

Rasmus Krag, G. Tscherning A/S

Jakob Orbesen, G. Tscherning A/S

1. Introduktion

Den danske byggebranche er storsynder når det kommer til CO₂-udledninger, energiforbrug og affaldsproduktion. Selvom der i de seneste år er kommet langt mere bevågenhed på branchens indflydelse og ansvar, mangler der fortsat løsninger til at indfri de ambitioner og mål der er sat i både Danmark og EU. Dette projekt har til formål at udvikle nye, automatiserede og optimerede processen for cirkulering af murværk som et skridt på vejen mod at gøre cirkulære løsninger i byggeri mere attraktive, og ultimativt kunne reducere branchens emissioner og ressourceforbrug.

1.1 Problemstilling

Der bliver hvert år produceret omkring 300 millioner mursten i Danmark hvilket svarer til omkring 4.750.000 m² murstenfacade om året¹. Samtidig ender årligt 225.000 ton murværk fra eksisterende bygninger, som nedrives i Danmark, som byggeaffald². Denne affaldsfraktion svarer til 112 millioner mursten eller over en tredjedel af mængden af nyproducerede mursten. Mursten har potentialet for et langt liv, eksempelvis findes eksisterende bygninger fra 1100-tallet, som er opført og fremstår i dag i deres oprindelige murværk. Mursten er dermed et eksemplarisk byggemateriale, hvis egenskaber og potentiale langt fra udnyttes optimalt.

225.000
ton mur

Ender hvert år som byggeaffald i Danmark

¹ Ifølge artikel i Bolius: [42 timer i op til 1.050 grader: Sådan bliver en mursten til](#)

² [Affaldsstatistik 2020](#)

Definition af begreber

Der arbejdes med forskellige niveauer af cirkulering når brugte ressourcer anvendes igen. I denne rapport anvendes begreberne genbrug, upcycling, genanvendelse og downcycling.

Genbrug: Enhver proces, hvor produkter eller komponenter, der ikke er affald, bruges igen til det formål, som de var udformet til.

Upcycling: Omdannelsen af restmaterialer eller affald til et nyt produkt, med en højere materiel og/eller økonomisk værdi. Det sker gennem oparbejdningsprocesser og materialets levetid forlænges typisk.

Genanvendelse: Enhver nyttiggørelsesoperation, hvor affaldsmaterialer omforarbejdes til produkter, materialer eller stoffer, hvad enten de bruges til det oprindelige formål eller til andre formål.³

Downcycling: Omdannelsen af restmaterialer eller affald til et produkt med anvendelse til lavere økonomisk og/eller materiel værdi.

Når bygninger rives ned, er det som regel forbundet med at funktionsdygtige materialer bliver til enten værdiløst eller bekosteligt byggeaffald. 225.000 tons murstensaffald bliver i bedste tilfælde downcyclet til vejfyld. Denne praksis medfører et værditab og behov for udvinding af nye ressourcer og miljøbelastende produktionsprocesser. Mursten består af ler, som udvindes i stort omfang i Danmark og derefter brændes til tegl. Brændingsprocessen kræver en stor mængde energi, hvor der hovedsageligt anvendes naturgas⁴ som energikilde. I Danmark ses et vist skift i produktionen af mursten, hvor naturgas udskiftes med biogas⁵. Denne omstilling kan reducere omfanget af drivhusgasudledningen i produktionen af nye mursten, men den direkte genbrug af mursten har et tydeligt lavere CO₂-aftryk og er fri for andre miljøbelastninger, som udvindingen af ler medfører. Historisk er mursten altid blevet genbrugt som ressource i byggeri, og der findes dermed flere hundrede års erfaring at støtte sig op ad. Forudsætningen for materialets cirkularitet er, at murværkets bindemiddel, dvs. murmørtlen, muliggør at stenene kan skilles fra hinanden. Traditionelt murværk, som er opført med kalkmørtel, har denne egenskab. Det øgede fokus på reduktionen af byggeriets klimabelastninger og ressourceforbrug har medført en ny efterspørgsel på genbrugte og genanvendte byggematerialer. De historiske erfaringer med at genbruge mursten, har givet grobund for de første cirkulære forretningsmodeller i den danske byggebranche med firmaer som Gamle Mursten som renser og gensælger brugte mursten. Genbrugte mursten er blevet et konkurrencedygtigt produkt i den

³ [Affaldsbekendtgørelsen](#)

⁴ Bolius artikel: [42 timer i op til 1.050 grader: Sådan bliver en mursten til](#)

⁵ Artikel i Dagens byggeri: [Vil producere mursten på biogas fra 2022](#)

danske byggesektor, som kan købes med både CE-mærkning og miljøvaredeklarationer på lige fod med nyproducerede mursten.⁶

Dog er det ikke alle mursten som kan genbruges. Siden 1960'erne er cementmørtel blevet indført i det byggede miljø, som et alternativ til kalkmørtel. Mængden af bygninger med cementmørtel er nu blevet normen, og har været det siden 1980'erne. Cementmørtel er stærk – stærkere end murstenene den binder sammen. Forsøger man at skille stenene ad, vil stenene gå i stykker som det første.⁷ Indtil for nylig, var det praktisk umuligt at genbruge mursten bundet sammen med cementmørtel. I forbindelse med byggeriet Ressourcerækkerne (færdigbygget i 2019) påviste Lendager og samarbejdspartnere en ny måde at upcycle mursten med cementmørtel mere direkte – ved at udskære dem i mindre felter, og efterfølgende sammensætte dem som en ny facade. På daværende tidspunkt foregik det ved at skære elementer ud med en diamantsav. Derved slipper man for adskillelsen af murstenene og at de går i stykker, mens man samtidig beholder den styrke og indlejrede CO₂, der ligger i cementmørtlen.

Processen i dag udgør udskæring og klargørelse af murstenselementerne i en lang række manuelle processer – udskæring, rensning, flytning, pakning, sammensætning – som alle gør materialerne dyrere og mere besværlige at håndtere. Processen for upcycling af mursten med cementmørtel er kompliceret at udføre i virkeligheden, og den er svær at gentage. For at forstå hvilket potentiale cirkulering af mursten har på samfundet, skal denne proces gøres lettere.

1.2 Formål

Dette projekt vil udvikle automatiserede og strømlinede løsninger for selektiv nedrivning og materialeklargøring, så der kan skabes smartere og billigere processer. Dette med ønske om at sikre et større udbud af brugte ressourcer til accelerering af cirkulær og bæredygtig vækst i byggeriet. Helt specifikt fokuseres på automatisering af høstning af murværk fra nedrivningsklare bygninger. Dette skal forbedre kvaliteten af cirkuleringen i den cirkulære nedtagning, give et bedre arbejdsmiljø under processen samt øge effektiviteten af høstningen, så cirkulære byggematerialer kan udbredes i hele branchen.

1.3 Værdi

Med automatiserede og standardiserede metoder til høstning og klargøring af genbrugsmaterialer kan udskårne murefelter gå i direkte konkurrence med nyudvundne materialer. Med tidligere innovationer har Lendager vist, at upcycledede byggematerialer kan konkurrere med byggematerialer baseret på nyudvundne materialer ift. Pris, kvalitet og æstetik⁸. Den centrale udfordring i forhold til skalering er nu at skabe en optimeret proces, et markedsmodent produkt og forsyningsikkerhed hvor interesserede byggematerialeproducenter, arkitekter, entreprenører og bygherrer kan bestille relativt standardiserede mål og kvaliteter. På den måde forventes det at kunne styrke forholdene for genbrugte eller upcycledede produkter, hvilket vil fordre konkurrenceevnen og øge viljen til handling.

1.4 Projektgruppen

Projektgruppen består af Lendager, G. Tscherning A/S og IPU. G. Tscherning er en af Danmarks førende entreprenørvirksomhed inden for anlæg og nedrivning og kan implementere høstning af materialerne så snart løsningen er udviklet. Dette er særligt fordi Lendager har interesse i at aftage materialerne, hvorfor der allerede ligger et kommercielt partnerskab.

⁶ Bl.a. hos [Gamle Mursten](#)

⁷ Artikel: [Cementmørtel forhindrer genbrug af mursten](#)

⁸ Se bl.a. tidligere MUDP-projekt: [Upcycle byggematerialer - produkt, proces & performance](#)

Lendager er med over 12 års erfaring ledende på markedet med upcycling og cirkulering af byggematerialer mht. høstning, klargøring, design, udvikling, produktion, afsætning og montering af upcycledede byggematerialer. IPU er eksperter i automatisering og konstruktion af mekaniske maskiner, og har bl.a. i et tidligere MUDP-projekt udviklet en automatisk maskine til sortering af plastaffald efter type og farve.

2. Vidensgrundlag

I dette kapitel vil vidensgrundlaget for dette MUDP-projekt præsenteres. Vidensgrundlaget bygger på et projekt udført af Lendager, færdigbygget i 2019, kaldet Ressourcerækkerne, som det første byggeri der har implementeret udskårne murfelter i facaden. Erfaringerne fra Ressourcerækkerne inddeles i fire punkter, hhv. udskæring, proces, design af den nye brug, og skalering, og danner udgangspunkt for den videre udvikling og retning for dette projekt. Efterfølgende opsummeres dette grundlag som potentialer og barrierer, der resulterer i målet for projektet.

2.1 Introduktion til Ressourcerækkerne

Ressourcerækkerne er et boligbyggeri i København, Ørestad, bestående af 29 rækkehuse og 63 lejligheder. I alt 9.148 m² boliger der delvist er bygget med upcycledede byggematerialer i form af lokalt byggeaffald bestående af mursten og træ. Byggeriet stod færdigt i 2019.

Til projektet Ressourcerækkerne blev der udviklet en innovativ proces, der gør det muligt at anvende felter af mursten med cementmørtel direkte i nye bygninger. Udgangspunktet for opførelsen af facaden var en fokuseret indsats for at identificere affaldskilder. Gennem denne proces blev fire bygninger identificeret som donorer af mursten: to tidligere bryggerbygninger i Carlsberg Byen (Stødpuden og Matrix-bygningen) og to skoler i Aarhus.



Billede 2.1

Ressourcerækkerne bygget i 2019 i Ørestaden.

Det endelige produkt bestod af et lejlighedsbyggeri med en facade bygget af genbrugsmurstenselementer og genbrugstræ. Dette blev muliggjort gennem en innovativ udskæring, nedrivnings-, design og implementeringsproces. Selvom projektet overkom en masse udfordringer, er der fortsat en række optimeringspotentialer, herunder forretningsmodel, skalerbarheden i proces, samt designet, der bør arbejdes videre med for at kunne opskalere cirkuleringen af murstenselementer.

2.1.1 Udskæringsgrundlag

Da det var første gang, at nogen prøvede at upcycle mursten med cementmørtel, skulle høstningsprocessen udvikles fra bunden. Her udviklede Lendager i samarbejde med en diamantskærer de overordnede greb til udskæring af mursten i mindre felter. På Billede 2.2 ses værktøjet der blev brugt til udskæringen, som demonstrerer at det var muligt at foretage manuel udskæring af muren. Desuden blev der udviklet en løfteramme som sikrede, at elementerne ikke vil falde ned på udskæreren. Grundkonceptet for udskæringsteknologien bestod dermed af en manuel sav og en mekanisme til at klemme elementerne sammen og transportere dem ned. Dette koncept løste en masse komplikationer, blandt andet at sikre murstensfelterne ikke blev beskadiget under udskæringen, og at de dermed kunne løftes direkte til pakning. Det krævede to personer at fuldføre til denne proces – en udskærer og en til at styre kranen med løfteværktøjet.



Billede 2.2

Billeder fra udskæring. Til venstre ses den manuelle udskæringsproces. I midten ses udskæringsplatformen. Til højre ses løfteværktøjet, som blev brugt til at flytte elementerne fra udskæring til pakning.

Med dette set-up kunne to elementer udskæres i timen. Selvom denne proces var vellykket udført, opstod der også komplikationer undervejs. Heriblandt afvigelser på elementerne størrelse, hvilket senere skulle tilpasses i designet hvilket var tidskrævende. Der er siden identificeret et behov for at optimere tidsforbruget i skæringsprocessen, og forbedre arbejdsforholdene.

Siden Ressourcerækkerne er der identificeret andre muligheder for udskæring af mursten med cementmørtel. For yderligere detaljer, se Bilag 1. Ingen af de fundne muligheder løser dog problemerne med udskæringen tilfredsstillende.

2.1.2 Procesgrundlag

Høstningsprocessen bestod i hovedtræk af klargøring af muren, udskæring, pakning og afsending af elementerne til produktion.

Klargøringen bestod i at undersøge om muren var passende til formålet, ved at teste om murværket var opbygget med cementmørtel ved hjælp af en skruetrækker. Desuden skulle mur-

krone og murbindere fjernes ved udskæring. Den efterfølgende udskæring skete på en platform, hvorfra en person udskar murelementerne. På platformen blev murelementerne transporteret af kranføreren til en palle på platformen, hvor udskæreren pakkede elementet på pallen (se Billede 2.3).



Billede 2.3

Illustrerer et overblik af udskæringsprocessen. Bemærk at der er pakning af murelementer på platformen samt pladsbehovet ved brug af specifik platform og kran.

Pakningen af murelementerne blev gjort på specialtilpassede europaller, som muliggjorde, at der kunne transporteres fire murelementer på hver palle. Disse specialdesignede paller skulle først bygges, og herefter blev murelementerne hængt fast til dem med stropper på platformen. Disse paller blev derefter transporteret ned på jorden via kran. Afslutningsvist blev pallerne pakket i en lastvogn med gammel isolering imellem for at beskytte murelementerne under transporten. En lastvogn endte med at kunne transportere 32 paller, som derfra blev sendt videre til produktion i Thisted. I Thisted blev elementerne samlet med beton til fulde facadeelementer, og blev transporteret tilbage til Ørestaden og monteret på byggeriet – se det færdige element på Billede 2.4.



Billede 2.4

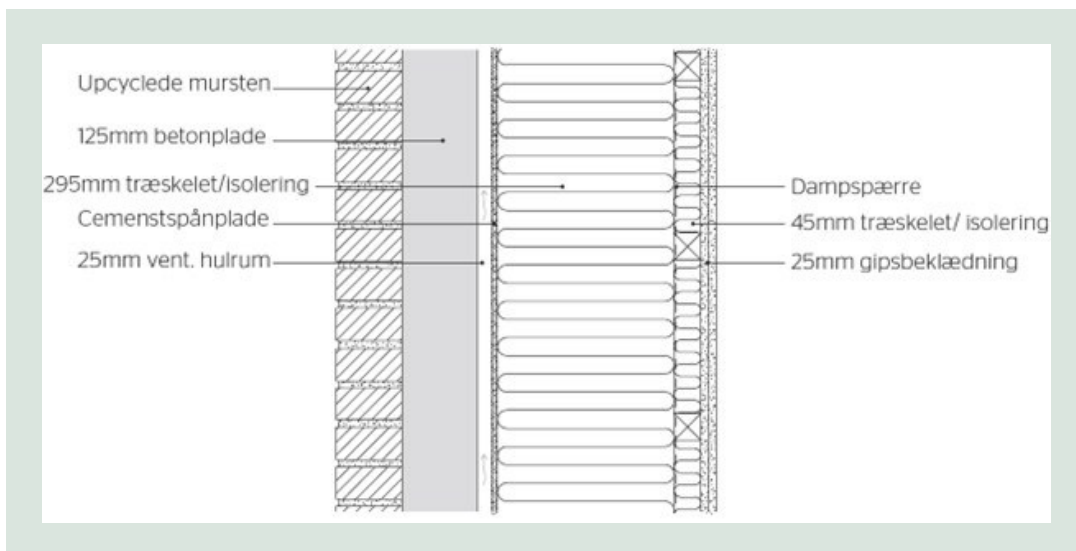
Færdigt element klar til installation.

Denne proces var relativt kompleks og ledte til en række erfaringer som har været grundlag for dette projekt. De centrale udfordringer der er identificeret til videre udvikling omfatter:

- Det var komplekst at administrere og håndtere pladsen til nedrivning, samt den efterfølgende logistik. Da det var første gang at denne type af projekt blev udført, var det uklart hvordan det kunne gøres optimalt. Processen bør derfor optimeres og standardiseres til eftertiden.
- At teste om murværk er egnet til udskæring var baseret på sparsom erfaring. Dette medførte uklare krav til ydeevnen ift. muren både før og efter nedtagning. Dette havde desuden konsekvenser for designet og elementerne blev sammenstøbt med beton for at kompensere for disse usikkerheder hvilket repræsenterer et forbedringspotentiale.

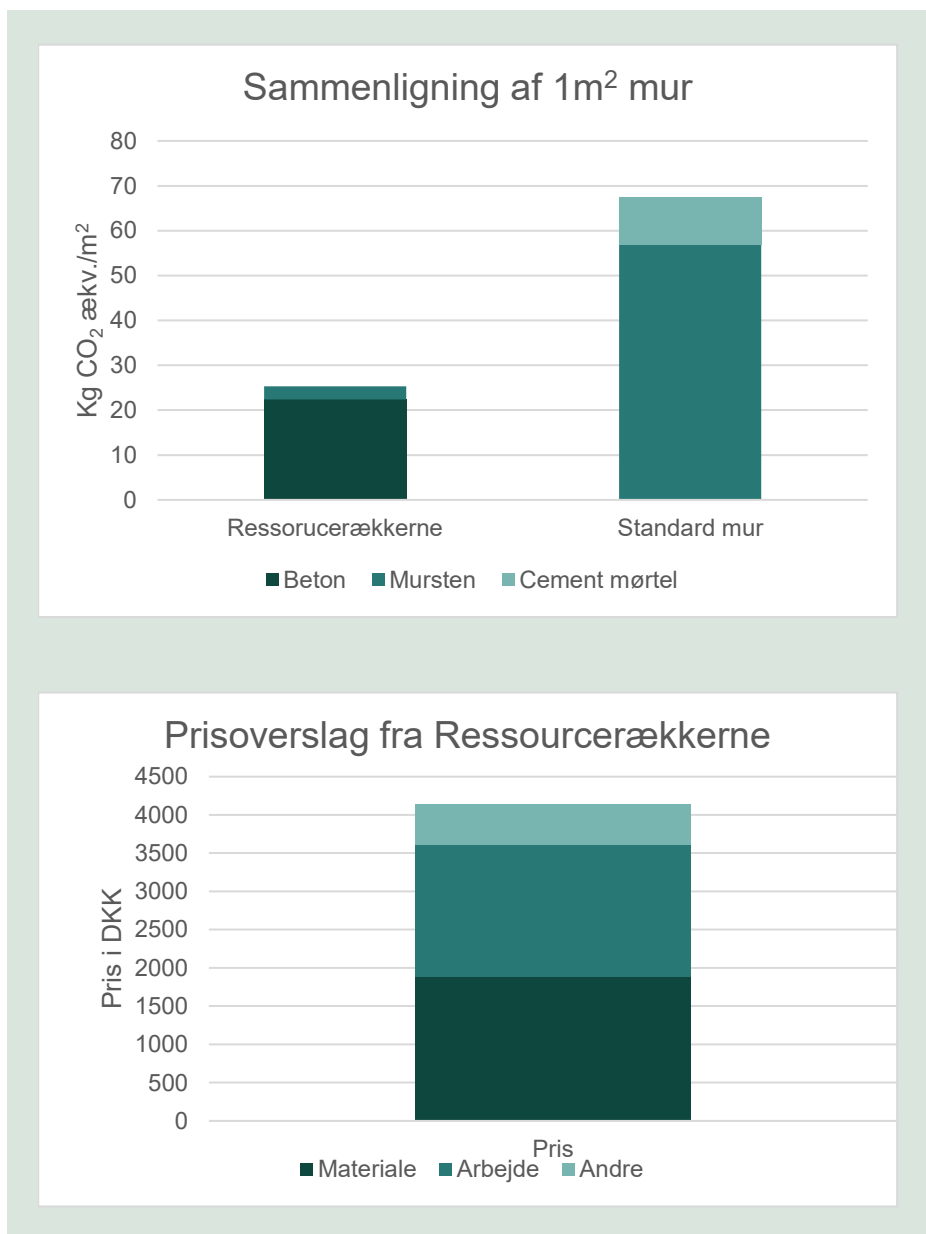
2.1.3 Designgrundlag

Elementerne blev støbt sammen med beton i et mønster, der skabte et unikt æstetisk udtryk på en størrelse af 2,5 m² til 15 m². Murstensvæggen til Ressourcerækkerne, som blev opført i Ørestaden, bestod af en præfabrikeret frontmur med genbrugte mursten og beton, som blev monteret med stålkonsoller på et træskelet med isolering. Lasten på denne præfabrikerede frontmur er selvbåren.



FIGUR 2.1. Opbygning af element.

Denne opbygning løste en hovedproblematik, nemlig usikkerheden af styrken i elementerne. Murstenselementerne var ikke strukturelle elementer, hvilket reducerede kravene til produktet og dermed gjorde det muligt at producere med lav risiko for fejl. Dog kom dette design med en række udfordringer, herunder en højere pris pr. kvadratmeter sammenlignet med en ydermur af nyudvundne materialer, samt en miljøbelastning fra brugen af beton i elementproduktionen og transport til produktionsfaciliteterne som ønskes reduceret, se FIGUR 2.2.



FIGUR 2.2. Øverst ses en simplificeret analyse af CO₂ fra ressourcerækkerne og en standard mur som benchmark. Brugte mursten og cementmørtel er regnet med værdien 0. Nederst ses et prisoverslag som opført ved Ressorcerækkerne, hvor materiale indebærer omkostninger til materialer og forsyning, arbejde indebærer lønomkostninger til udskæring og administration, og andre inkluderer transport, opbevaring og afskrivninger på maskiner. Begge analyser tager udelukkende udgangspunkt i ydermuren.

Ved at producere komponenterne som betonelementer, er en fremtidig cirkulering af murelementerne blevet kompliceret. Det vurderes at være muligt at genbrug eller upcycle betonelementerne på ny, men det større format og komponent begrænser fremtidige anvendelser. Tilpasning af elementerne kræver specifikke analyser af hver komponent og brugen af armeret beton giver elementerne en levetid der er kortere end murstenene selv. Ressorcerækkerne er naturligvis skabt med det formål at opnå så lang holdbarhed som muligt, hvor der er arbejdet med et særligt æstetisk udtryk som skal minimere risikoen for fremtidig nedrivning. Dette kan dog ikke garanteres for hverken Ressorcerækkerne eller fremtidens byggeri og der bør derfor etableres et optimeret design med fokus på potentialet for fremtidig cirkulering. Det skal dog

ikke underkende værdien af at være lykkedes med at indarbejde brugte ressourcer, som ellers ville være endt som affald eller til downcycling, i Ressourcerækkerne som den første iteration og skridt på vejen mod at kunne anvende brugte murstenselementer. Der er dog plads til forbedringer ift. at sikre, at elementerne kan genbruges eller upcycles i eftertiden.



Billede 2.5

Element klargøres til installation i bygning. Elementerne er arrangeret i et korrekt mønster, og bliver sammensat med beton og stål-gitter samt murbindere.

De centrale forbedringspunkter er dermed pris, miljø og cirkularitet.

2.1.4 Skaleringsgrundlag

Skaleringen af murstenselementerne var ikke et indtænkt parameter i arbejdet med murfelter på Ressourcerækkerne. Dog er det siden blot blevet mere tydeligt, at forretningspotentialer er stort for en intervention som denne. Da der hvert år smides 112 millioner mursten ud, samtidigt med at behovet øges for nye måder at bygge på, vurderes det at murstenselementerne har et stort potentiale. Derfor skal det undersøges, hvilket forretningspotentiale murstenselementerne har, for at afdække mulighederne for skalering af dette cirkulære.

Fra projektet på Ressourcerækkerne blev det klart, at det er nødvendigt at gentænke hvilken ejerskabsmodel der er mest aktuel og meningsfuld, samt hvordan en virksomhed vil kunne etablere sig for at indtage dette marked.

Optimeringspotentialer for skalering kan derfor opsummeres til:

Udskæring: Pris, hastighed, forbedret arbejdsmiljø

Proces: Komplexitetsreduktion, beslutningshjælp

Design: Pris, miljø, fremtidig cirkularitet

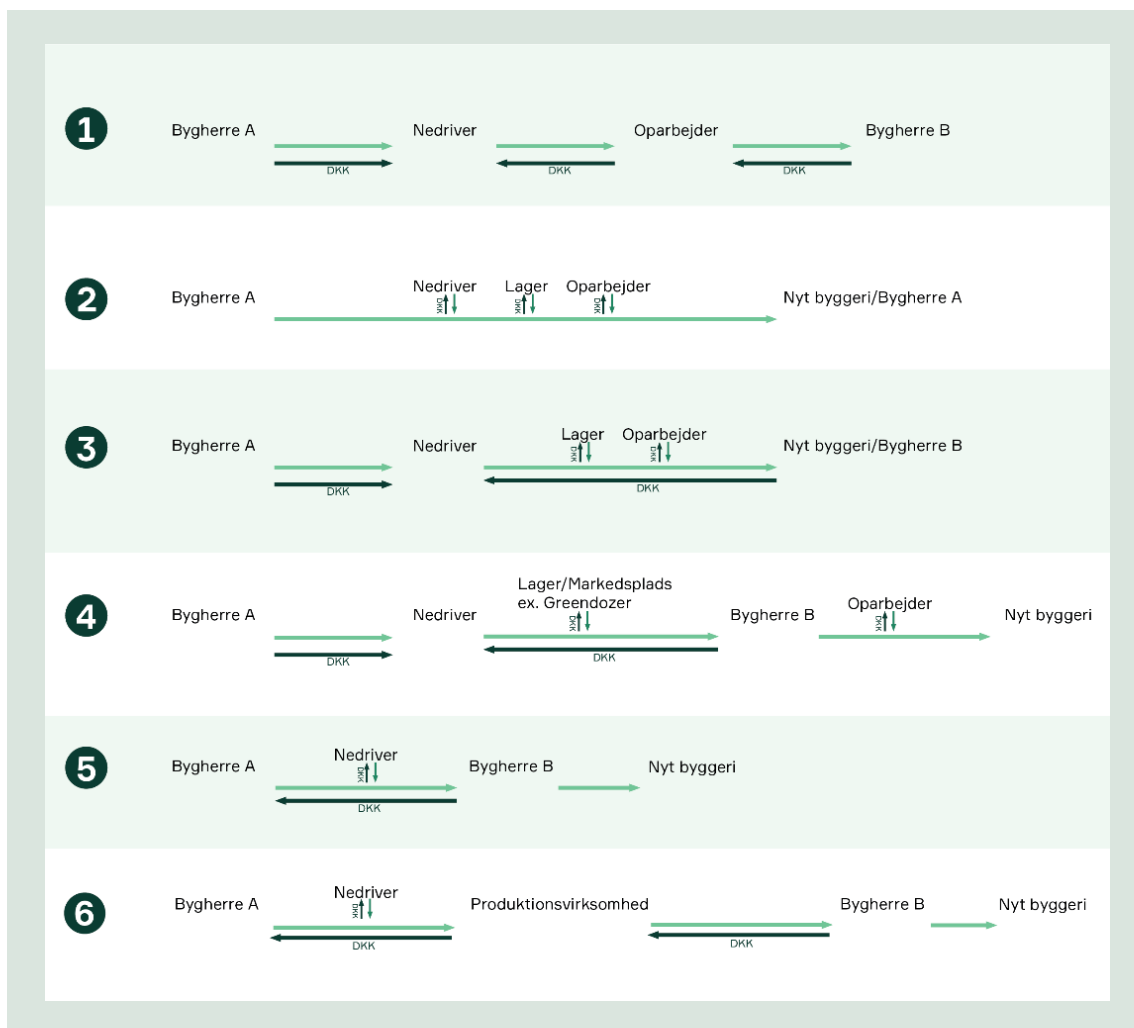
Skalering: Find passende forretningsmodel.

2.2 Potentialer og barrierer

Dette afsnit har til formål at afdække potentialet og barriererne som produktet murelementerne kan stå overfor samt danne ramme for den senere analyse og give perspektiv til mulighederne og anvendelsen.

2.2.1 Aftagerscenarier

På murelementernes rejse skifter de ejer og hænder flere gange, og der er således en række forskellige aftagermodeller, som er relevante at forholde sig til. Følgende scenarier danner udgangspunkt for at afsøge mulighederne for potentielle systemer og aftagere af murelementerne, og disse er baseret på workshops med diverse aktører. Som der fremgår i de fem forskellige aftagerscenarier på FIGUR 2.3, varierer hvert scenarie ift. antal af involverede aktører, deres rolle ift. aktiviteter og ejerskabsforholdet ift. materialet samt logistiske og tidsmæssige forhold. Dette er afgørende for den senere kortlægning af de forskellige forretningsmæssige muligheder og potentialer for et genbrugsprodukt som udskårne teglelementer i kapitel 6.



FIGUR 2.3. De 6 aftager-scenarier.

Scenarie 1: Bygherre A har ikke selv et fremtidigt byggeri, hvor det skal bruges. Derimod skifter det ejerskab fra bygherre A til nedriver, derefter til oparbejder (producent), og endeligt til Bygherre B, som dermed har et projekt. Her er det vigtigt at understrege, at oparbejderen (producenten) kan være nødsaget til at tage garantien for produktet.

Scenarie 2: Bygherre A er interesseret i at genbruge materialer fra stedet, og har enten allerede et projekt der kan aftage elementerne eller ønsker at opbevare materialet til senere brug, og bygherre A beholder dermed materialerne selv.

Scenarie 3: Bygherre A har fået en forespørgsel fra Bygherre B, der gerne vil bruge dem i sit projekt.

Scenarie 4: Bygherre A's nedriver får en forespørgsel fra Bygherre B med et projekt. Nedriveren sælger elementerne til Bygherre B via auktion, markedspads, byggemarkeder eller lignende.

Scenarie 5: Her har en nedriver fået en direkte forespørgsel fra Bygherre B, og nedriver sælger direkte til Bygherre B.

Scenarie 6: Her overtager en ekstern oparbejder (producent) ansvaret og "produktionen" af murelementet fra enten nedriver eller Bygherre A, og sælger efterfølgende videre til en Bygherre B.

2.2.2 Behov i værdikæden

For at identificere behov i værdikæden er der udført workshops og interviews med relevante aktører i branchen. Hele listen over motivation og behov kan ses i Bilag 2. Nedenfor er de vigtigste behov opsummeret:

- **Bygherre A:** Viden om fremtidige ressourcestrømme og tilgængelige murelementer
- **Nedriver:** Økonomisk sikkerhed ved ydelsesbeskrivelse, garanti af ordentlige arbejdsforhold, og klare udfaldskrav.
- **Oparbejder/producent:** En større mængde elementer, samt viden om udfaldskrav der sikrer et godt produkt.
- **Bygherre B:** Dokumentationskrav og garanti, samt sikre en god økonomisk case.

Disse behov er universelle på tværs af projekter. Dog vil inkorporeringen af flere aktører i værdikæden komplicere processen, og dermed anbefales scenarie 2, hvor bygherren beholder murelementerne selv, og kan fordele omkostningerne på tværs af sin portefølje. Dette scenarie vil belyses i kapitel 6, hvor skalerings- og forretningspotentialer udforskes. Dog vil rapporten også behandle de andre behov igennem de forskellige afsnit, da det vurderes at der er mulighed for at de andre scenarier også kan blive relevante i fremtiden.

Disse behov kommer naturligvis ikke kun med barrierer, men også med muligheder. Nedenfor i TABEL 2.1 ses en konkretisering af potentielle muligheder og barrierer for indarbejdning af murfelter i byggeriet baseret på de identificerede behov.

TABEL 2.1. Muligheder og barrierer.

Muligheder	Barrierer
Bygge med teglfacade uden stort ressourcespild	Mange variable og usikkerheder ift. murværket gør det svært at lave en standardiseret proces
Bevare og bruge materialer på højere eller samme trin i hierarkiet for forskellige typer af cirkulering	Forskelligartethed i murstenselementernes egen-skaber udfordrer hvordan der kan bygges med dem
Kan være med til ændring af nedrivers rolle, mind-set og forretningsmodel	At skifte hænder og lokation har en negativ effekt ift. økonomi, funktion og CO ₂ -udledning
Opfylde ønsker om arkitektonisk kvalitet og bæredygtighed	Uklarhed om hvor meget værdi der skabes ift. effekten af cirkuleringen
Cirkulær økonomi i praksis ved at udvikle løsninger, der kan adskilles igen efter brug (design til adskillelse)	Jo flere steps der er i værdikæden, des mere belastet (både økonomisk og miljømæssigt) vil processen blive.
Hvis transformation ikke lykkes, kan ressourcerne prioriteres og anvendes on-site	Forsyningssikkerhed

Afmystificere de 'alternative' byggematerialer gennem cases, guidelines og offentlige investeringer

2.3 Mål for projekt

Ud fra dette vidensgrundlag samt identificerede barrierer og potentialer er et hovedspørgsmål blevet defineret:

Kan automatisering af udskæringsprocessen af murfelter og et optimeret design skabe grund for en økonomisk og miljømæssig bæredygtig forretning for udskårne murfelter?

3. Teknisk udvikling

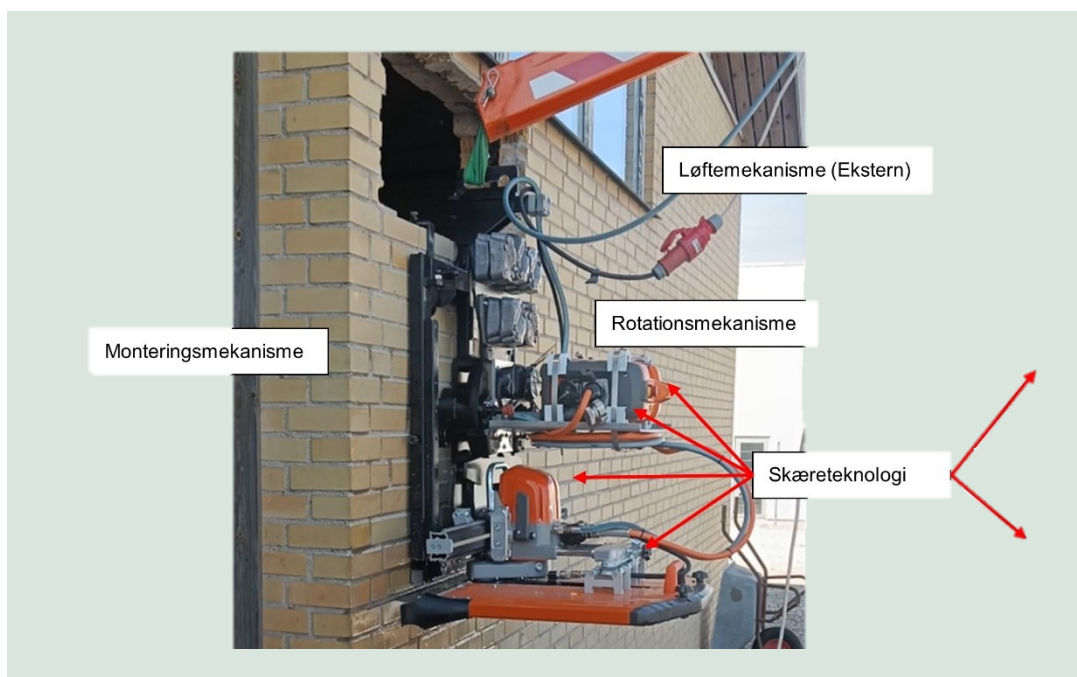
Dette kapitel giver en omfattende gennemgang af den tekniske udvikling i projektet, med fokus på det udviklede værktøj, refereret til som murhøsteren, udviklingsprocessens afgørende elementer, høstningsproceduren og generel anvendelse af værktøjet. Der præsenteres også projekteringssoftware til at specificere den optimale nedrivningsplan, og en dybdegående analyse af de mest betydningsfulde systemspecifikationer set ud fra et økonomisk perspektiv med kvantitative beregninger. Kapitlet afsluttes med anbefalinger til yderligere arbejde og udvikling inden for dette teknologiske domæne.

3.1 Murhøsterens design og udvikling

Dette afsnit beskrives værktøjets funktionelle opbygning og giver en kort redegørelse af udviklingsprocessen med de mest afgørende erfaringer, som har ført til udviklingen af det endelige værktøj.

3.1.1 Design og afgørende mekanismer

Murhøsteren er et semi-automatiseret værktøj, som kan skære kvadratiske murblokke på 940 mm. x 940 mm. af nedrivningsklare bygninger via et horisontalt- samt to vertikale snit. Værktøjet består grundlæggende af en skæreteknologi, en rotationsmekanisme og en monteringsmekanisme. Desuden har murhøsteren brug for en ekstern løftmekanisme i form af en kran eller lignende, til at løfte værktøjet og murværket ned (se FIGUR 3.2).



FIGUR 3.2. Illustration af de primære mekanismer for "murhøsteren".

Skæreteknologi. Den valgte skæreteknologi er Husqvarna WS 220, som er en standard elektrisk vægskæringsystem. Saven er designet til at skære i beton, murværk og andre byggematerialer. Klingen er fjernbetjent og kan via en lineær føring og rotationsarm bevæge sig henholdsvis fra side til side samt ud og ind. Den valgte model kan skære i en dybde på 395 mm. og kræver en strømtilførsel samt vandtilførsel for nedkøling.

Rotationsmekanisme. For at tillade skæring af de 2 vertikale snit er skæreteknologien monteret på et snekkegear (rotationsmekanismen), som kan dreje klingen 90° i positiv og negativ retning. Rotationsmekanismen er monteret på skærerammen, hvor også skæreteknologien er monteret. Snekkegearet drejes via en håndholdt elektronisk vinkel-boremaskine. Startpunktet og de 2 vertikale snit defineres af 3 mekaniske stop, hvilket gør det hurtigt at rotere saven til den passende vinkel.

Monteringsmekanisme. Monteringsmekanismen, også kaldet løfterammen, fastgøres til murværket via 4 skruer, hvorefter skærerammen kan monteres på og fastspændes til løfterammen. Når murblokken er skåret fri, bliver den via løfterammen løftet ned på en transportpalle, hvorefter murværket kan transporteres til opbevaring eller klargøring.

3.1.2 Udviklingsproces af værktøjet

Forud for værktøjet præsenteret i afsnittet ovenfor blev en prototype udviklet og afprøvet igennem fieldtests. Udviklingen af prototypen samt erfaringerne fra de udførte fieldtests er præsenteret i dette afsnit.

3.1.2.1 Udvikling af prototype 1

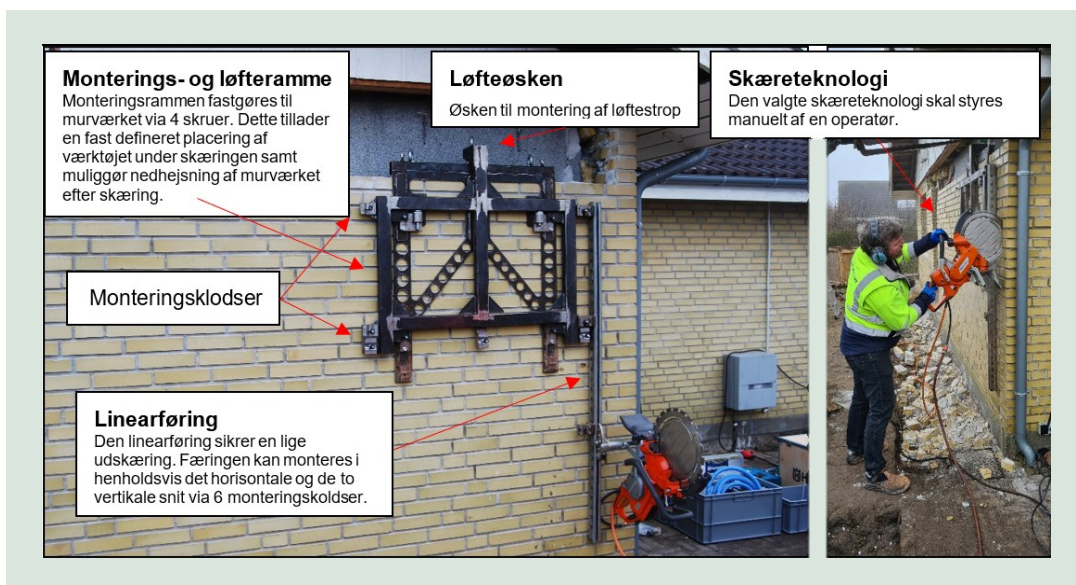
For at sætte en realistisk afgrænsning for udviklingen, blev det defineret at værktøjet skal kunne høste murelementer fra nedrivningsklare bygninger. Dvs. at nedrivning af tagkonstruktion og afmontering af murkrone samt murbindere imellem ydermur og indermur er udenfor rammen af produktudviklingen.

Udforskningen af løsningsrummet indebar en bred brainstormingsproces med repræsentanter fra Lendager, Tscherning og IPU, hvor forskellige koncepter og teknologier blev taget i betragtning. Forskellige niveauer af automatisering blev overvejet igennem løsningsrummets kortlægning, hvor blandt andet manuelle-, semi-automatiserede- og fuldautomatiske løsninger blev overvejet. Der blev udforsket en række skæreteknologier - fra mindre håndholdte enheder til større fastmonterede systemer. Endeligt blev forskellige monteringsmekanismer udforsket, som både skulle sikre en fast defineret placering af værktøjet under skæring, samt tillade nedhejsning af de afskårne murelementer.

Igennem en iterativ proces blev det besluttet at prototype 1 skulle være et mere eller mindre manuelt værktøj. Dette tillod en forholdsvis hurtig opbygning af et Minimum Viable Product som kunne teste grundelementerne af værktøjets design. Værktøjet bestod primært af en manuel skæreteknologi, en monteringsramme/løfteramme og en lineær føring, se FIGUR 3.2.

3.1.2.1.1 Læring fra fieldtest

Fieldtests af prototypen bekræftede at det overordnede koncept var funktionelt. Monteringsrammen sikrede en solid montering af værktøjet til murværket under skæring, og gjorde det samtidigt muligt at løfte murværket sikkert ned på jorden efter udskæring. Dog blev det opdaget at løfteøskens placering i forhold til massemidtpunktet var uhensigtsmæssig. Løfterammen var ikke monteret i løfterammens og murværkets massemidtpunkt, hvilket resulterer i at murværket læner sig forover hvilket skaber spændinger i murværket under udskæring. Fieldtesten afslørede hvor porøs en udskåret murblok er, hvor især hjørnerne var tilbøjelige til at knække af. Denne observation peger på behovet for at finjustere og muligvis anvende teknikker, der mindsker risikoen for skader på murværket (se FIGUR 3.3 t.h.).



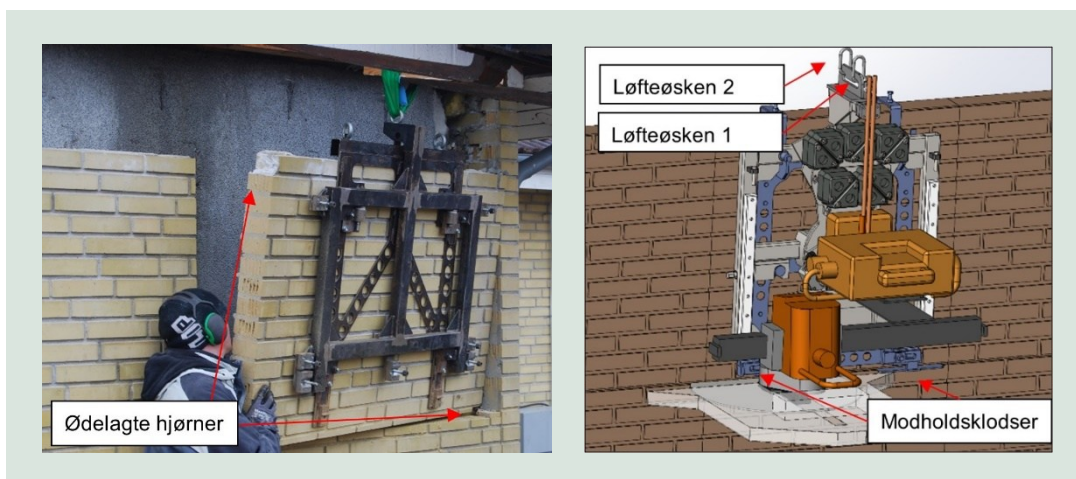
FIGUR 3.2. Visualisering af udviklede prototype for murhøsteren (Prototype 1).

3.1.2.2 Udvikling af prototype 2

Målet for den videre udvikling var:

1. At automatisere dele af processen, så arbejdsmanden ikke manuelt skal håndtere skæreværktøjet under skæringen af murelementerne
2. At finjustere værktøjet så det i højere grad tillader beskyttelse af hjørnerne på murværket.

Den håndholdte sav blev udskiftet med en Husqvarna WS 220 skæreteknologi, som kan fjernstyres via en fjernbetjening. For at sikre en skånsom montering af skærerammen og nedhejsning af murværket, blev det bestemt at værktøjet skal have 2 løfteøskener. Den ene placeret i skærerammens massemidtpunkt således værktøjet let kan monteres på løfterammen (Løfteøsken 1 i FIGUR 3.3 t.h.). Den anden placeret i skærerammen, løfterammen og murværkets massemidtpunkt, således at murværket hænger lodret når det er skåret frit (Løfteøsken 2 i FIGUR 3.3 t.h.). Dette mindsker de interne spændinger mellem det udskårne murelement og det resterende murværk under udskæring hvilket forhindrer hjørnerne i at knække af.



FIGUR 3.3. Visualisering af murblokkens skæve nedhejsning grundet løftning udenfor massemidtpunkt (t.v.), og visualisering af modholdsklodser, som giver støtte til murværket under skæring og nedhejsning (t.h.)

For at give murværket styrke under nedskæring og nedhejsning er 2 modholdsklodser monteret på skærerammen, som presser murværket sammen under nedhejsning.

Når murværket nedskæres, er det essentielt at kranen løfter med omkring 400 kilo, som er den samlede vægt af murværket, løfterammen og skærerammen. Løfter kranen med mere eller mindre vil det give interne spændinger mellem det afskårne murelement og resterende murværk, som vil øge risikoen for at murværkets hjørner vil knække før de bliver skåret helt fri (se FIGUR 3.3 t.v.).

3.2 Procesbeskrivelse for høstning af murelementer

Dette afsnit vil redegøre for processekvensen for høstning af en vertikal stribe af murelementer. Høsteprocessen består af 9 trin, som optimalt set skal udføres af to personer, da to personer vil kunne drive processen effektivt uden de behøver at vente på hinanden. Dette kræver dog at arbejderne, foruden skæreramme med saveenhed, har to sæt løfterammer med klør, som beskrevet i sekvensanalysen herunder.

3.2.1 Klargøring af murkrone

- Murkronen fjernes manuelt (se FIGUR 3.4).
- De øverste 400 mm. (eller mere) af muren skal være frit, så udstyret kan løftes på plads og så det er muligt at komme til at fjerne murbinderne (se næste afsnit).



FIGUR 3.3. Illustration af klargøring af murkrone.

3.2.2 Frigørelse af murbindere

- Murbindere frigøres manuelt og isolering fjernes og bortskaffes hvis nødvendigt (se Billede 3.1). Dette skal dobbelttjekkes, da det er nemt at misse én. Desuden bør murbinderne klippes så tæt på muren som muligt.

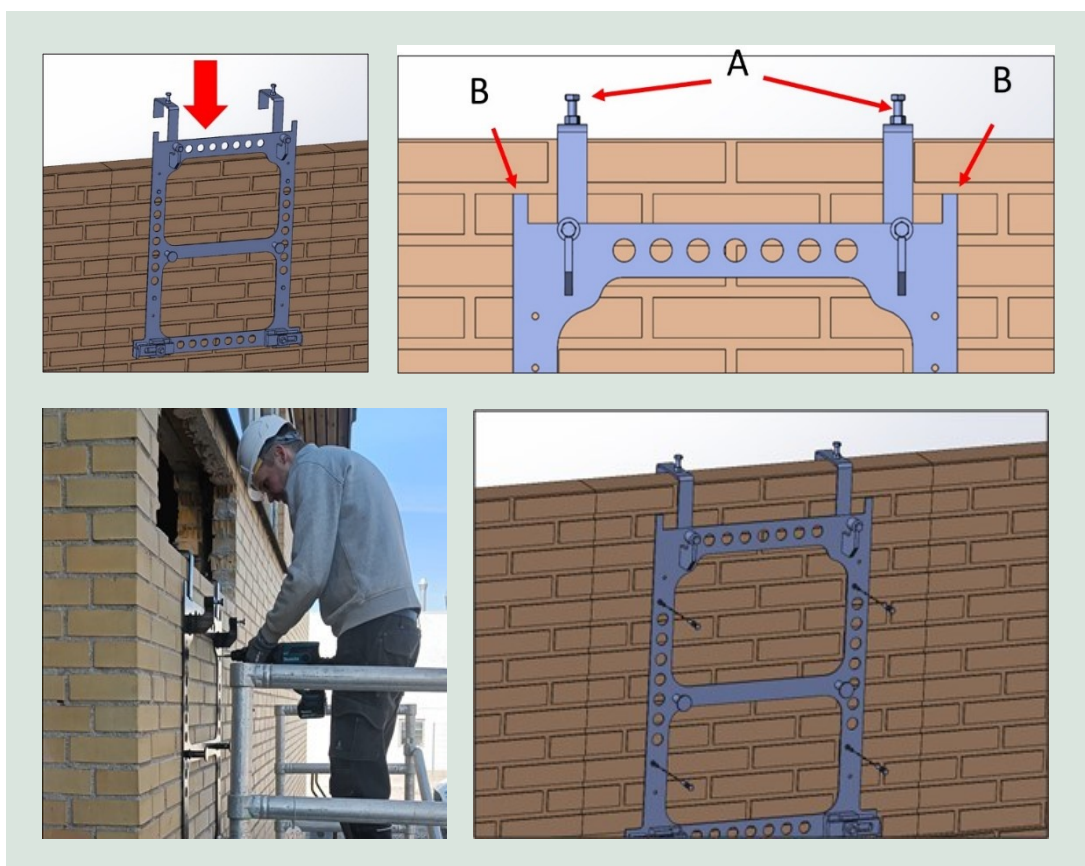


Billede 3.1

Illustration af frigørelse af murbindere mellem ydermuren og bagmuren.

3.2.3 Positionering og fastgørelse af en løfteramme på murværket

- Én løfteramme løftes manuelt på plads på muren (se FIGUR 3.5).
- De to stilleskruer (markeret med A på FIGUR 3.5) benyttes til at justere løfterammens vertikale position, ved at oprette de to fingre på rammen, med undersiden af den øverste mørtelfuge (B).
- Hvis der allerede er skåret murelementer ud ved siden af det aktuelle murelement, så positioneres løfterammen horisontalt således at den horisontale afstand til det eksisterende snit matcher den ønskede bredde af murelementet.
- Ellers positioneres løfterammen i henhold til skæreplanen.
- Løfterammen fastgøres ved at der bores minimum 4 stk. $\varnothing 6$ mm. huller i murstenene ved brug af fire af hullerne i løfterammen (se FIGUR 3.5).
- I de borede huller monteres 7,5 x 80 ESSVE HCS-HF betonskruer ved brug af maksimum 15 Nm. Der må ikke benyttes slag-nøgle, men gerne bore/skruemaskine med slagfunktion (se FIGUR 3.5).

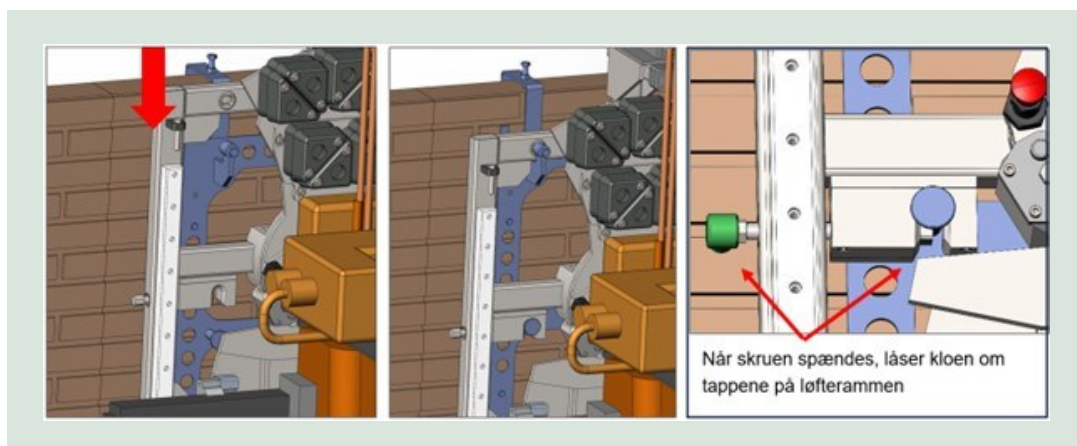


FIGUR 3.4. Øverst til venstre (3.5.a) ses illustration af manuel placering af løfterammen. Øverst til højre (3.5.b), ses justeringsmekanisme som sikrer en kvadratisk udskæring. Nederst til højre (3.5.c), ses boring af minimum 4 stk. $\varnothing 6$ mm. huller. Nederst til venstre (3.5.d), ses montering af 7.5x80 ESSVE HCS-HF betonskruer.

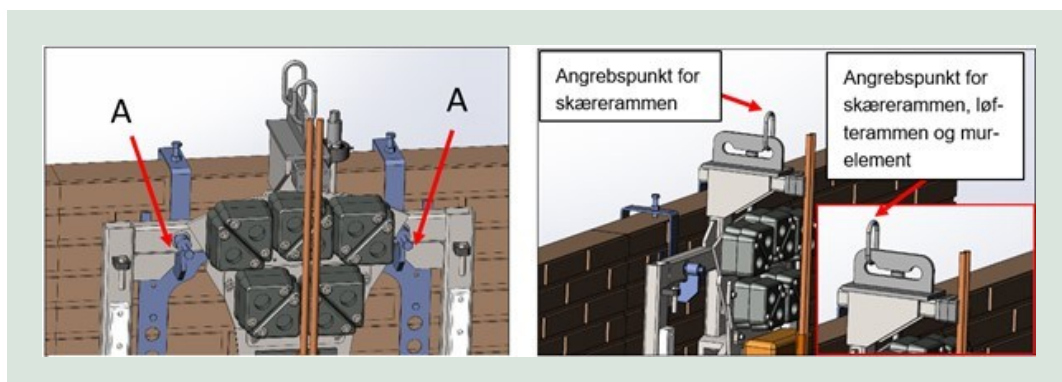
3.2.4 Fastgørelse af skæreramme til løfteramme

- Skærerammen nedsænkes over de to tappe på løfterammen således at skærerammen hviler på oversiden af tappene (se FIGUR 3.6).
- De to fastgørelsesklør spændes, hvorved skærerammen låses til løfterammen (se FIGUR 3.6).
- De to M12 fastholdeskruer (A på FIGUR 3.7) på den øvre del af løfterammen skrues i bund i kaviteten på skærerammen (se FIGUR 3.7).
- Herved er skærerammen positivt mekanisk låst til løfterammen i fire punkter.

- e. Angrebspunktet for løft flyttes til det inderste punkt, og der løftes med ca. 400 kg (se FIGUR 3.7).
- f. Der tilsluttes el og kølevand til saven.



FIGUR 3.5. Til venstre ses en illustration af skærerammen der nedsænkes på løfterammen. I midten ses hvordan skærerammen hviler på oversiden af tappene. Til højre ses hvordan fastgørelsesklørene spændes hvorved skærerammen låses til løfterammen.



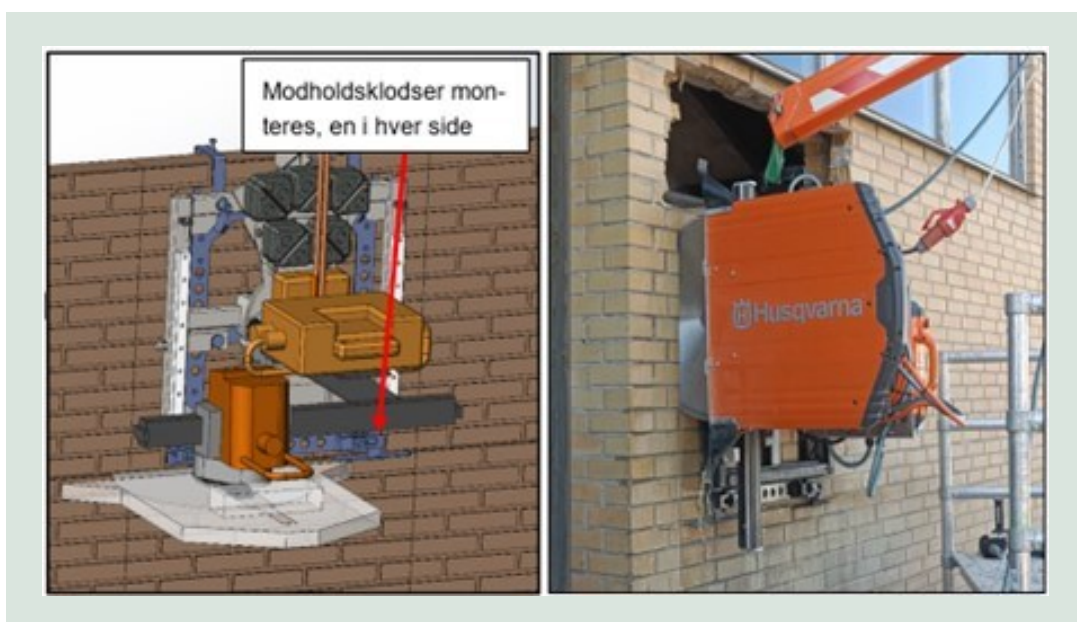
FIGUR 3.6. Til venstre er illustreret de to M12 skruer som skal skrues i bund for mekanisk at låse skærerammen til løfterammen. Til højre ses de to angrebspunkter for løft.

3.2.5 Udskæring af et murelement

- a. Den horisontale position af saven sikres ved at én af de to fjederbelastede låsetappe aktiveres og herved sikres den horisontale opretning af snittet (se FIGUR 3.8).
- b. Derefter spændes de to bremsesko, hvorved føringen af saven fastlåses til skærerammen (se FIGUR 3.8).
- c. Først saves det horisontale snit og saven køres tilbage til centrum af føringen (se FIGUR 3.8).
- d. Dernæst monteres de to modholdsklodser i det horisontale spor og skrueerne spændes (se FIGUR 3.9).
- e. Dernæst saves enten ét eller to vertikale snit, alt efter om der er tale om opstart på et nyt sted på muren, eller der allerede er skåret et snit ved siden af det aktuelle murelement. Mellem hvert snit køres saven tilbage til centrum af føringen inden saven roteres (se FIGUR 3.9).
- f. Efter det sidste snit roteres saven således at den er i den horisontale position.



FIGUR 3.7. Til venstre ses et tværsnit af fjederbelastede låsetappe som aktiveres, hvorved den horisontale opretning er sikret. I midten ses en visualisering af den ene af de to bremsesko, som låser saven fast til skærerammen. Til venstre ses et billede af hvordan det horisontale snit skæres først.



FIGUR 3.8. Til højre vises når det horisontale snit er skåret, monteres modholdsklodser i det horisontale spor. Til venstre ses når saven er roteret hvorefter de vertikale snit kan skæres.

3.2.6 Nedkraning af udskåret murelement

Murelementet nedkranes og placeres på transportenheden (se Billede 3.2).

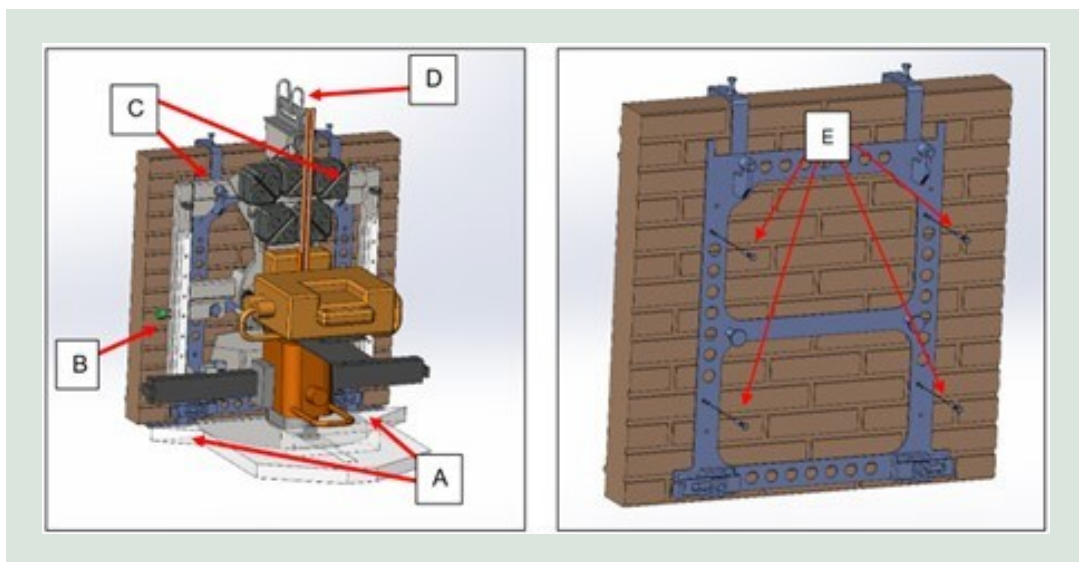


Billede 3.2

Til højre ses nedkraningen af murelementet. Til venstre ses placering af murelementet på transportpallen.

3.2.7 Frigørelse af løfte og skærerammer

- De to modholdsklodser afmonteres (A) (se FIGUR 3.9).
- Skærerammen frigøres fra løfterammen ved at løsne de to fastgørelsesklør (B) samt de to M12 fastholdeskruer på løfterammen (C) (se FIGUR 3.9).
- Fastholdepunktet for løft ændres til løfteøsken 1 (D) (se FIGUR 3.9), hvorefter skærerammen kan løftes bort.
- Løfterammen på murelementet frigøres ved at løsne de fire betonskruer (E) (se FIGUR 3.9).



FIGUR 3.9. Til venstre ses følgende: Modholdeplader (A), fastgørelsesklør (B), fastholdeskruer (C), og fastholdepunkt (D). Til højre ses placeringen af de 4 betonskruer (E).

3.2.8 Returnering af skære- og løfteramme

Skærerammen bringes tilbage til skærestedet, hvor den anden løfteramme i mellemtiden er blevet monteret.

3.2.9 Gentagelse af sekvens 2-8

For at gøre høsteprocessen så effektiv som muligt bør høsteteamet bestå af to personer, én som står for placering af sav og udskæring (operatøren), og en som styrer kran og placerer de udskårne elementer på transportpallen (kranføreren). Dvs. at imens kranføreren nedkræner murelementet og frigør skæreramme og løfteramme (sekvens 7-8, som beskrevet i afsnit 3.2.7-3.2.8), skal operatøren fjerne murbindere og isolering samt montere den anden løfteramme på murværket (sekvens 2-3, som beskrevet i afsnit 3.2.2-3.2.3).

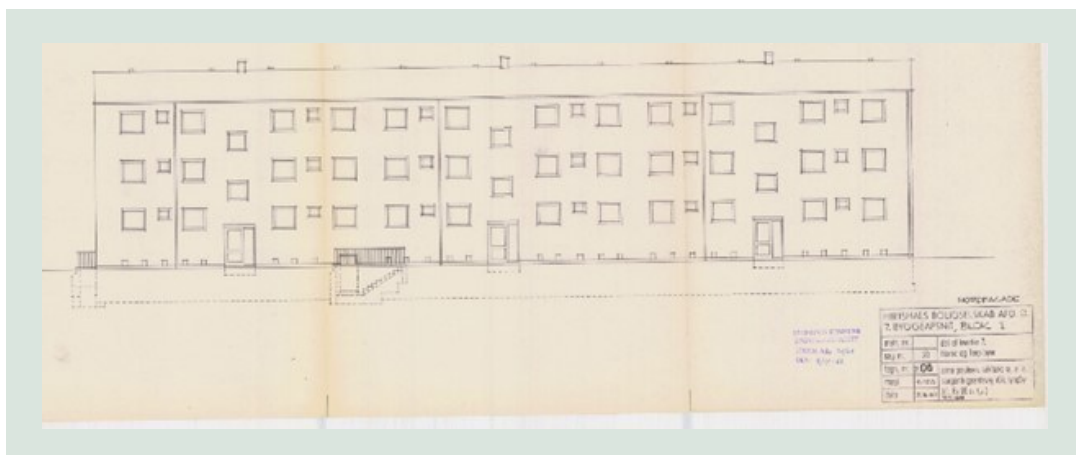
3.3 Projektering af udskæringsmængder vha. billede algoritmen

Selve udskæringsprocessen er understøttet af en algoritme som specificerer en udskæringsplan for bygningen. Med udgangspunkt i en importeret facadetegning beregner algoritmen den optimale udskæring, baseret på en given specifikation. Algoritmen kan specificeres til at lave udskæringsplanen mht. optimal udnyttelse af bygningen (flest udskårne elementer), økonomi (kun elementer under en given pris udskæres), eller fokusere på antallet af lodrette murstrimler af en specifik størrelse.

De følgende afsnit (3.3.1-3.3.3) er en gennemgang af de grundlæggende principper i billedalgoritmen gennem et eksempel, hvor der optimeres på optimal udnyttelse af bygningen.

3.3.1 Importer tegningsmateriale til programmet

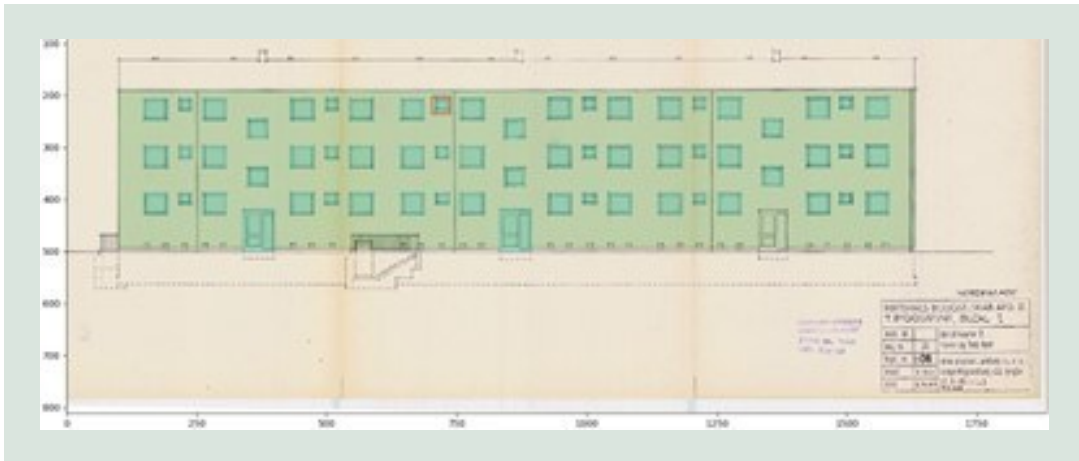
- Facadetegning importeres (se FIGUR 3.13).
- Programmet undersøger akseparallelitet og opretter tegning om nødvendigt.
- Programmet foretager kontrastforbedring samt bestemmer tegning/pixel skalering.



FIGUR 3.10. Original facadetegning af Margretheparken.

3.3.2 Facadevæg og bygning elementer registreres

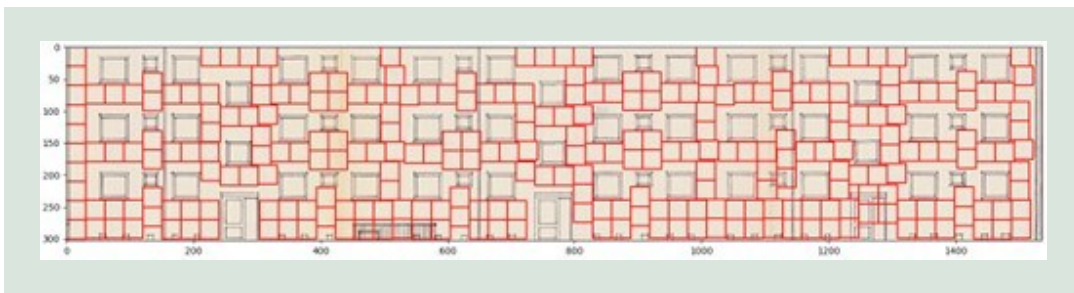
- Algoritmen udpeger facadevæggene, markeret med grøn (se FIGUR 3.11).
- Algoritmen udpeger bygningselementer såsom vinduer og døre, markeret med blå (se FIGUR 3.11).



FIGUR 3.11. Oprettet facadetegning med registrering af facadevæg og bygningselementer.

3.3.3 Projektering af murelementer på facademur

Algoritmen specificerer udskæringselementerne baseret på valgte optimeringsparameter (se FIGUR 3.12).



FIGUR 3.12. Visualisering af udskårne elementer optimeret for udnyttelse.

De optimeringsparameter, som er relevante, er i høj grad afhængige af konteksten. Som udgangspunkt vil murelementer blive billigere, hvis man primært høster strimler med mange murelementer. I nogle tilfælde vil det dog være nødvendigt at gå på kompromis med prisen for at få høstet det antal murelementer, som kunden ønsker.

3.4 Økonomisk analyse og omkostninger vedrørende erhvervelse af værktøj

Dette afsnit indeholder en analyse af omkostningerne ved høstning af murelementer, samt en prisoversigt for det udviklede værktøj og dets vedligehold.

3.4.1 Overslagsberegning af omkostninger ved høstning af murelementer

Dette afsnit inkluderer overslagsberegninger for de forventede omkostninger forbundet med høstning af murelementer. Formålet er at beregne den samlede pris per murelement samt at forstå hvilke elementer i processen der har den største økonomiske betydning.

Beregningerne er baseret på en række antagelser vedrørende tid og pris, som er præsenteret i Bilag 3. Ændrer man på de bagvedliggende antagelser, vil det også ændre på resultaterne. Sensitiviteten af en række antagelser vil blive præsenteret senere i kapitlet.

Baseret på antagelserne i Bilag 3, kan den samlede dagspris for løn og leje af maskiner udregnes:

TABEL 3.2. Udregninger for den samlede dagspris.

Samlet pris løn	$7,4 \text{ timer/dag} \cdot 250 \text{ kr./timen} \cdot 2$	= 3700 kr./dag
	personer	
Samlet pris leje af maskiner og værktøj	$1200 \text{ kr./dag (lift)} + 1500 \text{ kr./dag (teleskoplæsser)} + 500 \text{ kr./dag (skæringsværktøj)}$	= 3200 kr./dag
Samlet pris	$3700 \text{ kr./dag} + 3200 \text{ kr./dag}$	= 6900 kr./dag

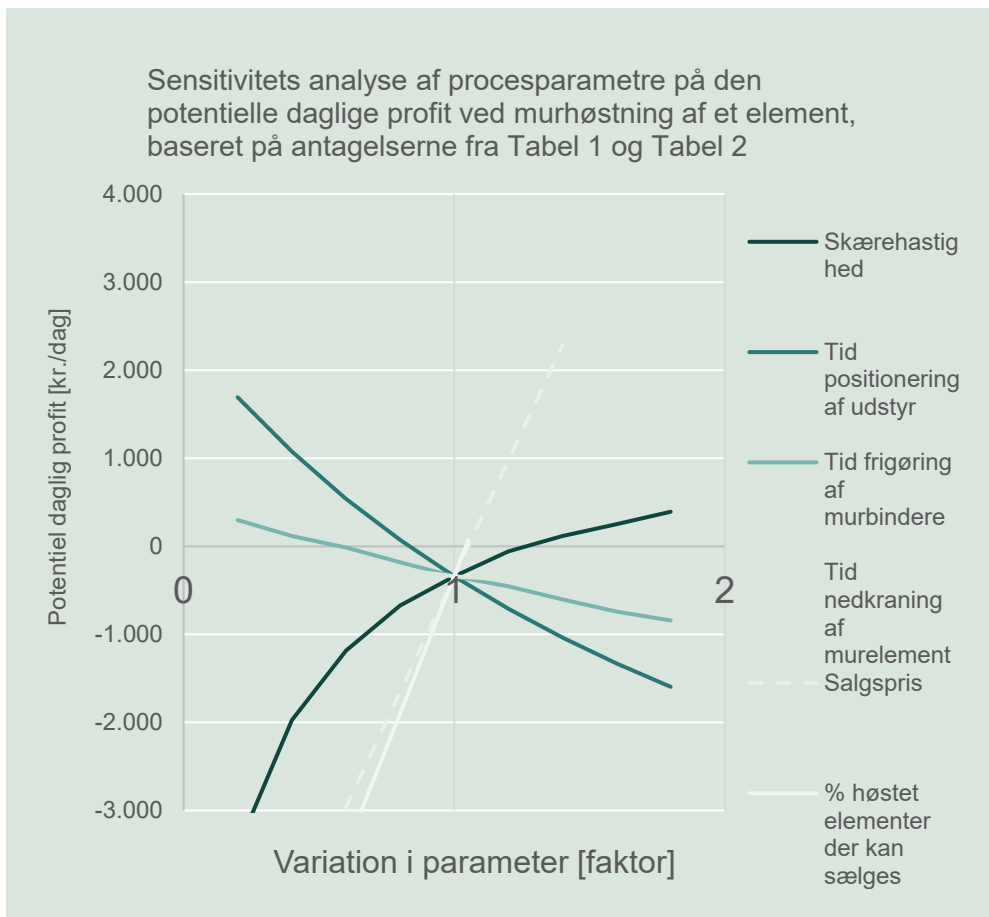
Fra den samlede dagspris i TABEL 3.2 og antagelserne fra Bilag 3 (opsummeret i TABEL 3.2) kan prisen for gode høstede murblokke udregnes:

TABEL 3.2. Pris overslag for gode høstede murblokke baseret på de beskrevne antagelser og specifikationer.

Tid brugt per murstrimmel (med 4 elementer)	$13,8 \text{ min (klargøring)} + 13,5 \text{ min (høstning)} \cdot 4 \text{ elementer}$	= 1,14 timer
Antal murstrimler per dag	$7,4 \text{ timer/dag} / 1,14 \text{ timer} \cdot 85 \%$	= 5,5 murstrimler/dag
Antal gode elementer per dag	$5,5 \text{ murstrimler/dag} \cdot 4 \text{ elementer} \cdot 95 \%$	= 21,2 elementer/dag
Pris per element (ekskl. udgift til transport af værktøj)	$6900 \text{ kr./dag} / 21,2 \text{ elementer/dag}$	= 325 kr./element

Prisen per høstede gode murelement er 325 kr. baseret på antagelserne og specifikationerne i Bilag 3. Bemærk at prisen er eksklusiv udgifter til transport til og fra byggepladsen, samt test - da dette er en engangsudgift forbundet til opstart af høstning af murværket. Den samlede transportpris til et lokalt site er 2.570 kr. Så ved antagelse af at et nedrivningsprojekt giver 100 gode murelementer, vil dette give en ekstra omkostning på 25 kr. per murelement. Den samlede pris til et ikke-lokalt site er 5.640 kr. (se Bilag 3.1). Prisen for test er ca. 25.000 kr., men dette kan svinge baseret på lokation, adgang mm.

Baseret på beregninger præsenteret herover, er der foretaget sensitivitetanalyse af en række parametre for at forstå parametrenes indflydelse på prisen af hvert høstet element (se FIGUR 3.13).



FIGUR 3.13. Indflydelse af variationer i procesparametre på den potentielle daglige profit baseret på at antagelserne i Bilag 3 svarer til en faktor på 1. For salgsprisen svarer en faktor på 1 således til 350 kr., hvilket ikke er en retvisende salgspris, men blot til eksempel.

Grafen med den største hældning er **% høstet elementer der kan sælges**, som har en stor betydning for pris per element. Det er antaget, at 95 % af de høstede murelementer kan sælges. Ændres denne til 90% vil dette give forskel på ca. -100% i den potentielle daglige profit. Det er med andre ord vigtigt for forretningsmodellen at murelementerne ikke bliver beskadiget under nedskæring og transport.

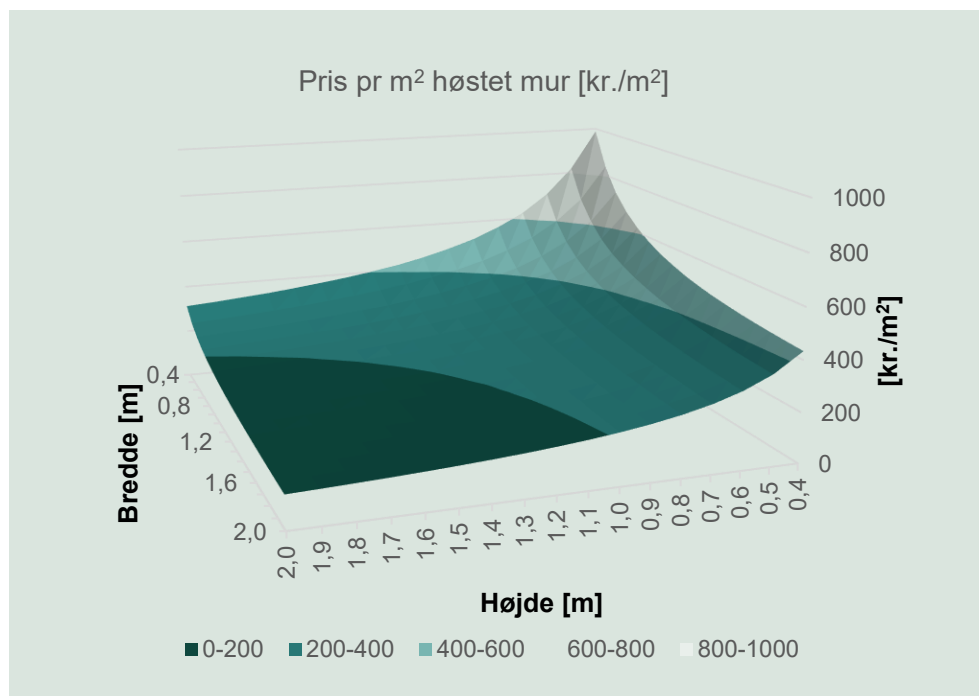
Salgspris er den næst vigtigste parameter. Denne er naturligvis af stor betydning, og vil blive behandlet yderligere i kapitel 6.

Tid positionering af udstyr er den tredje vigtigste parameter, da det er her det største tidsforbrug i høstningsprocessen ligger. Bruges der 4 minutter i stedet for de nuværende 5 minutter vil dette resultere i en indtjening på 72 kr./dag frem for den nuværende modellerede underskud på 341 kr./dag. Tid er med andre ord en vigtig faktor, så det er vigtigt at den generelle arbejdsgang er effektivt.

Skærehastigheden er vigtig, indtil den når en vis fart, hvorefter den relative forbedring bliver minimal. Det vil sige, at skærer saven 0,1 m/s vil dette være katastrofalt, da det vil give en minusdifference på 3.424 kr./dag. Men om den skærer 0,7 eller 0,8 m/s har ikke den helt store betydning.

Tid til frigørelse af murbindere og **tid til nedkraning af murelement** er ikke to sensitive parametre. Dog er tid en generel vigtig faktor, som bør reduceres om muligt.

Baseret på antagelserne i Bilag 3 er der også foretaget sensitivitetberegninger på størrelsen af murelementerne. Som det fremgår i FIGUR 3.14, bliver prisen høj per murelement, hvis elementerne bliver for små. Så længe elementer har en vis størrelse > 900 mm. x 900 mm. har variation i størrelsen af elementerne en relativ lille påvirkning på prisen. Baseret på disse overvejelser, samt overvejelser vedrørende logistik, effektivitet, og æstetik, blev det besluttet at værktøjet skulle skære i størrelsen 940 mm. x 940 mm.



FIGUR 3.14. Sensitivitetberegninger på størrelsen af murelementer.

3.4.2 Omkostninger ved erhvervelse og vedligehold af værktøjet

Der er primært 3 udgifter i forbindelse med erhvervelsen af værktøjet. Disse indbefatter prisen for skæreteknologien (Husqvarna WS 220) og øvrige standarddele, prisen for specialfremstillede dele, og prisen for at samle værktøjet. De 3 udgifter fordeler sig således:

- Køb af skæreteknologi og standarddele: 250.000 kr.
- Fremstilling af specialkonstruerede dele: 50.000 kr.
- Pris for samling af værktøjet: 50.000 kr.

Dette giver en estimeret pris på 350.000 kr., hvis man bestiller et stk. værktøj. Prisen afhænger dog i høj grad af antallet, da prisen vil være markant billigere per stk., hvis man bestiller 10 i stedet for en. Der vil være begrænsede udgifter forbundet med vedligehold af maskinen, hvor den primære udgift vil være at erstatte klingens, når den er slidt ned. Denne udgift er inkluderet som 'værktøj' i TABEL 3.2, hvor der er afsat 500 kr./dag. Denne dagsudlejningspris vurderes at være favorabel for potentielle kunder. Med en udlejningspris på 500 kr./dag vil tilbagebetalingstiden på værktøjet være 700 dages udlejning, hvilket svarer til omkring 3 år, hvis det udlejes alle arbejdsdage. Der kan med fordel arbejdes med prissætningen for udlejning af værktøjet, for at reducere risikoen for den virksomhed som ønsker at erhverve sig det. Prissætningen bør desuden valideres yderligere med fremtidige kunder.

Fremtidige optimeringsparametre

Arbejdstiden kan muligvis reduceres ved at automatisere flere procesaktiviteter under høstningssekvensen, f.eks. låsning af bremseskoene og rotationsmekanismen. Den mest tidskrævende del af processen er dog stadig positionering af udstyr og løfteramme, som ikke umiddelbart kan automatiseres yderligere uden en konceptændring i monteringen af udstyret. Foreløbige erfaringer fra fieldtests er begrænsede, og der anbefales derfor at indsamle yderligere erfaringer gennem værktøjets brug.

4. Procesdesign - fra planlægning til pakkede murfelter

Høstningen af murelementer med det udviklede skæreværktøj indebærer en anden tilgang til nedrivninger end den konventionelle. Først og fremmest arbejdes der inden for et paradigme af selektiv nedrivning, hvor materialer fra nedrivning behandles nænsomt for at sikre cirkulering af dem til højeste niveau. Dertil er der særlige procedurer og aktiviteter som gør sig gældende for høstning af murelementer. Dette kapitel skal give et overblik over en anbefalet proces for at høste murværk med cementmørtel med henblik på at anvende det i nyt byggeri. Denne proces starter allerede fra beslutningen om nedrivningen af en eksisterende bygning træffes - til det er inkorporeret i et nyt byggeri. Der tages udgangspunkt i det valgte scenarie, hvor ejeren af den bygning der skal nedtages, ønsker at anvende de udskårne murfelter i sit eget kommende byggeri. Kapitlet har til hensigt at skabe overblik og anbefalinger til denne proces, med særligt fokus på de indledende analyser frem til der haves udskårne murfelter på lager.

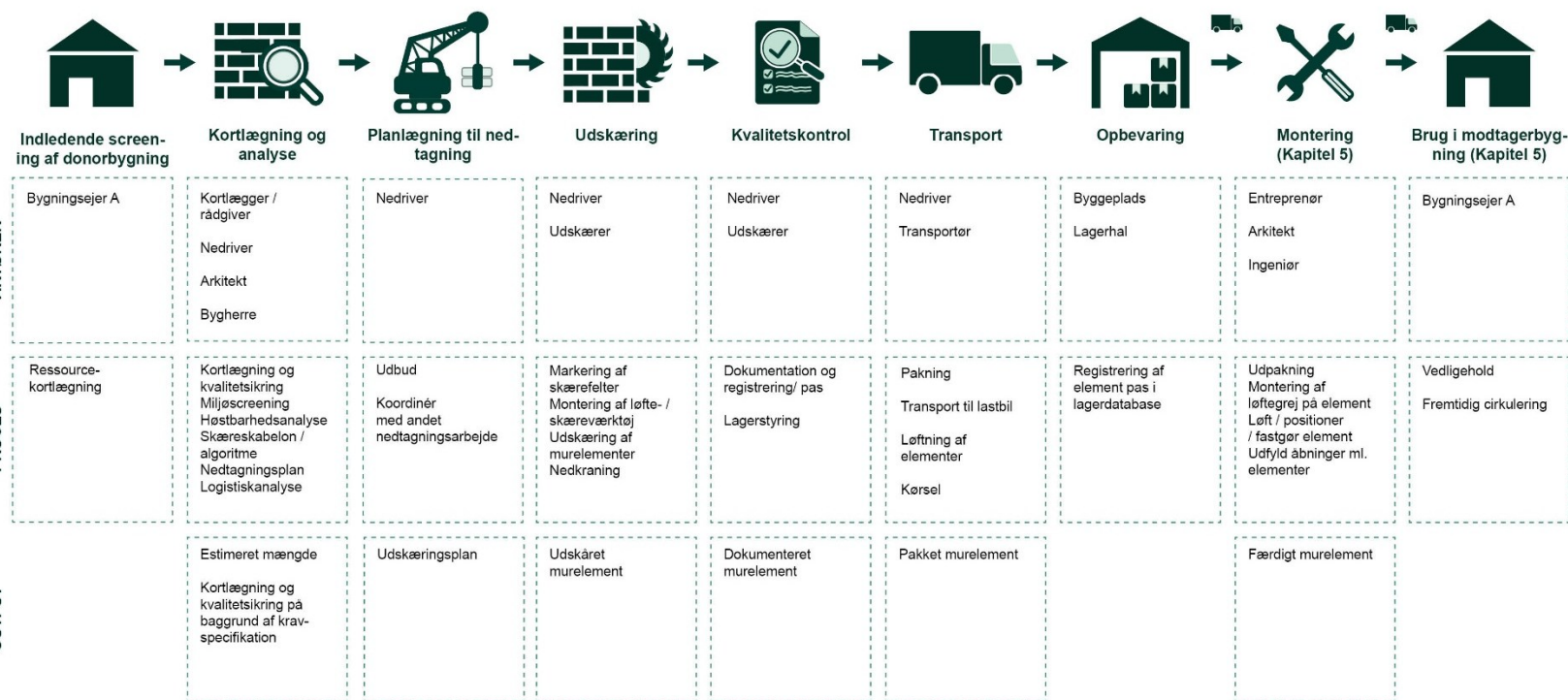
4.1 Proces omkring høstning af murelementer

Processen for høstning af murelementer kan opdeles i ni forskellige trin som ses illustreret i FIGUR 4.15. Disse tager afsæt i en eksisterende bygning, der skal nedrives hvor der vurderes potentiale for høstning af murelementer. Dette undersøges yderligere i en kortlægning og analyse af murelementer, inden der kan træffes beslutning om murværket er egnet til udskæring af murfelter. Hvis det vurderes, at murværket kan udskæres til murfelter, bør dette indarbejdes i planlægningen af nedrivningsprojektet, herunder udbudsmaterialet, hvorefter murfelterne kan udskæres. Efter udskæring bør elementerne gennemgå en kvalitetskontrol, inden de transporteres til eventuel opbevaring, hvorefter elementerne kan monteres og indarbejdes i den kommende modtagerbygning. Disse trin vil udfoldes og beskrives i dette kapitel, og der vil gives anbefalinger til håndtering af de forskellige aktiviteter på baggrund af de erfaringer der er etableret i projektet.

Procesdiagram



Design
(Kapitel 5)



FIGUR 4.15. Processen for høstning af murelementer fra brug i donorbbygning til genopførelse i modtagerbygning. Hvert trin gennemgås i dette kapitel med undtagelse af emnerne 'Design', 'Montering' og 'Brug', som uddybes i kapitel 5.



4.2 Indledende screening af donorbbygning

Formålet med dette afsnit er at fastlægge retningslinjer og procedurer for den indledende screening af potentielle donorbbygninger. Denne screening er den første vurdering af, om en bygning grundlæggende er egnet i forhold til en rentabel udskæring af murelementer uden fysisk besigtigelse.

Inden kortlægningen og udførelse af specifikke analyser af selve murværket og inden en konkret undersøgelse af de givne forudsætningerne for høstningen på nedrivningspladsen, bør en indledende screening udføres. Den indledende screening foretages primært på grundlag af indhentede informationer om bygningen som BBR-oplysninger, arkiverede projektbeskrivelse og tegningsmateriale. Mere dybdegående screening af murværket fremgår af afsnit 1.3. Følgende checkliste viser vigtige oplysninger, som bør indhentes, for at verificere bygningens egnethed for den tiltænkte selektive nedrivning.

- ✓ **Bygningens opførelsesår:**
Før 1960 var kalkmørtel almindeligt anvendt til opmuring af teglfacader. Derfor er bygninger opført før 1960 vurderet uegnet til høstning som udgangspunkt. Bygninger opført mellem 1960 og 1980 potentielt uegnede til høstning, da denne periode markerer indførelsen af cementmørtel som en kommerciel praksis i Danmark. Denne tommelfingerregel kan generelt bruges til at vurdere den anvendte mørteltype i et byggeri.
- ✓ **Areal af egnet teglfacade:**
For at muliggøre effektive høstningsprocesser af murstenselementer kræves en murstensfacade på mindst 170 m², der er fordelt på større og sammenhængende arealer. Hvis bygningen ikke opfylder dette kriterium, betragtes den som potentielt ikke rentabel for høstningsprocesser af murstenselementer. Ved at sikre et minimum på 170 m² murstensfacade bliver projektet mere robust over for uforudsete ændringer i opgørelsen af høstbare teglfacader eller fejl i nedrivningen, og kan dermed møde minimumskravet på 100 m² udskårne elementer. Dette bidrager også til en mere effektiv fordeling af opstartsomkostninger. Yderligere detaljer herom findes i afsnit 6.2.6.
- ✓ **Bygningens anvendelse:**
Bygningen har ikke været anvendt til produktion eller håndtering af miljø- og sundhedsfarlige kemikalier, som kunne have påvirket bygningens murede facader eller andre faktorer, der kan have påvirket murværkets tilstand.
- ✓ **Miljøundersøgelse:**
Murværket har ikke påvist indhold af miljø- og sundhedsfarlige stoffer som overskrider de definerede grænseværdier i gældende lovgivning – dette skal bekræftes gennem en miljøscreening eller -kortlægning. Bygningen bør ikke have været isoleret med asbestholdige materialer eller være efterisoleret med sprøjtet PUR-skum.
- ✓ **Æstetisk udtryk:**
Murværket skal besidde en egnet æstetisk kvalitet og må ikke være påvirket af uønskede overfladebehandlinger såsom maling. Denne vurdering kan udføres ved hjælp af fotos og andre illustrationer af bygningen.

Hvis den indledende screening afslører, at én eller flere af de angivne forudsætninger for bygningens egnethed ikke kan opfyldes, bør bygningen betragtes som uegnet til en økonomisk rentabel høstning af murværk til genbrug i nybyggeri.

Fremtidige optimeringsparametre

Der er mulighed for at digitalisere processen fremadrettet, og endda med et bredere porteføljeperspektiv for øje. Hermed vil det være muligt at analysere og indtænke eksisterende ressourcer tidligt i processen for porteføljestyring og -udvikling eller byplanlægning.

4.3 Kortlægning og analyse

Formålet med dette afsnit er at etablere et grundlag for at definere, hvilke uddybende analyser der er nødvendige for at kvalificere rentabiliteten af høstningsprocessen og for at kunne beskrive krav og arbejdsprocessen for udskæring af bygningens murværk.



Erfaringerne fra MUDP-projektets forskellige testbygninger har vist, at materialeegenskaber og kvalitet varierer betydeligt afhængigt af projektet. Det gælder både for typen af mursten og for murmørtlen. Samtidig kan udførelsen af et murværk variere markant, selv inden for den samme bygning. Dette skaber en række projektspecifikke faktorer, som har afgørende indvirkning på materialets genbrugspotentiale. Det medfører i planlægningsprocessen en vis uforudsigelig kompleksitet for genbrugsmaterialets forretningspotentiale. På denne baggrund skabes et stort behov for udvikling af metoder og retningslinjer til at afgøre, om en bestemt bygning er egnet til udskæring og genbrug af teglfacader.

4.3.1 Krav og kriterier til høstbar mur

Inden høstningsprocessen påbegyndes, skal der foretages en vurdering af murens egnethed til høstning eller udskæring. TABEL 4.1 præsenterer de nødvendige krav og kriterier, der skal opfyldes, før en donorbygning overvejes egnet til udskæring. I denne sammenhæng refererer afsnittet "krav og kriterier" til det specificerede omfang, der skal opfyldes for at forbedre den

overordnede ydeevne og dermed optimere omkostningerne i startfasen. Desuden er anført undersøgelser som kan udføres inden muren inspiceres on site.

TABEL 4.1. Krav og kriterier til en høstbar mur.

Emne	Krav og kriterier	Note
Mur	Murværk med sætningsskader udskæres ikke.	Murelementet svækkes af revner.
	Muren må ikke være fuldmuret. Der fokuseres på skalmurværk og uisoleret halvstensmurværk.	Er muren fuldmuret, kan der være problemer strukturelt når muren udskæres, da stabiliteten er afhængig af begge vægge af mursten.
	Murværket skal have hulrum med en minimumdybde på 100 mm. Dette sikrer adgang for at klippe murbinder over, samt saven.	Man skal være opmærksom på en ujævn muroverflade pga. mørteludtræk i form af "mørtelpølser" som kan indsnævre hulrumsdybden.
	Der bør være >100 m ² høstbar mur-areal.	Mængden af murværk beregnes enten ved brug af billedanalysealgoritmer i et algoritmeprogram eller ved vurdering af tilgængelige murstrimler. For mere detaljerede oplysninger henvises til afsnit 6.2.5.
	Murens æstetiske udtryk skal vurderes ift. teglfacadens visuelle kvalitet, murforbandt og patina.	
	Kun jævnt og plant murværk betragtes som egnet til udskæring.	
Mursten	Skal have en styrke som lever op til DS/EN 772-16.	Undersøges gennem godkendte testmetoder med akkrediterede virksomheder.
Mørtel	Mørteltypen skal være cementmørtel. Vedhæftningsstyrken skal helst være over 100N, Se Bilag 4, Træk-styrketest 15.05.23.	Hvis mørtlen er kalkmørtel, kan den fjernes, så murstenene kan anvendes enkeltvis som genbrugstegl. Mørtlen skal undersøges i hele fugedybde, da der kan være eftermørtlet med cementmørtel oven på en kalkmørtel der kan ligge bag fugen i fugen.
Isolering	Isoleringen skal kunne fjernes forud for eller under udskæringen af murelementer. Derudover skal der tages hensyn til arbejdsmiljøaspekter i forbindelse med vurderingen af sundhedsskadelige stoffer i ældre mineralulds-isolering.	Dette er for at forhindre at isoleringen sætter sig fast i saven.

Emne	Krav og kriterier	Note
Kemisk forurening og miljøscreening	Murværket skal leve op til gældende regler og grænseværdier for indhold af miljø- og sundhedsfarlige stoffer, som skal være testet i form af en miljøscreeningsrapport inden udskæringen.	Hvis det er praktisk og arbejds-miljømæssigt muligt, kan de miljø- og sundhedsfarlige stoffer alternativt afrenses eller områder frasorteres. En afrensning kan dog potentielt beskadige murstenene.
Tilgængelighed	Der skal være tilstrækkelig plads til opstilling af en kran eller lift, som kan manøvre udskæringsværktøj samt flytte elementerne på en palle. Forudsætningen for arbejdsprocessen er både sikre terræn- og adgangsforhold. Der skal minimum være frigjort 3 meters plads fra murværket.	Adgangsforhold og et sikkert arbejdsområde omkring det pågældende murelement skal kunne etableres inden udskæringen.

Overholder en potentiel donorbygning ikke eller kun delvist disse krav vurderes det, at murværket ikke er egnet til høstning af murværk med det udviklede skæreværktøj og til at genbruge bygningens teglfacader.

4.3.2 Kvalificering af murværkets egnethed

For at undersøge om donorbygningens murfacade lever op til de opstillede krav og kriterier for en høstbar mur, kan følgende kvalificeringsmetoder benyttes. Der findes alternative metoder til at imødekomme kravene stillet i afsnit 4.3.1. Anbefalinger i TABEL 4.2 er baseret på erfaringer, som har kunnet samles igennem MUDP-projektets forløb, og tabellen beskriver de undersøgelser som skal udføres ved inspektion af murværket.

TABEL 4.2. Anbefalinger til kvalificerings- og screeningsmetoder.

Hvad	Metode	Noter
Mur	Visuel vurdering	Tjek for sætningsskader, revner, huller, malerbehandlinger og visuelle forureninger etc.
	Praktisk inspektion med vaterpas	Tjek at muren er jævn og plan. Muren kan være kurvet, selv hvis den sér lige ud, hvilket betyder at der er risiko for, at saven ikke kan skære hele vejen igennem murfacadens dybde.
Mursten og mørtel	Vedhæftningsstyrken af muren efter DS/EN 1052-5 (Se Bilag 4 for eksempel)	En vedhæftningstest udføres i samarbejde med specialister, såsom Teknologisk Institut eller FORCE. Samtidig skal mørtelstyrken testes. Baseret på forsøgsresultater og designvalg tyder indikationerne på, at denne test er tilstrækkelig til at påvise styrkeegenskaberne.

Hvad	Metode	Noter
Isolering	Visuelt tjek med endoskopkamera	Tjek om isoleringen kan fjernes. Der foreslås endoskopkamera for at gøre mindst muligt skade på muren, men en anden kamera-type kan også bruges.
Kemisk forurening og miljøscreening	Miljøscreening	Miljøscreeningen skal gennemgås, og det skal overvejes, hvis der er nogle grænseværdier der er over-trådt, om forureningen kan afrenses rentabelt og uden negativ påvirkning på murværket. Hvis forureningerne begrænser sig på mindre områder, kan disse potentielt udelades fra udskæringen.
Tilgængelighed	Besigtigelse af bygningen og bygningens udearealer (fysisk tilstedeværelse påkrævet)	Der skal tages billeder, som den kommende udskærer, kan anvende sammen tegninger over området til at planlægge og vurdere opsætning af udskæringsværktøj.

4.3.3 Reparation og rensning

Nogle projekter kan kræve reparationer eller rensning af elementerne, for at sikre de kan anvendes. Dette kan udføres både før eller efter udskæring og kan omfatte:

- Reparation af fuger
- Fjernelse af maling
- Udfyldelse af huller

Disse bør adresseres før installation i modtagerbygningen. Det forventes, at disse aspekter primært har æstetisk betydning og medfører øgede økonomiske omkostninger.

Fremtidige optimeringsparametre

En del af disse kortlægnings- og analysemetoder kan simplificeres i fremtiden med hjælp af nye teknologier, f.eks. vil mørtelstyrken kunne bestemmes ud fra en pH-værdi. En vurdering af disse potentialer kræver et større datagrundlag end der haves på nuværende tidspunkt.

4.4 Planlægning til nedtagning



Formålet med dette afsnit er at afdække den nødvendige planlægning og klargøring for at udføre en udskæring af murelementer, fra den indledende forberedelse til den praktiske udførelse. Dette indebærer at skabe retningslinjer for integrationen af processen for udskæringen af murværket i planlægningen af logistik og tidsplan af de øvrige nedrivningsaktiviteter. Målet er at sikre en gnidningsfri implementering af udskæringsprocessen i afviklingen af en nedrivning ved at adressere alle relevante faktorer, herunder nødvendige ressourcer, arbejdskraft, tid og koordinering mellem forskellige arbejdsstrin, som har en indflydelse på den overordnede planlægning for nedrivningen.



FIGUR 4.2. Planlægning af nedtagning - fra plan til praksis. Aktiviteter markeret med rødt udfoldes i dette afsnit.

Inden nedrivning, er det afgørende at integrere detaljer om udskæringsprocessen i planlægning af afviklingen af nedrivningen, for at minimere risiko for forstyrrelser og misforståelser, som påvirker effektiviteten af udførelsen. Dette indebærer at integrere krav til nedrivningen allerede i udbudsmaterialet samt implementering i tidsplanen og koordinering med de øvrige nedrivningsaktiviteter. Dette skaber en sammenhængende strategi for at sikre en vellykket gennemførelse af udskæringsprocessen uden forhindringer for bygningens nedrivning.

4.4.1 Udbudsmateriale

Ved at etablere et godt udbudsmateriale til nedrivning skabes det bedste fundament for at kunne udskære flest mulige murefter på den mest effektive måde. Der er en række parametre der bør overvejes for både at effektivisere ressourceudnyttelsen på både tid og materialer, gode arbejdsmiljøforhold samt et øget fokus på bæredygtig praksis inden for nedrivningsprojekter. Herunder er en række af disse fremhævet.

Udskæringsprocessen skal beskrives i udbudsmaterialet for at skabe gennemsigtighed, et fælles vidensgrundlag og fair konkurrenceforhold til prissætningen af nedrivningsydelsen hos de bydende aktører. Hermed opnås forståelse for opgavens omfang hos entreprenører og leverandører som skaber grundlag for at fremme konkurrencedygtige priser og høj udførelseskvalitet.

Selektiv nedrivning adskiller sig fra de velkendte arbejdsprocesser ved den bygningsnedrivning. Det er derfor også vigtigt at der i udbudsmaterialet defineres en klar ansvarsfordeling. Særligt hvis der skal involveres en ekstern aktør til udskæring af murelementerne, som ikke har ansvaret for den resterende del af nedrivning, hvilket stiller yderligere krav til koordinering.

Ved udarbejdelsen af udbudsmaterialet er det afgørende at specificere detaljerne om udskæringsprocessen, screeningsresultatet, den forventede mængde af høstede teglelementer, kvalitetsmæssige udfaldskrav og tidsplanen for høstning. Det er vigtigt, at udfaldskravene af de udskårne murelementer beskrives i udbudsmaterialet på grundlag af resultaterne fra de indledende tests samt kortlægning beskrevet i afsnit 4.2 og 0. Disse er forudsætningerne for en præcis vurdering af udskæringsprocessens kvalitet og overholdelse af fastsatte kvalitetsstandarder.

Afhængigt af valgte evalueringskriterier i udbuddet, er det muligt at implementere forskellige incitamentsmodeller med det formål at optimere omfanget og kvaliteten af de høstede murelementer.

Selektiv nedrivning kræver altså en holistisk tilgang til både udbudsmaterialet og planlægningen af nedrivningsarbejdet.

4.4.1.1 UdvalgelseskrITERIUM I tilbudstildelingen

Et velbeskrevet udbudsmateriale og den tidlige dialog med nedrivningsfirmaet (i udbudsfasen) er essentiel for at den bydende nedriver kan bestemme den ekstra tid til den selektive nedrivning i deres planlægning. Der kan derfor med fordel inkluderes vejledende tid til udskæring på 12 min. per element i udbudsmaterialet. Ved tilbudstildeling anbefales det at nedriveren udvælges ud fra kvalifikationer indenfor selektiv nedrivning og nedriverens procesbeskrivelse for høstning af teglelementer.

4.4.2 Inkorporering i nedrivningsplan

Beskrivelsen af høstningsprocessens detaljerede arbejdsgange som en integreret del i nedrivningsplanen udgør et afgørende parameter for en sammenhængende og velkoordineret udførelse af en selektiv nedrivning. Udskæringsprocessen må ikke betragtes som en isoleret aktivitet, men skal derimod forstås som en integreret del af hele nedrivningsforløbet. Derigennem sikres en velkoordineret planlægning af arbejdsflow, ressourceallokering, leje af maskiner og tidsstyring, hvilket skaber en struktureret ramme for en effektiv selektiv nedrivning.

Følgende tjekliste er udarbejdet for at skabe en nyttig procesbeskrivelse over, hvordan murelementernes udskæring kan tænkes ind i nedrivningsplanen før høstningen påbegyndes:

- Kendskab til udskæringsværktøjet og egnet udstyr
- Tidsplan
- Klargøring af mur
- Logistiske synergier

Disse punkter er beskrevet i de følgende afsnit.

4.4.2.1 Kendskab til udskæringsværktøjet og egnet udstyr

Det er vigtigt, at der afsættes tilstrækkelig tid til oplæring i anvendelsen af udskæringsværktøjet. Hvis nedriverens mandskab ikke i forvejen har erfaring med udskæring af teglelementer, bør de ansvarlige personer oplæres i processen. Til oplæringen anbefales at udføre udskærings-tests med tilstedeværelse af sagkyndige med praktisk ekspertise i brugen af udskærings-

værktøjet. Derudover skal brugermanualen (afsnit 4.5.2 samt Bilag 5), teglelementernes udfaldskrav (TABEL 4.1) og alle nødvendige sikkerhedsmæssige og arbejdsmiljømæssige retningslinjer gennemgås.

4.4.2.2 Tidsplan

Der bør allokeres og koordineres tid til udskæringen i tidsplanen for nedrivningen. Arbejdstiden for høstningen kan beregnes ved at multiplicere mængden af murelementer med høstningstiden pr. murelement, som i nærværende MUDP-projektet er beregnet med 12 minutter, og dernæst tilføje en sikkerhedsbuffer, samt arbejdstid for forberedelser, evt. oplagring, koordinering med andre nedrivningsarbejder og elementernes håndteringen efter udskæringen.

4.4.2.3 Klargøring af mur

Klargøringen af murkronen er en væsentlig arbejdsproces, som skal være indarbejdet en planlægningen. Bygningens typer af murkroner skal være beskrevet og hvor nødvendigt, skal murkronerne fjernes således at der er adgang til placeringen af skæreværktøjet. I nedrivningsplanen skal være beskrevet på hvilke murarealer udskæringen foretages for at undgå at murkroner fjernes unødigt, hvor der ikke skal skæres.

4.4.2.4 Logistiske synergier

Det kan være både logistisk og økonomisk fordelagtigt at undersøge behov for udstyr af forsyning på tværs af forskellige aktiviteter i nedrivningsarbejdet. F.eks. kan det være fordelagtigt at der udvælges og lejes en type kran som kan deles på tværs af de forskellige nedrivningsaktiviteter. Disse logistiske synergier kan medføre fordelagtige tidsmæssige og økonomiske besparelser.

4.4.3 Indretning af byggepladsen

Der kan opstå udfordringer i forbindelse med at løse logistikken på nedrivningspladser, da selektiv nedrivning stiller supplerende krav til logistik og proces ift. de øvrige nedrivningsprocesser. Nedenstående TABEL 4.3 viser de væsentligste faktorer, som beskriver vurderingen og planlægningen af logistikforholdene på nedrivningspladsen samt anbefalinger til planlægningsprocessen.

TABEL 4.3. Logistikforhold til planlægning af nedrivningspladsens indretning.

Logistikforhold vedr.	Anbefalede forudsætninger
Bygning	På baggrund af bygningens højde og facadeudformning skal de rette maskiner og udstyr vælges, herunder størrelse og type af kran, løfteplatform og rullestillads.
Pladsforhold til etablering af arbejdsområde	I planlægningsfasen anbefales en tidlig dialog med nedriveren for at afklare de nødvendige pladsforhold til maskiner. Som minimum skal der være tilstrækkelig opsætnings- og arbejdsplads til en mini-kran, der kan manøvrere 180 grader, samt en selvkørende lift med arbejdsplatform. Der til skal der være arbejdsplads til pakning af murelementerne på en palle og til transport af den færdigpakke palle til opmagasinering.
Terræn foran teglfacade	Ved udvælgelsen af maskiner og udstyr, der skal anvendes til murelementhøst, skal der tages højde for projektets terrænforhold. Hvis der findes forhindringer, som f.eks. terrænskråninger eller objekter, som ikke tillader at komme på facaden, skal liften og kranen kunne nå ind til facaden under de givne afstandsforhold. Desuden bør der etableres et stabilt og jævnt underlag til kørsel og opsætning af lift og kran i form af køreplader el. lignende, hvis jordbundsforholdene er bløde og ikke er vejrbestandige.

Logistikforhold vedr.	Anbefalede forudsætninger
Arbejds miljøforhold	<p>Under udskæringen genererer saven et højt niveau af støj, og der skal derfor benyttes høreværn under arbejdet.</p> <p>Indretningen af arbejdspladsen skal sikre at ingen person befinder sig under eller i umiddelbar nærhed af murelementet under udskærings- og løfteprocessen.</p> <p>Placeringen af positionsrammen er et arbejde, som kræver opmærksomhed og præcision skal gentages mange gange. Derfor skal der i planlægningen indtænkes tilstrækkelige pauser og/eller en rolle skift mellem medarbejderne som udfører dette.</p> <p>Planlægningen og indretningen af arbejdspladsen for den selektive nedrivning skal desuden sikre at alle gældende arbejdsmiljøregler overholdes.</p>
Forsyninger	<p>I planlægningen af udskæringen skal der undersøges om og hvor el- og vandforsyningen til udskæringsprocessen er tilgængeligt. Hvis der ikke findes direkte forsyningsmulighed med el- og vandtilslutning på nedrivningspladsen, skal der planlægges elforsyning med generator og vandforsyning med større transportable vandbeholdere, eller alternativt via tilslutning på nabogrunden.</p> <p>Derudover skal behovet for nødvendigt materiel til pakning af murelementerne efter udskæringen, som f.eks. europaller, konstruktionstræ og spænderemme planlægges med og bestilles for at sikres, at de er tilgængelige og at der er nok. Dette uddybes i afsnit 4.7.</p>
Opbevaringsplads af elementer	<p>Der anbefales at etablere et midlertidigt overdække af murelementerne på deres opbevaringsplads enten på nedrivningspladsen eller en lokation i nærområdet.</p>

4.5 Udskæring

En koordineret overgang fra planlægningsfasen til den praktiske udførelse på nedrivningspladsen er afgørende for et vellykket selektivt nedrivningsprojekt. De planlagte arbejdsgange skal afspejles i den praktiske fase. Dette indebærer en nøje opsætning af detaljerede handlinger i udskæringsprocessen og en løbende koordinering mellem indretning af byggepladsen, klargøring af murværk samt realiseringen af et effektivt arbejdsflow under hele udskæringsprocessen. Denne sammenhængende tilgang sikrer en effektiv implementering af høstningsprocessen i de øvrige nedrivningsarbejder og en optimal udnyttelse af nedrivningsprojektets ressourcer.

Formålet med dette afsnit er at sikre en effektiv udskæring af murelementer under optimerede arbejdsmiljøforhold. Dette opnås ved korrekt valg og brug af det udviklede værktøj samt supplerende udstyr, overholdelse af sikkerhedsforanstaltninger, præcis planlægning af udskæringen og opmærksomhed på arbejdsmiljømæssige faktorer, såsom støv, støj og vejrforhold. Disse parametre sikrer en vellykket og problemfri proces, som i sidste ende er afgørende for at opnå et økonomisk rentabelt resultat og gode arbejdsforhold.

Med den seneste iteration af det semiautomatiske værktøj, som fremgår af kapitel 3, blev arbejdsmiljøforhold samt udskæringsprocessen optimeret mest muligt inden for projektets rammer. Dette udelukker dog ikke, at der fortsat er behov for en række foranstaltninger, der skal overholdes i den selektive nedrivningsproces for at sikre et godt resultat ift. mængden og kvaliteten af de udskårne murelementer, samt sikkerheden for alle involverede parter. Disse forhold gennemgås i dette afsnit.

4.5.1 Sagkyndig brug af det semiautomatiske udskæringsværktøj

En sagkyndig brug af udskæringsværktøj og tilhørende udstyr af oplært personale er essentielt for at opnå en succesfuld udskæringsproces. Derfor bør udskæringen enten foretages af erfarer personale eller kræve at det ansvarlige personale bliver introduceret og oplært i processerne vedrører udskæringsarbejdet for at sikre, at den nødvendige effektivitet for høstningen



prioriteres. Introduktionen og oplæringen bør inkorporeres i nedrivningsplanen, hvor følgende gennemgås:

- Operation af værktøjet ift. præcision, effektivt arbejdsflow og sikkerhed
- Opsætning af arbejdspladsen
- Introduktion til brugermanual og arbejdsmiljøforhold
- Hvad gør man, hvis værktøjet ikke virker?
- Mulighed for besvarelse af brugerspørgsmål til værktøj

Hvis udskæringen skal foretages af uerfarent personale, anbefales at der arrangeres en oplæringdag med en praktisk test, som udføres i god tid inden den planlagte udskæring igangsættes. Er det udførende personale allerede oplært, bør der overvejes, om en genopfriskning af processen vil være fordelagtigt. Oplæringen bør gennemføres af en sagkyndig indenfor denne selektive nedrivningsproces og tilbydes af udbyderen / sælgeren af selve udskæringsværktøjet.

4.5.2 Brugermanual

Et af MUDP-projektets resultater er en brugermanual, som skal læses og anvendes af de ledende og udførende aktører involveret i udskæringsarbejdet og efterfølgende håndtering af murelementerne. Brugermanualen er vigtig for at sikre udskæringens kvalitet, de rette arbejds-gange, et sikkert arbejdsmiljø, en korrekt forberedelse og den nødvendige tekniske viden om værktøjet. Denne guide udviklet med henblik på at være brugbar og let forståelig for de personer der skal udføre høstningen med fokus på at aktiviteterne passer ind i deres øvrige arbejds-gange på nedrivningspladsen. Yderligere skal brugermanualen være et formidlingsredskab ved oplæringen af uerfarne arbejdere.

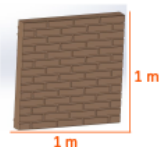
Brugermanualens kan ses i Bilag 5 og på FIGUR 4.3, som viser et uddrag af manualen. Brugermanualen er pt. kun udarbejdet på dansk, men det anbefales, at den oversættes til både engelsk og andre udbredte sprog på danske nedrivningspladser som f.eks. polsk. Brugermanualen bør være tilgængelig både digitalt og i en fysisk printet version.

Den printede udgave skal:

- Lamineres
- Alle sider skal være bundet sammen med f.eks. en metalring til nem bladrning
- Brugermanualen skal foreligge i min. to eksemplarer (én til kranføreren og én til arbejderne ved liften).

2. FRIGØRING AF MURBINDERE

Via murens hulrum fjernes isolering og murbindere klippes manuelt for et felt på ca 1x1 meter.



3. LØFTERAMME PÅ MURVÆRKET



FIGUR 4.3. Uddrag fra brugermanual. Den fulde manual kan ses i Bilag 5.

4.5.3 Erfaringer fra MUDP-projektets udførte udskæringstests

Alle væsentlige erfaringer og erkendelser fra de gennemførte testudskæringerne i MUDP-projektforløbet blev opsamlet under og efter udskæringsprocessen, således fremtidige projekter kan lære fra disse. Erfaringsopsamlingen fremgår i Bilag 6. De tre vigtigste erfaringer sammenfattes her:

3. Usynlige sætningsskader kan forekomme og medføre at murværket eller et udskåret murelement kan knække på et uforudset tidspunkt, hvilket kan udgøre en risiko for personskade. Det anbefales, at personen der fastsætter skærerammen på positionsrammen, placerer sig i en sikker afstand fra murelementet både under udskæringen og ved løft af det fritskårrede element. Desuden bør arbejdsplatformen tilstrækkeligt afskærmet af rækværk. Desuden skal det sikres at der til hver en tid ikke befinder sig en eller flere person(er) under murelementet som udskæres.
4. For hurtige og abrupte løft med kranen kan medføre at det udskårne element begynder at svinge ukontrolleret i luften, hvilket øger risikoen for sammenstød og skader. Dertil øges tiden til at bringe murelementet under kontrol og til at sætte elementet efterfølgende på transportpallen. Ved udskæringen bør elementet derfor løftes langsomt og vertikalt op.
5. Hvis skærerammen ikke placeres i vater, medfører det en skæv udskæring og et upræcist murelement. Et ukorrekt snit påvirker også præcisionen af de næste murelementer. En høj grad af præcisionen er både for de vandrette og lodrette snit vigtige og har en betydning for om det udskårne murelement holder sig indenfor de fastsatte dimensioner eller om de tilladte tolerancer overskrides, hvilket vil medføre at murelementet vil være uegnet til senere genbrug i et nyt byggeri. En korrekt opsætning af skærerammen kontrolleres med en

vaterpas. I en videreudvikling af skærerammen kan en vaterpas med fordel være integreret i værktøjet.

Fremtidige optimeringsparametre

For at optimere processen bør udskæringen yderligere automatiseres, så operatøren i højere grad kan fjernstyre arbejdsprocesserne under udskæringen, såsom justering og skift af skæreretning. Dette vil desuden forbedre sikkerheden og reducere høstningstiden markant. Derudover vil supplerende måleredskaber, som sikrer en vinkelret placering af skærerammen, øge murelementernes præcision og øge effektiviteten.

4.6 Kvalitetskontrol

Formålet med dette afsnit er at opsætte retningslinjer, der kan benyttes til at sikre et højt niveau af kvalitetssikring på grundlag af specificerede dokumentationskrav, som danner forudsætningen for en videre anvendelse af de udskårne murelementer.



Efter udskæringen og inden murelementernes opmagasinering, er det vigtigt at alle elementer gennemgår en kvalitetskontrol for at sikre, at de kan implementeres i efterfølgende projekter. På grundlag af MUDP-projektets udskæringstests er der udarbejdet følgende tjekliste til kvalitetskontrol. Kvalitetskontrolltjeklisten vises som FIGUR 4.4 og er en anbefaling for en registreringsmetode af elementernes kvalitative egenskaber:

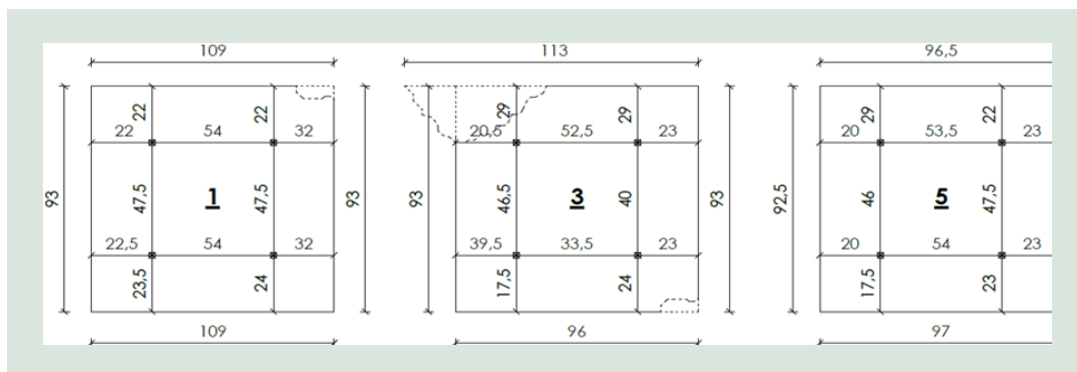
- ✓ Alle murelementer kendetegnes med et ID-nummer, som anbringes sikkert på elementerne (f.eks. kan ID-nr. skrives på siden af murelementet med vandfast maling eller tusch).
- ✓ Elementernes dimension registreres. Der opmåles følgende på minimum 20 stk. eller 10% af elementerne (herved opnås en forståelse af de tolerancer der skal arbejdes med i designet):
 - Højde (ydre dimension)
 - Bredde (ydre dimension)
 - Placering af hullerne fra udskæringsværktøjet (indre dimensioner).

Dimensionerne registreres under elementets ID-nr. Alle disse oplysninger skal også dokumenteres og indføres i et internt lagerstyringssystem (f.eks. som på FIGUR 4.4).

- ✓ Hvert element skal tjekkes for eventuelle skader, som f.eks. elementkanter eller hullet fuge. Disse skader skal registreres under elementets ID-nr., hvor også omfang noteres samt mulighed for udbedring som bruges til videre kategorisering i den interne lagerstyring. Dette kan bl.a. omfatte at kontrollere mørtlen på både for og bagside for eventuelle huller i mørtelfugen som kan svække elementerne.
- ✓ Her kan desuden registreres yderligere opmærksomhedspunkter som f.eks. behov for afrensning af overfladebehandling eller miljøfarlige stoffer, eller kendskab til mørtlens og murstens styrke.

Murelement #	Murstensfarve	Nedrivningssted	Intakt?	Ydre dimensioner	Indre dimensioner	Placering af huller
1		Musikhuset - Farum	Ja	109 x 93	Se diagram	Se diagram
2		Musikhuset - Farum	Nej	93 x 93 x 93,5 x 91	Se diagram	Se diagram
3		Musikhuset - Farum	Nej	113 x 93 x 96 x 93	Se diagram	Se diagram
4		Musikhuset - Farum	Ja	94 x 92 x 93,5 x 93	Se diagram	Se diagram
5		Musikhuset - Farum	Ja	96,5 x 92,5 x 97 x 92,5	Se diagram	Se diagram
6		Musikhuset - Farum	Nej	96,5 x 93,5 x 96,5 x 93,5	Se diagram	Se diagram
7		Sorø	Nej	94,5 x 93,5 x 94 x 93,5	Se diagram	Se diagram
8		Sorø	Ja	94,5 x 94 x 94,5 x 94,5	Se diagram	Se diagram

FIGUR 4.416. Eksempel på lagerstyring.



FIGUR 4.5. Eksempel på opmåling (nederst). Som minimum afmåles højde og bredde.

Fremtidige optimeringsparametre

Fremtidige optimeringspotentialer inkluderer muligheden for at reducere tiden for opmåling af elementerne og kvalificere behovet for antallet af stikprøver, der kræves til kvalitetskontrol i kommende projekter. Der er potentiale for, at et algoritmeprogram kan generere ID-numre til murelementerne i fremtiden og kobles til en digital database, hvor alle elementer og deres egenskaber registreres som arbejdsgang i udskæringsprocessen. Udskæringsværktøjet bør videreudvikles med fokus på en øget nøjagtighed, som sikrer at de tilladte tolerancer kan overholdes. Gennem mere automatiseret afmåling i fremtiden bør nøjagtigheden af udskæringen kunne vurderes bedre.

4.7 Transport

Formålet med dette afsnit er at opsætte retningslinjer, der beskriver en sikker og optimeret transportproces til en efterfølgende genbrug af elementerne.



4.7.1 Løft, pakning og flytning

Fra det øjeblik murelementerne er frigjort fra muren, vil elementerne have brug for fornyet støtte og midlertidig stabilitet. Tidligere erfaringer har vist hvordan hensyn til murelementernes

skrøbelighed er altafgørende for at høstningen og den senere oparbejdning kan lykkes uden at elementerne revner og går fra hinanden. Derfor er det vigtigt at udvikle metoder, hvor murelementerne kan løftes, flyttes og afsættes på den mest skånsomme måde.

Omfang af nødvendige løft og flytninger af murelementerne fra udskæringen til genindbygningen er fremhævet i TABEL 4.4.

TABEL 4.4. Steder i processen hvor elementerne løftes og/eller flyttes.

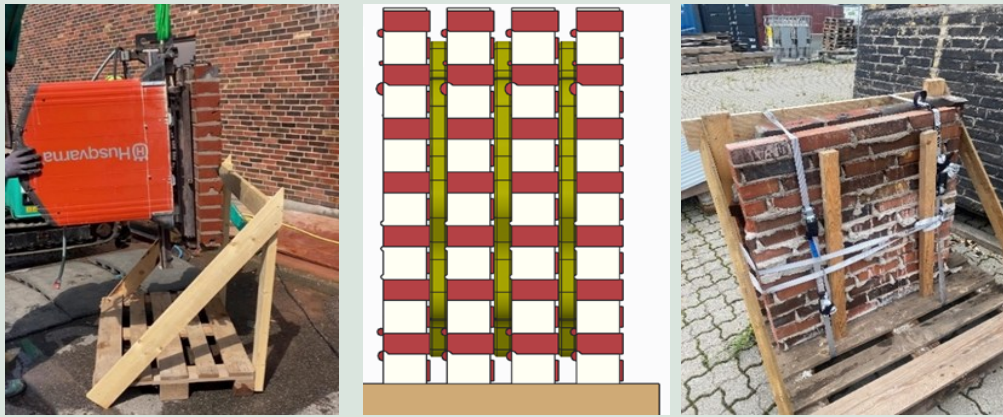
Proces trin	Løft eller flytning af elementerne
Trin 04 Udskæring:	Løft fra udskæringen til transportpalle Eventuel flytning af palle på byggeplads
Trin 06 Transport:	Løft af palle med elementer og placering i transportmiddel
Trin 07 Opbevaring:	Løft og flytning af palle med elementer til opbevaring
Trin 08 Montering:	Løft og flytning af palle med elementer ved aflæsning fra transportmiddel Løft af murelement til opsætning og montering i modtagerbygning
Trin 09 Brug (Ved evt. fremtidig cirkulering)	Løft og flytning ved evt. fremtidig demontering

Elementerne skal kunne løftes og flyttes sikkert flere gange før de endeligt monteres i modtagerbygningen. I dette afsnit detaljeres anbefalinger til hvordan elementerne bør forberedes til transport og håndteres under transporten mellem udskæringen og monteringen.

Gennem flere testudskæringer (Bilag 7) er der etableret følgende erfaringer:

- Elementerne bør placeres vinkelret på pallen under transport. Ligger de ned, kan de ikke løftes uden at knække, og hvis elementerne er tiltet, øger det sandsynligheden for knæk samt udsætter kanterne for skader. Et let tilt kan dog være acceptabelt.
- Europaller skal udvælges i en passende størrelse som er minimum 940mm i bredden.
- Elementerne skal surres sammen – hertil skal bruges afstandsklodser i blødt materiale mellem elementerne for at undgå skader (f.eks. blødt træ eller mineraluld fra nedrivningen).
- For at sikre korrekt placering af elementer anbefales det at tilføje afstivere til pallen.

På FIGUR 4.6 ses den anbefalede pakningen af murelementerne:



FIGUR 4.6. Til venstre ses et element, som nedsænkes til den tilpassede europalle. I midten ses fordelingen af afstand materiale i f.eks. blødt træ, isoleringsmateriale eller lignende. Til højre ses elementerne surret til pallen og hvor strop-låsen skal placeres, så den ikke beskadiger murelementet.

Ved brug af europaller kan normalt løftegrej benyttes. Europaller holder til en belastning på 1.000-1.200 kg fra ny. Der bør udelukkende anvendes nye europaller eller brugte i grad A af sikkerhedsmæssige årsager. Har pallerne stået udenfor eller fået andre skader, anbefales det at nedsætte mængden af elementer pr. palle - eller ikke at anvende den til transport og flytning af murelementer. En passende mængde elementer på en ny palle er tre til fire elementer.

TABEL 4.5. Transport af materialer på europaller. Bemærk at følgende er anbefalinger.

Transport on-site	Transport off-site
Køreunderlag skal etableres	Vægtfordelingen i transportmidlet skal være balanceret.
Europaller skal løftes fra den side, hvor murelementerne er placeret, så den ikke tipper	Europallerne skal løftes fra den side, hvor murelementer er placeret, så den ikke tipper.
Overvej afstanden som elementerne skal transporteres on-site, samt hvilket udstyr der bruges. Til længere on-site transport anbefales elektriske palleløftere eller gaffeltrucks.	Overvej hvilket transportmiddel elementerne skal placeres på, samt hvilken form for truck/palleløfter der skal bruges. Der anbefales generelt hjælpemidler med længere gaffler, så pallerne lettere kan flyttes til og fra transportmidlet.
	Det er en fordel at være mere end en person ved på- og aflæsning på køretøjer

Fremtidige optimeringsparametre

Fremtidige optimeringspotentialer inkluderer reduktion af svingninger under løft samt undersøgelse af alternative løsninger til en sikker placering på transportenheden. Udfordringer med specialpaller og almindelige palleløftere bør adresseres, og orienteringsændringer af pallen bør overvejes. For at kunne transportere skrøbelige murelementer optimalt er det afgørende at sikre tilstrækkelig fastgørelse under transport, løfte paller fra den tunge side og undgå unødvendig flytning for at minimere risikoen for beskadigelse. Dette er især relevant for de øverste og nederste rækker af mursten.

4.8 Opbevaring

Formålet med dette kapitel er at påpege effektive metoder og processer for opbevaring med det overordnede mål om at sikre murelementer for skader og andre negative påvirkninger, samt at holde omkostningerne på et rentabelt niveau.



Afhængigt af det givne aftager- og upcyclingsscenario findes to optioner for murelementernes opbevaring:

1. Opbevaring direkte på nedrivningspladsen - On-site
2. Opbevaring udenfor nedrivningspladsen - Off-site

Det er vigtigt at behov og optioner for opbevaring er afklaret forud for udskæringen.

4.8.1 Opbevaring på nedrivningspladsen - on-site

Der anbefales on-site opbevaring hvis:

- Murelementerne skal genbruges på samme placering.
- Der findes tilstrækkelig plads med overdækning og tilladelse til opbevaring af elementerne over en længere tidsperiode.

Hvis elementerne kan opbevares på nedrivningspladsen til senere genbrug, skal opbevaringsstedet være overdækket og elementerne sættes på fugttæt underlag, som f.eks. køreplader. Træpallerne må ikke udsættes for påvirkninger fra fugt og regn. Træpaller med spånklodser skal undgås, da disse kan opsuge vand og rådne indenfor kort tid.

Selve murelementerne bør ikke udsættes for direkte regn i tilfælde af frost, da frostskafer kan forekomme og ødelægge elementerne. Opbevaringen anbefales under et fast, tæt tag, som f.eks. en skurbygning, en container, el.lign. Ved en kortvarig opbevaring kan elementerne opklodses og afdækkes med en presenning midlertidigt. Opbevares elementerne i længere tid udendørs, bør der overvejes brug af langtidsholdbare paller f.eks. i plastik for at undgå råd og svækkede materiale.

4.8.2 Opbevaring på nedrivningspladsen - off-site

Hvis det ikke er muligt at opbevare elementerne on-site dvs. selve nedrivnings- og byggepladsen, er der behov for at finde et opbevaringssted med en kortest mulig transportafstand imellem donor- og modtagerbygningen. Her anbefales et sted til indendørs opbevaring som f.eks.

en lagerhal, hvis elementerne skal opmagasineres over længere tid. Alternativt kan elementerne opbevares med en overdækning udendørs som tilsvarende beskrivelsen ovenover under pkt. 4.8.1. Et passende opmagasineringssted kan f.eks. findes i samarbejde med lokale aktører såsom landmænd, der kan tilbyde lagerhaller eller lignende faciliteter i en tidsbegrænset periode.

Fremtidige optimeringsparametre

Der kan for fremtiden undersøges, hvordan egnede og rentable opmagasineringssteder nemt kan opspores f.eks. via en onlineportal for leje af opmagasineringsplads.

5. Design, produktion og performance

Udskårne murfelter som facadeelement har i et tidligere MUDP-projekt⁹ været implementeret i rækkehus- og lejlighedsbyggeriet Ressourcerækkerne, som er opført i Ørestaden i København. Dette kapitel skal give et indblik i, hvordan designet har udviklet sig igennem projektet og resulterer i det design der anbefales i dag. Herunder indgår miljømæssige og økonomiske analyser i det optimerede design. Desuden påpeges mulighederne for yderligere udforskning og forbedring af produktet - herunder produktionsmetoder og design.

5.1 Et nyt design

For af minimere CO₂ og ressourceforbruget mest muligt, skal der arbejdes på at finde en løsning uden tung betonbagplade. Der skal udvikles konstruktionsmetoder og fastgørelsesprincipper for teglelementer i ydervægskonstruktion og dette kapitel beskriver den overordnede proces for udviklingen og udvælgelsen af et nyt design.



5.1.1 Udvikling af et nyt design

Til udviklingen af det nye design blev en lang række krav og kriterier defineret som vigtige for udviklingen af et forbedret murelement. Nedenfor, i TABEL 5.6, ses de vigtigste designparametre der blev brugt under udviklingen af et forbedret design.

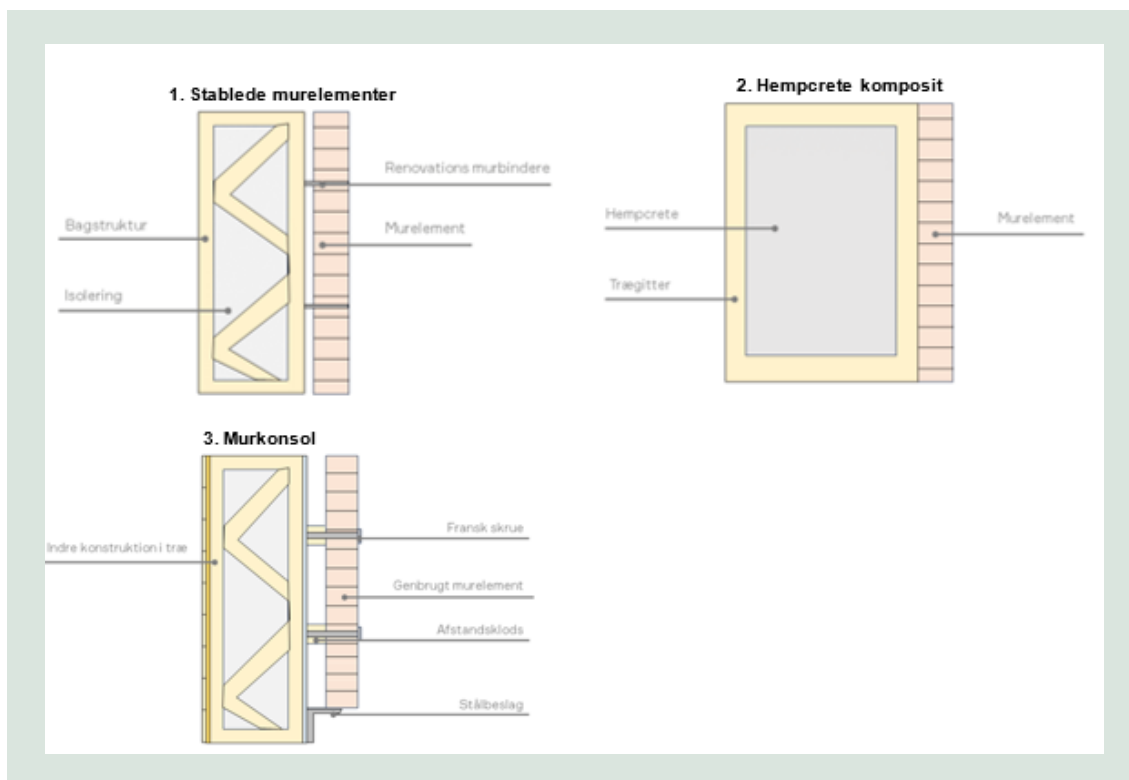
TABEL 5.6. De 5 vigtigste designparametre.

Designparameter	Påvirkning i helhed	Hovedkriterie
Designmæssig fleksibilitet	Produktets forretningspotentiale	Mange designmuligheder giver mulighed for bredere anvendelse af elementerne.
Bygbarhed	Risikominimering ved ny brug	Tiden det tager at placere et element korrekt
Økonomi	Produktets konkurrenceevne	Ønsket er at opnå den mest favorable pris.
Cirkularitet	Fremtidig ressourceprofil	Det skal være tydeligt hvordan et element kan adskilles og anvendes i en tredje livscyklus
Miljøpåvirkning	Byggeriets klimabelastning i helhed	En mindre klimabelastning for den samlede facadeopbygning er tilstræbelsesværdigt.

Disse designparametre kan i nogle tilfælde være modstridende, og det har derfor været nødvendigt at vælge det bedste kompromis på tværs af disse parametre. I projektet har tre alternative opbygninger været udforsket. Af disse tre har to været opført som demonstrationsmo-

⁹ [Upcycle byggematerialer - produkt, proces & performance](#)

deller på udstillingen Planetary Boundaries - Rethinking Architecture and Design på Det Kongelige Akademi i efteråret 2023. På FIGUR 5.1 ses de tre alternativer: 1. Stabledede murelementer (opbygning som konventionel mur), 2. Hempcrete komposit, og 3. Murkonsol. Hempcrete og murkonsol variationerne var udstillet. På Billede 5.1 ses fotos af demonstrationsmodellerne fra udstillingen med opbygningen af henholdsvis stabledede murelementer, hempcrete og murkonsol.

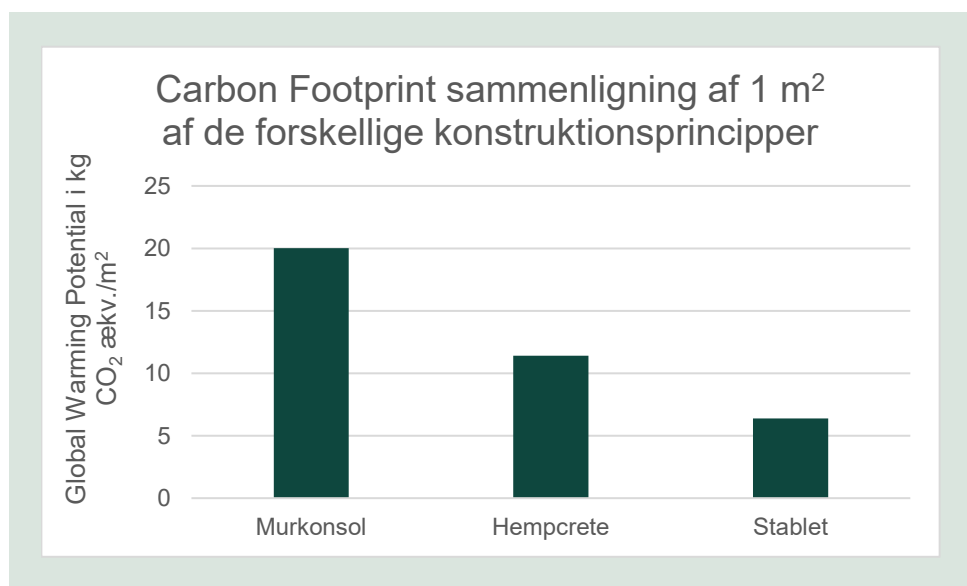


FIGUR 5.117. De tre alternative opbygninger. Øverst til venstre ses en stabled opbygning, øverst til højre ses en hempcrete-opbygning og nederst til venstre ses en illustration af en opbygning med murkonsol.



Billede 5.1

Fotos af demonstrationsmodeller på udstillingen Planetary Boundaries - Rethinking Architecture and Design. Til venstre ses Hempcrete løsningen, til højre ses murkonsol løsningen.



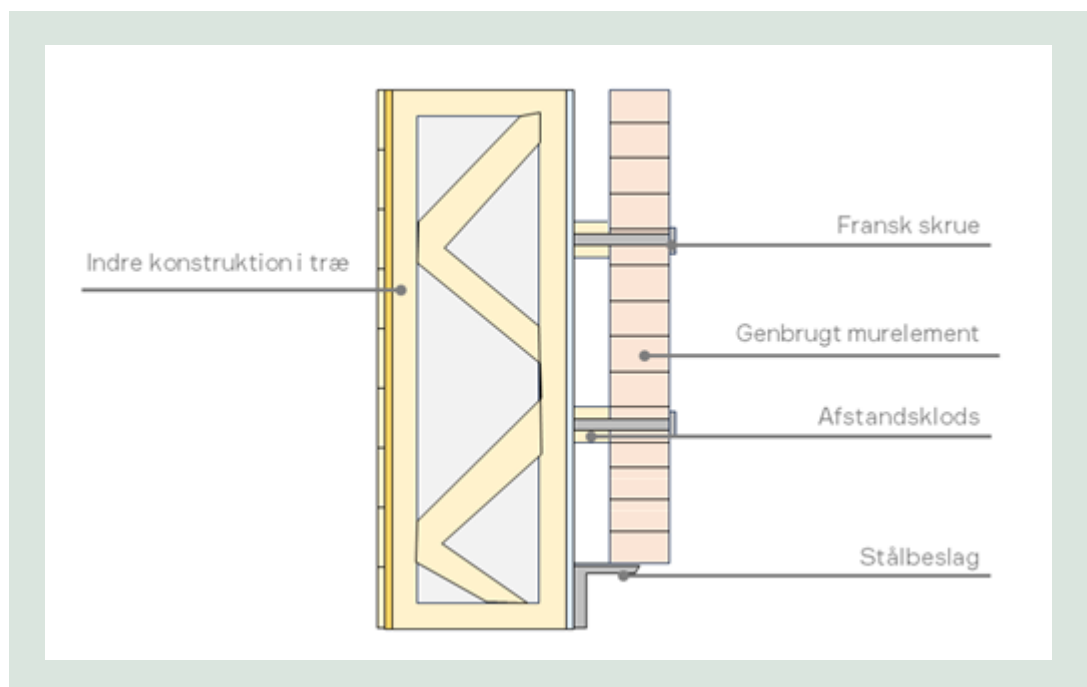
FIGUR 5.2. Simplificeret Carbon footprint sammenligning af koncepterne. I denne analyse er den bagvedliggende struktur ikke medregnet i analysen, da fx Hempcrete vil kunne bruges som strukturelt element i alle koncepterne. Der er anvendt generisk data til analysen, samt opbygningen som ses på FIGUR 5.1. Der ses på den funktionelle enhed: 1 m² udskårne murelementer som facade.

De tre opbygninger blev sammenlignet på tværs af alle designparametre. Dette kan ses i Bilag 8. Opbygningen med murelement stablet oven på hinanden præsterer bedst miljømæssigt, mens bygbarheden er relativt dårlig, da stabling af elementerne afhænger af elementernes

skæringsflade. Her observerede vi at skæringsfladen ofte er vinklet en smule, og altså ikke er helt plan. Elementerne er desuden for tunge til at inkorporere en grad af fleksibilitet gennem mørtel, og dermed er bygbarhed afhængig af en plan skæreflade på elementet under. I tilfælde af, at der stables mange elementer ovenpå hinanden kan vinklen blive synlig samt have strukturel indflydelse. Desuden vil denne opbygning potentielt tilføjet for stort tryk på murelementerne, og flere elementer vil skulle kasseres grundet højere styrkekrav ift. de andre løsninger.

Hempcrete kompositløsningen resulterede i en god bygbarhed og økonomi, men med det resultat at fremtidig cirkularitet vil være en udfordring. Kompositten vil være svær at skille fra hinanden, og holdbarheden af stålet i hempcreten vil kunne korrodere og udfordre levetiden. Hempcrete løsningen er dog stadig interessant fra et helhedsorienteret perspektiv på bygningen, hvor hempcreteelementet kan erstatte flere elementer i bygningen, herunder isolering. Dog går denne løsning imod kravet om cirkularitet, og derfor er der valgt at arbejde videre med løsningen med murkonsoller, som kan ses på FIGUR 5.3.

5.1.2 Det valgte design



FIGUR 5.318. Konceptuel opbygning af murelement med murkonsol. Bemærk at tegningen er ikke målfast.

Den valgte løsning med murkonsoller vil således bestå af:

- Murkonsol fastgjort til bagliggende struktur. Hvert element vil placeres og hvile på en murkonsol.
- Tydelige skruer. Disse er med til at tydeliggøre at elementerne kan adskilles i fremtiden.
- Afstandsklodser på underliggende struktur. Disse sikrer at elementet ikke overspændes, da der skrues igennem afstandsklodserne.
- En bagvedliggende struktur som er muligt at fastmontere skruer i. Her anbefales konstruktionsstræ - enten fastsat på en underliggende struktur i stål, træskelet, beton eller CLT-væg. Det er vigtigt, at der er et stort areal til at fastsætte skruerne i, da præcisionen af hullet i muren ikke er ensartet, og der kan hermed opnås en mere fleksibel proces.

Ved at vælge designet med murkonsoller, vil hvert element afkobles fra hinanden i konstruktionen. Beslaget eller konsollen er tilvalgt grundet et ønske om at mindske kravet til murelementernes styrke, samt at mindske risikoen af murelementernes individuelle variationer ved udskæringen (f.eks. en lille vinkel der kunne blive en udfordring ved stabling). På denne måde kan variationer i vinkel og mål lettere håndteres, da de ikke er kritiske for murens bæreevne. Desuden er kravet til det individuelle murelements styrke også reduceret ved dette design. Der er ikke defineret specifikke grænseværdi for krav til trykstyrke, da der i dette design ikke er nogle trykkræfter på elementerne (blot trækkræfter) og det er dermed mindre væsentligt.

At benytte murkonsoller er en kendt teknik, hvilket vil gøre det lettere at implementere murelementerne i et byggeri. Desuden vil denne metode gøre en fremtidig nedtagning lettere, da hvert element kan nedtages uden fare for at påvirke resten af opsætningen. Mængden af stål der benyttes til denne løsning, kan fortsat forsvares da det funktionelt højner værdien af elementerne ift. cirkularitet. Dette reducerer antallet af elementer, der må kasseres grundet store variationer i elementerne eller nedsatte mekaniske egenskaber. Dermed vil mængden af elementer der kan bruges være højere end ved andre koncepter.

TABEL 5.2. Specifikationer for upcyclet murelement.

UPCYCLET MURELEMENTER SPECIFIKATIONER	
Type og anvendelse: Facadeelementer til skalmur	Performance: 50 - 100 år
Størrelse: 940 x 940 mm. Elementer kan tilskæres på byggepladsen ved behov.	Produktion: Udskæring af elementer fra nedrivningsklare byggerier med automatiseret skæreværktøj.
Montering: Monteres på murkonsoller vha. løftebånd og kran. Fire skruer sættes i løftehullerne for at fastspænde murelementet til bag-strukturen.	Opbygning: Kalkmørtel, fugebagstop, murkonsol, afstandsklodser. Elementerne kan placeres i forskellige retninger, og farver og med varierende dybder i reces.

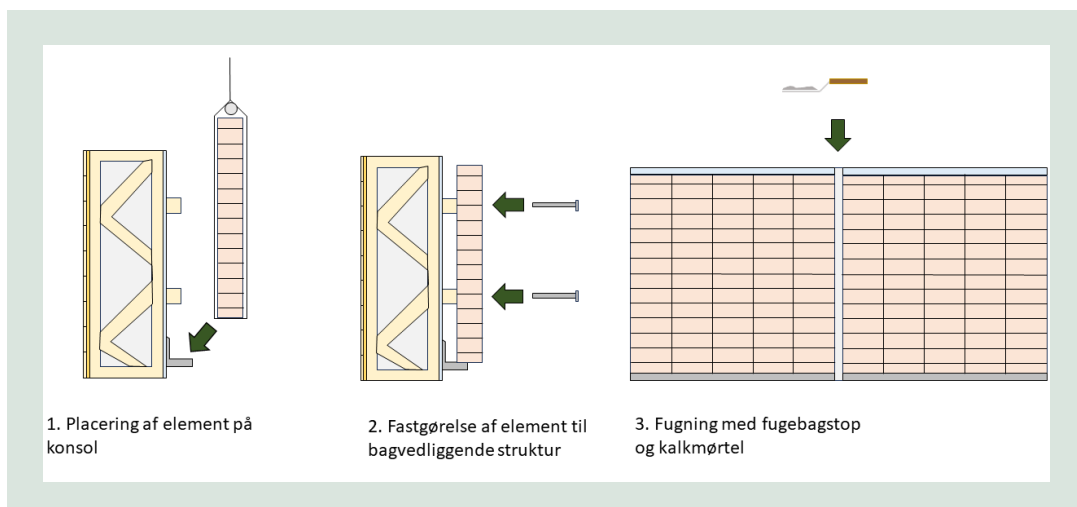
Hver del af designet vil gennemgås i det følgende.

Fremtidige optimeringsparametre

Fleksibiliteten af det valgte design er fortsat begrænset til og afhængig af det tilgængelige materiale, som kan variere meget i kvalitet og det æstetiske udtryk. Der kan desuden arbejdes videre med hempcrete løsningen for at overkomme nogle af de udfordringer dette design bragte med sig. Se yderligere detaljer herom i Bilag 8.

5.2 Montering

I dette afsnit vil der gennemgås hvert trin for montering af elementerne. På FIGUR 5.4 ses de tre trin.



FIGUR 5.4. De forskellige monteringstrin.

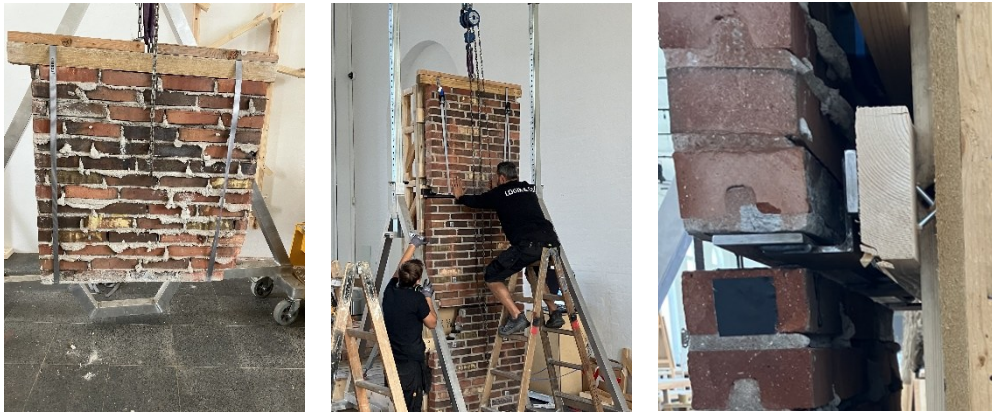
Ved monteringen af elementerne følger processen FIGUR 5.3. Dog skal det pointeres at selve monteringen af elementerne ikke er det mest tidskrævende, men derimod alt det forberedende arbejde. Afstandsklodser, som skal skrues igennem elementerne, bør have store tolerancer – hertil kan der være en smule mere materialeforbrug.

Det anbefales desuden at placere murkonsollerne i en række ad gangen. På denne måde er det muligt at lave en stor del af det forberedende arbejde direkte hvis man placerer alle murkonsollerne på én gang, vil man støde på problemer ift. plads til løfteåget. Dvs. at det ikke kan lade sig gøre at placere elementerne hvis alle murkonsollerne installeres på 1 gang. Efter placering af den første række, kan det næste forberedende arbejde påbegyndes.

5.2.1 Løft og placering

Ved montering af murelementerne skal de løftes fra europalle og placeres på stålkonsollen. For at gøre dette sikkert, er der tre funktioner der skal imødekommes. Nedenfor er funktionerne samt deres løsning beskrevet.

- **Positionering på beslag/konsol.** For at placere elementerne korrekt ift. det ønskede design, skal en person guide elementet på plads. Dette kræver en vis præcision og tålmodighed. For at gøre det lettere ift. placering mod muren anbefales det at anvende en visuel guide til at sikre at elementet placeres korrekt. På demonstrationsprojektet "Planetary Boundaries" blev murkonsollen designet til dette, og elementet kunne justeres til at passe til dette format. Se Billede 5.2.
- **Kobling fra element til kran.** Da hullerne i elementerne er beregnet til skruefastgørelse, giver det ikke mening at genbruge udstyret fra udskæringen, da det kan beskadige hullerne. Derfor anbefales det at bruge almindelige løftebånd med skralde, som kan håndtere vægten af elementet, og at placere løfteåg tæt på elementet. Kontrollér i luften. Erfaring fra forsøg (se Bilag 7) viser at elementerne kan svinge en del i opsætningen under flytningen. Det er derfor vigtigt at løfte elementerne forsigtigt. For at gøre arbejdet lettere anbefales at benytte et løfteåg med to bånd til kranen, da dette vil nedsætte svingene.



Billede 5.2

Løft og placering af murelement. Yderst til venstre ses et murelement løftet med bånd og løfteåg i træ. Det anbefales desuden at der anvendes paphjørner, for at sikre imod skader. I midten ses justering on-site. Til højre ses den visuelle guide til placering af elementet. Hér var elementet placeret ift. selve stålet, så kanterne flugtede med hinanden.

5.2.2 Fastgørelse af element til mur

Til fastgørelse af elementerne til den bagvedliggende struktur anbefales franske skruer. Skruerne fungerer som murbindere i opbygningen, og sikrer at elementerne kan klare vindtræk. Skruerne skal dimensioneres pr. projekt, da vindforholdene kan variere afhængigt på konteksten. Skruerne bruger desuden de huller, der blev lavet ved udkæringen. Dermed skal skruerne som minimum være $\varnothing 6$ for at de kan fastspænde murelementet. For at sikre at skruerne fastsættes til strukturen bagved, skal arealet hvor skruerne kan skrues fast (på den bagvedliggende struktur) være relativt stor.



Billede 5.3

Placering af skruer. De 4 skruehuller fra udskæring og nedtagningen genbruges.

Synligheden af skruerne er vigtigt for fremtidig cirkularitet, da de fungerer som indlejrede markører for at elementet kan skilles ad igen i et fremtidigt nedtagningsscenarie. Det anbefales dermed at bruge skruehovederne æstetisk.

Fastgørelsen skal desuden ske igennem afstandsklodser i passende materiale der ikke påvirkes ved udsættelse for fugt (der anbefales Kebony eller lignende naturbehandlet træ, eller en afstandsklod i genbrugsplastik mellem træ og murelement). Afstandsklodsen kan med fordel monteres på forhånd, hvor det er vigtigt, at der medtages overvejelser for variationer i hullernes placering samt dimensionerne af elementet. Hullernes relative afstand til kanterne kan variere op til 5 cm.

5.2.3 Fugning

For at sikre at facaden er modstandsdygtig overfor eksterne påvirkninger skal elementerne naturligvis fuges. Her anbefales der at benyttes fugebagstop (hør, værk, mineraluld eller skum) og efterfølgende fuge op med kalkmørtel. Denne metode benyttes også ved vindue- og yderdørsfugning.

Hér følger de anbefalede trin for fugning mellem murværk som svarer til dem for vinduer/døre¹⁰:

- Bagstop indsættes mellem elementerne. Som hovedregel skal den udvendige fuge være halvt så dyb som den er bred. Det betyder hvis fugen er 10 cm bred, skal toppen af bagstoppen placeres 5 mm inde målt fra mureltets yderkant.

¹⁰[Bygmax guide til fugning](#)

- Tryk fugemasse på plads med fugeske. Hertil benyttes kalkmørtel, som evt. kan tilsættes fe-hår for at øge styrken af mørtlen. Fugemassen skal først trykkes ind før den gøres pæn da den ellers ikke hæfter. Når man anvender kalkmørtel, sikres det, at elementerne kan tages fra hinanden igen i fremtiden.
- Glitning af fugemassen. Hér gøres fugen pæn med glittepinde.

Fremtidige optimeringsparametre

I fremtiden bør opbevaringen af elementerne optimeres. Med det nuværende design passer pallerne ikke til elementerne. Det bør derfor overvejes enten at producere speciallavede paller der passer til målene, eller at nedsætte størrelsen på elementerne. Dog bør der i denne udvikling tages højde, for at reduktion af elementernes størrelse vil øge intensiteten af andre arbejdsprocesser for at opnå den samme mængde muret facade. Dette vil desuden lette håndteringen af elementerne. Desuden bør variationer i elementernes mål fra nedrivningen kvantificeres, så det er muligt at indarbejde tolerancerne i bygningens design. Dette vil gøre at afstandsklodserne kan fastsættes uden opmåling. I dette udviklingsprojekt har produktionsstørrelsen ikke været en stor nok til repræsentativt at kunne kvantificere variationerne. Der bør desuden overvejes at tilføje et blødt materiale på konsollen for at undgå skader på murelementet ved nedsætning.

5.3 Produktion

Formålet med dette afsnit er at specificere, hvordan beslag eller murkonsoller til montering i en ny bygning skal udføres.

5.3.1 Stålmurkonsol

Murkonsoller er et standardiseret produkt, som findes i mange forskellige variationer med mulighed for projektspecifikke tilpasninger. Murkonsollen skal udføres efter specifikationer fra det enkelte projekt. I dette projekt er der ikke udført en "one-size-fits-all" løsning, men udarbejdet en checkliste der kan benyttes ved detaljering af konsollen, samt et design der kan bruges til inspiration. Tjeklisten lyder som følge:

- ✓ En passende murkonsol udføres i modstandsdygtigt materiale. Der anbefales rustfrit syrefast stål.
- ✓ En visuel guide inkorporeret til montering af elementer som skal hjælpe til at placere elementerne korrekt.
- ✓ Semipermanent forankring til underliggende struktur, fx ved brug af bolte eller skruer. Undgå svejsning og indstøbning.
- ✓ Er udført i en passende tykkelse og geometri, så den hverken er under- eller overdimensioneret. Dette skal verificeres af ingeniører.

Murkonsollerne skal opsættes på den bagvedliggende struktur trinvist, efter at murelementet er blevet placeret nedenfor.

I dette demonstrationsprojekt anvendtes en midlertidig løsning, der er overdimensioneret for at kunne demonstrere konceptet. Murkonsoller findes i standard dimensioner, hvilket med fordel

kan anvendes i fremtidige opbygninger¹¹. I LCA-beregningerne i denne rapport er standardløsningerne benyttet.

Fremtidige optimeringsparametre

Etabler samarbejde med producent for at fremstille standard produkt der passer til konteksten af murelementet. Dette vil undgå ekstra materiale samt nedsætte prisen pr. murkonsol.

5.4 Dokumentation

Formålet med dette afsnit er at specificere, hvordan beslag eller murkonsoller til montering i ny bygning skal udføres.

5.4.1 Ydeevnedeklaration

Fra de test der bliver udført før nedrivningen, er det muligt at lave en ydeevnedeklaration. Denne skal bruges i samarbejde med ingeniøren, når elementet skal inkorporeres i bygningsdesignet.

På ydeevnedeklarationen bør følgende dokumenteres:

- Bøjningsstyrken for elementet (pr. m²), som skal reducere risiko for brud under transport og opbygning, samt sikrer styrken ved trækraft fra vind efter montering. Dette er testet ved vedhæfningsstyrketest.
- Udtræksstyrke
- Frostbestandighed

Kravene til ydeevnetesten er anderledes end dem der anvendes ved direkte genbruge af enkeltsten. Ved at bruge murkonsoller mellem hvert element elimineres behovet for at vurdere sugsevnen af murstenene, da mørtel ikke anvendes i konstruktionen. Desuden er trykstyrken mindre afgørende, da elementerne ikke udsættes for tryk i konstruktionen med murkonsoller. Dog er det vigtigt at undersøge udtræksstyrken, da skruer anvendes som forankring, og bøjningsstyrken af elementet for at sikre, at det ikke knækker. Bøjningsstyrken er testet ved nedtagningsprocessen, og er den mest kritiske. Frostbestandighed, vedhæfningsstyrketest og udtræksstyrketest bør udføres i samarbejde med test-organisationer som fx FORCE eller Teknologisk Institut. Det skal her understreges at produktet endnu ikke opnår CE-mærke ved denne proces men en deklARATION af egenskaber der er sammenlignelig.

5.4.2 Dokumentation for fremtidige genbrugspotentialer

For at gøre fremtidig genbrug lettere, anbefales der at følge "Reuse of Structural Composite Products" grundlag¹², som kan bruges til at definere dokumentationskravene for at sikre fremtidig genbrug. Det anbefales her især:

- At sikre at ydeevnedeklaration kan findes i fremtiden. Desuden skal der indikeres hvilke elementer de(n) gælder for. Den kan være gemt ved:
 - BIM model

¹¹ Se fx [Jeviths murkatalog](#)

¹² [Joustra, J., Flipsen, B., & Balkenende, R. \(2021\). Circular Design of Composite Products: A Framework Based on Insights from Literature and Industry. Sustainability, 13\(13\), 7223.](#)

- Internt lagerstyringssystem
 - Fysisk fastgørelse på elementerne
 - Evt. andet.
- Hvert element tilføjes fysisk ID (evt. kan det ID der blev brugt ved nedtagning genbruges).
 - Tilføj guidelines for fremtidig nedtagning af elementerne (f.eks. i BIM-model samt internt lager system).

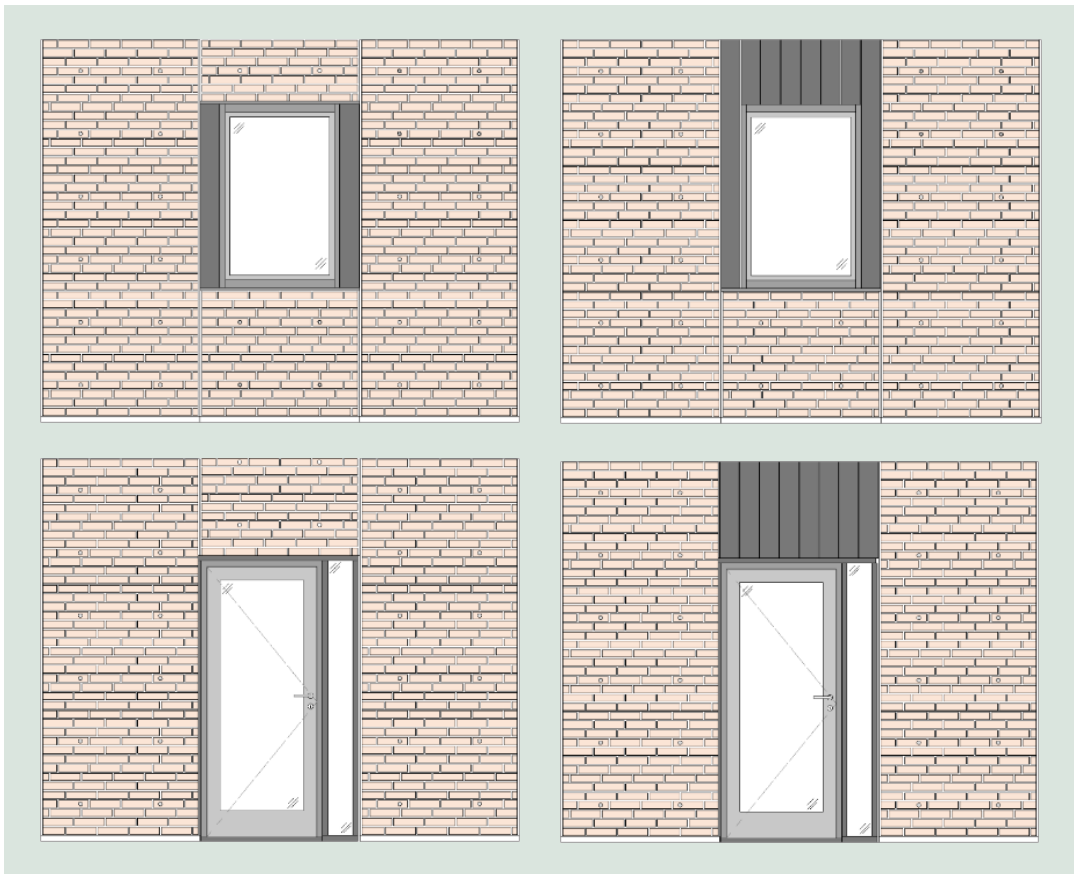
Fremtidige optimeringsparametre

En fremtidig forbedring vil ligge i at standardisere og evt. harmonisere ydeevnedeklarationen, og gøre det til en standard for dette produkt. På denne måde vil usikkerhederne ved at genbruge murelementer være mindsket for mange aktører.

5.5 Arkitektoniske muligheder

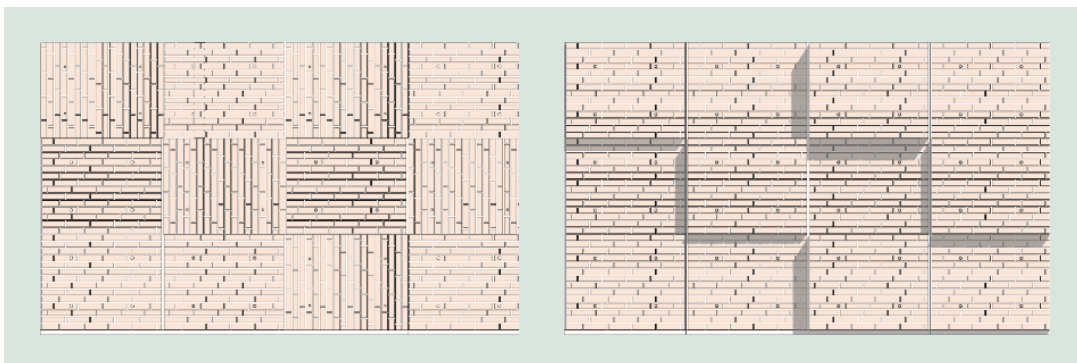
Når der arbejdes med udskårne murelementer, vil der være forskellige muligheder for hvordan detaljer såsom hjørnesamlinger, vindues- og døråbninger løses. Desuden kan der opstå udfordringer hvis donorbygningen ikke har en tilstrækkelig mængde murfelter til den nye kontekst hvor murfelterne skal opføres.

På FIGUR 5.5 præsenteres forskellige bud på overgangen mellem en lukket og åben facadestruktur. Her illustreres det, hvordan udtrykket kan se ud ift. åbningen mellem et muret facadeelement og vindues- eller dørpartier.



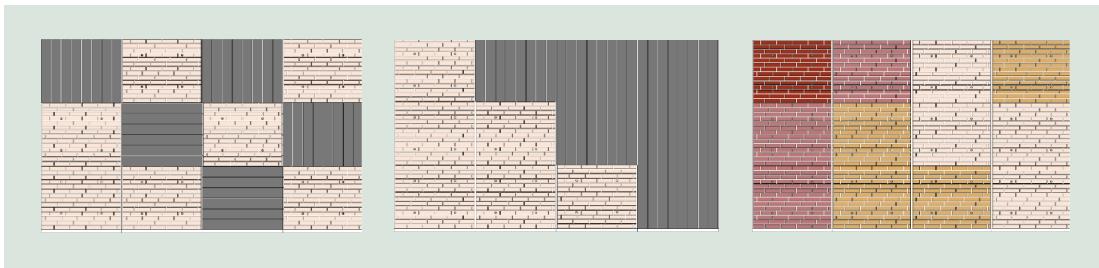
FIGUR 5.5. Idéforslag til hvordan åbninger der ikke passer ideelt til murelementernes størrelser kan løses.

På FIGUR 5.6 illustreres der forskellige bud på, hvordan man kan tilføje facadeelementerne liv og visuelt samspil, idet man arbejder med kvadratiske elementer. Ved at understrege opbygningen af facaden rent visuelt bliver fortællingen om bygningens bæredygtige karakteristik tydeliggjort.



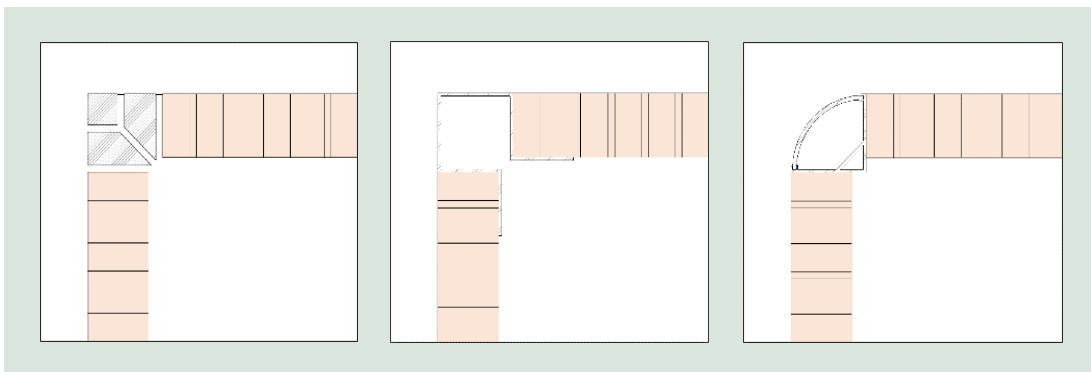
FIGUR 5.6. Arkitektoniske sammensætningsmuligheder.

FIGUR 5.7 præsenterer hvordan man kan arbejde i et scenarie, hvor man oplever ressourceknaphed ift. mængden af murede facadeelementer. Disse eksempler præsenteres med henblik på at skabe større sammenhæng i det visuelle udtryk, og dermed hvordan man på en æstetisk måde kan skabe et interessant samspil mellem materialer ved knaphed på muret facadeelementer.



FIGUR 5.7. Idéforslag til at løse ressourceknaphed af murelementerne i facadeudtrykket.

På FIGUR 5.8 præsenteres der forskellige bud på hjørnesamlinger til opsætning af facadeelementer.



FIGUR 5.8. Hjørnesamlinger udført i mursten eller aluminium.

De forskellige vigtige overvejer ift. beslutningen om hjørnesamling findes i tabellen i Bilag 9.

5.6 Klimapåvirkning og økonomiske analyser

Formålet med dette afsnit er at kvantificere konceptet fra et Carbon Footprint perspektiv for at finde forbedringsmuligheder, samt sammenligne med andre alternativer økonomisk.

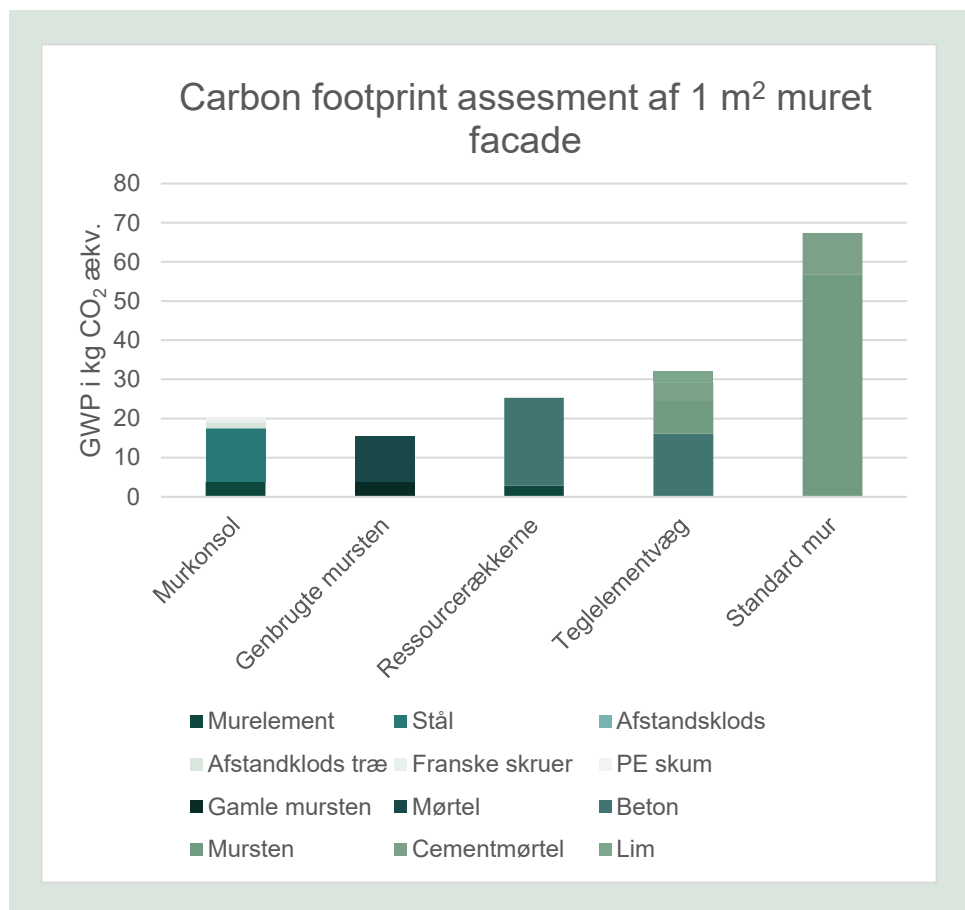
5.6.1 Carbon Footprint Assessment

For at undersøge hvorledes murkonsol konceptet performer klimamæssigt over dets levetid ift. sammenlignelige murfacadeopbygninger, der anvendes i dag, er der udført en carbon footprint assesment. Hertil er følgende funktionelle enhed benyttet:

”At forsyne 1 m² yderside af en bygning med beskyttelse mod vind og regn med et murstens-look i 50 år i Danmark”

Analysen systemafgrænses til faserne A1-A3 og C3-C4. Der er ikke inkluderet en D fase i analysen, hvilket indebærer, at der grundlæggende ikke forventes nogen genanvendelse eller genbrug af materialerne efter bygningens end-of-life fase, da disse processer ligger i fremtiden og ikke kan garanteres. Dataen benyttet i sammenligningen er baseret på alment anvendte materialer og byggekomponenter med generisk data fra databasen Ökobaudat. For genbrugte enkeltmursten, konventionel mur samt ressourcerækkerne er data fra SBI 2019:08 anvendt. I denne sammenligning antages det, at den bagvedliggende konstruktion er ens for alle alternativerne og ekskluderes dermed fra analyserne. Dog vil der ved sammenstøbte elementer (teglelementvæg og ressourcerækkerne) medtages den mængde beton som fastholder teglstene og stabiliserer konstruktionen. Desuden antages brugsfasen (B1-B7) at være ens, og er

derfor ekskluderet fra analysen. Herunder er det vigtigt at understreje at der antages en forventet levetid på 50 år for elementerne, og dermed ikke kalkuleres med udskiftninger i bygningsbrugsfase. I analysen er der defineret et cut-off kriterie på 1% af opbygningernes totale CO₂ udledning - er materialer i opbygningen under dette, ekskluderes de (murbindere i en standard mur er f.eks. ikke medtaget). I Bilag 10 ses yderligere detaljer om beregningsgrundlaget.



FIGUR 5.9. Carbon footprint analyse af 1 m² murfacade med opbygning i hhv. murelementer på murkonsoller, genbrugte mursten (genbrugte enkeltsten med kalkmørtel), Ressourcerækkerne (murelementer med betonbagplade), teglementvæg (med teglskaller) og en standard mur. Se TABEL 5.3 for beskrivelse af deres opbygning.

TABEL 5.3. Skema som illustrerer opbygning af elementer.

Murkonsol	Genbrugte mursten	Ressourcerækkerne	Teglementvæg	Standardmur
Genbrugt murelement (inkl. cementmørtel)	Genbrugte mursten	Genbrugt murelements element (inkl. kalkmørtel)	Teglskaller (tykkelse 20 mm.)	Nye mursten
Stålkonsol (Fra Jevith, type N med tilføjet stålplade)	Kalkmørtel	Armeret beton (50 mm.)	Cementbaseret fliseklæb	Cementmørtel
Franske Skruer			Armeret beton (5 cm.)	

Murkonsol	Genbrugte mursten	Ressourcerække	Teglementvæg	Standardmur
Bagstopper (PE-skum) i element-samlingerne			Cementmørtel	
Afstandsklods (horisontal monteringslægte) i træ				
Afstandsklods i genbrugsplast				

Det ses hermed at den udviklede løsning med brugte murelementer på murkonsoller er forbedret fra et carbon footprint perspektiv ift. det ældre design på Ressourcerækkerne og de øvrige sammenlignede løsninger. Desuden ses en signifikant forbedring ift. et standardmurværk af nye teglsten og cementmørtel. Det ses at resultatet fra denne murkonsol løsning rammer et niveau der næsten er tilsvarende til det at bygge med genbrugte enkeltsten med kalkmørtel. De to største påvirkninger på murkonsol løsningen er brugen af stål og processerne der bruges til nedtagningen af murelementet (A1-A3) – altså selve udskæring og høstningsprocessen.

I det følgende ses nærmere på løsningen Murkonsol og processerne som indgår i komponenterne hhv. murelementet og i murkonsollen i rustfrit stål.

Murelement:

Ca. 50% af den beregnede GWP fra murelementet kommer fra transport af elementerne fra udskæring til bearbejdning. Det antages at elementerne køres 100 km fra nedrivningen til oplagring og evt. bearbejdning. Det er udregnet ud fra en antagelse om en lastbil med forbrændingsmotor. Ca. 25% af den beregnede GWP for murelementet kommer fra affaldsbehandlingen – hér antages knusning og genanvendelse til ubundet bærelag og vejfyld (100% genanvendelsesandel). De sidste 25% kommer fra udskæringen og de tilhørende processer, og kommer hovedsageligt fra elektricitetsforbrug. Se detaljer for dette i Bilag 10.3, hvor alle processer er modelleret til udskæring af murelementet.

Murkonsol i rustfrit stål:

Produktionen af rustfrit stål benytter en stor mængde elektricitet med forbrug af fossilt brændstof, hvilket er den primære proces bag konsollens GWP. Desuden antages det i beregningen, at kun en mindre andel af materialet kommer fra genanvendt stål. Det er dog klart mængden af stål, der er væsentlig ift. CO₂-udledningen for denne løsning.

Genbrug:

Potentialet for genbrug (D modulet) er ikke modelleret i denne LCA, hvor det antages at materialerne ikke genbruges eller genanvendes. Denne antagelse er dog en konservativ betragtning ift. hvad vi kan forvente der vil ske med materialerne efter endt brug, hvor fx rustfrit stål genanvendes i høj grad. Derudover følger den udviklede løsning med murelementerne på murkonsoller principperne for design for adskillelse, med henblik på at det kan genbruges. Medregnes fremtidig cirkulering vil LCA'en se meget anderledes ud, forudsat at murelementerne har en yderligere resterende levetid på 50 år og kan indgå i endnu en bygning.

Usikkerhed:

Det skal pointeres, at der er benyttet generisk data i udregningen, og mere specifikke data hvor det har været muligt. Grundlaget for dette er at kunne sammenligne alle de analyserede opbygninger ud fra samme udgangspunkt. Der kan dog være store forskelle indenfor produkt-kategorierne. F.eks. er det muligt at vælge mursten, der har en lavere CO₂ udledning. Dataset

med det laveste GWP udledning var fundet til 10,22 kg CO₂-ækv. /m² facade (transport fraregnet). Dette er en faktor 5 mindre end det benyttede dataset. EPD'er med en udledning på 65.8 kg CO₂-ækv. /m² facade er også fundet. Dermed er det benyttede dataset vurderet repræsentativt for mursten generelt.

Hvis der i fremtidige projekter skal træffes beslutning mellem Murkonsol løsningen og en standardmur (hvor materiale vælges pba. den bedste EPD) vil man kunne opnå sammenlignelige resultater på klimabelastningen. Dette indikerer at der er områder hvor Murkonsolløsningen kan optimeres yderligere, som fremhæves under afsnittet fremtidige optimeringspotentialer i slutningen af dette kapitel.

5.6.2 Anlægsomkostning

På FIGUR 5.10 ses resultaterne af en indledende analyse anlægsomkostninger med Murkonsol løsningen baseret på demonstrationsprojektet på udstilling "Planetary Boundaries", erfaringer fra nedrivningsprojekter samt indhentede priser fra producenter. Alle priser er regnet ekskl. moms.

I analysen tages der udgangspunkt i en case hvor der udkæres 100 m² facade, hvoraf f.eks. testomkostninger fordeles på alle disse elementer. Forudsætningerne for udkæringen er som beskrevet i kapitel 3. Der regnes med at disse opbevares i en 40 fods container i et år og der tages desuden højde for den undgåede afgift til bortskaffelse af murværket, som vil opnås i nedrivningsprojektet. Fugning mellem elementerne er der antages lignende forhold som for vinduer¹³.

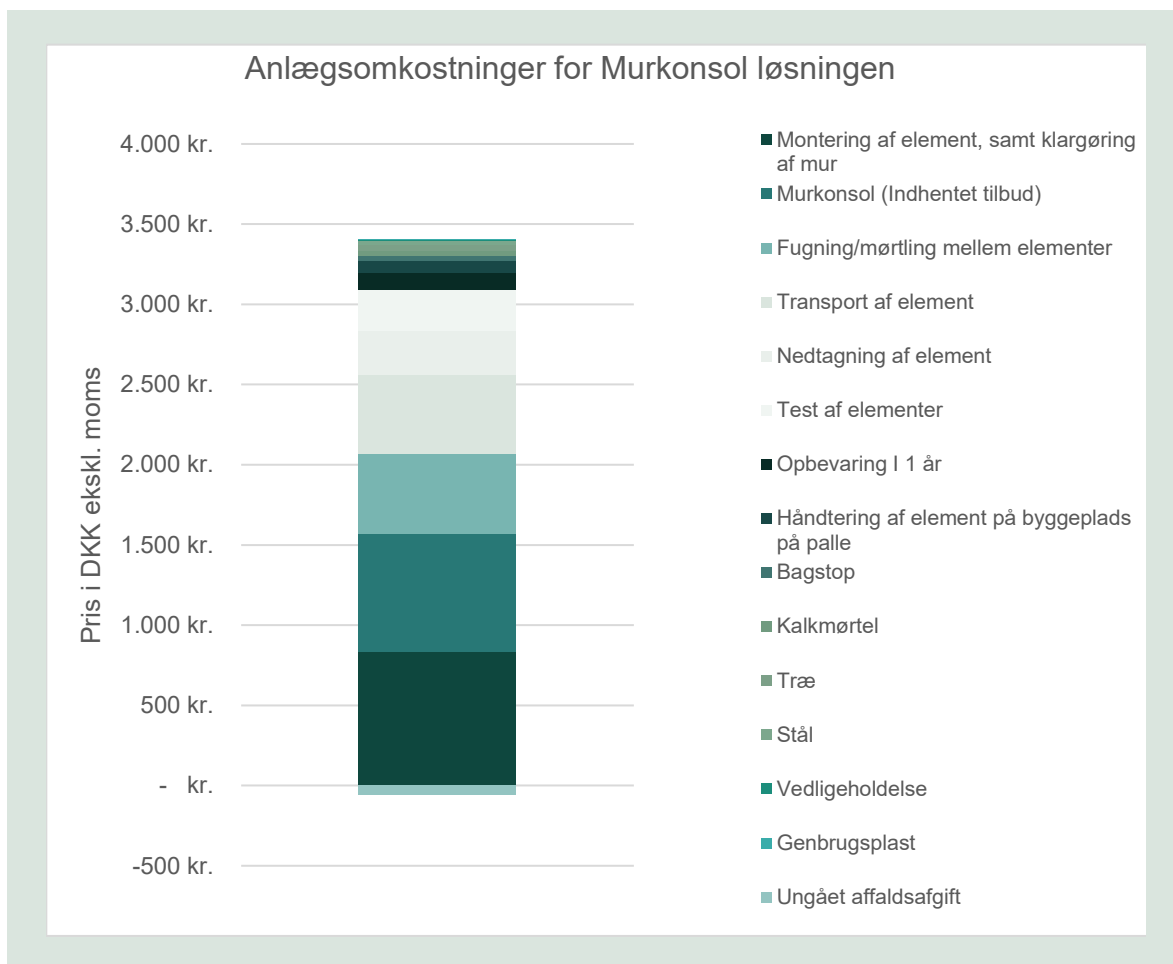
Der ses bort fra vedligehold i analyserne da denne anses som værende ens for de respektive scenarier for murværk og desuden vurderes til at være marginal¹⁴.

Priser for montering tager udgangspunkt i erfaringer fra udstillingen "Planetary Boundaries", hvor montører arbejdede med elementerne første gang. Efter udstillingen har de selvsamme montører taget elementerne ned og opsat dem igen, hvorfra der oplevedes en klar forbedring i tidsforbrug. Dette er inkluderet i en analyse med en optimeret løsning, og peger i retning af at der hurtigt kan oplæres personale i fremtiden. Opsætningstiden kunne i gennemsnit gennemføres på omkring 15 min for 2 personer, og nedtagningstiden tog i snit 9 minutter. Dette tyder desuden på en fordelagtig og optimal proces for fremtidig cirkulering. Desuden er der i den optimerede løsning taget udgangspunkt i en standard murkonsol som ikke er speciallavet, at der kan fuges på den halve tid, og at der ikke skal betales for opbevaring hvilket kan være tilfældet i nogle scenarier i fremtiden.

Til slut ses på en sammenligning på tværs af de løsninger der også er sammenlignet med ift. klimapåvirkning. Her er der taget udgangspunkt i erfaringstal fra Ressourcerækkerne hvor konstruktionen, isolering og vedligehold er ekskluderet fra analysen. Standardmuren der sammenlignes med, er fra Molios prisdatabase (2024) med udgangspunkt i fagdelen "Skalmur gul maskinsten/ribbet S-binder".

¹³ [Priser på fugning ifølge Københavns Fugeservice](#)

¹⁴ 7 DKK/m² ifølge [Danske Tegl](#)

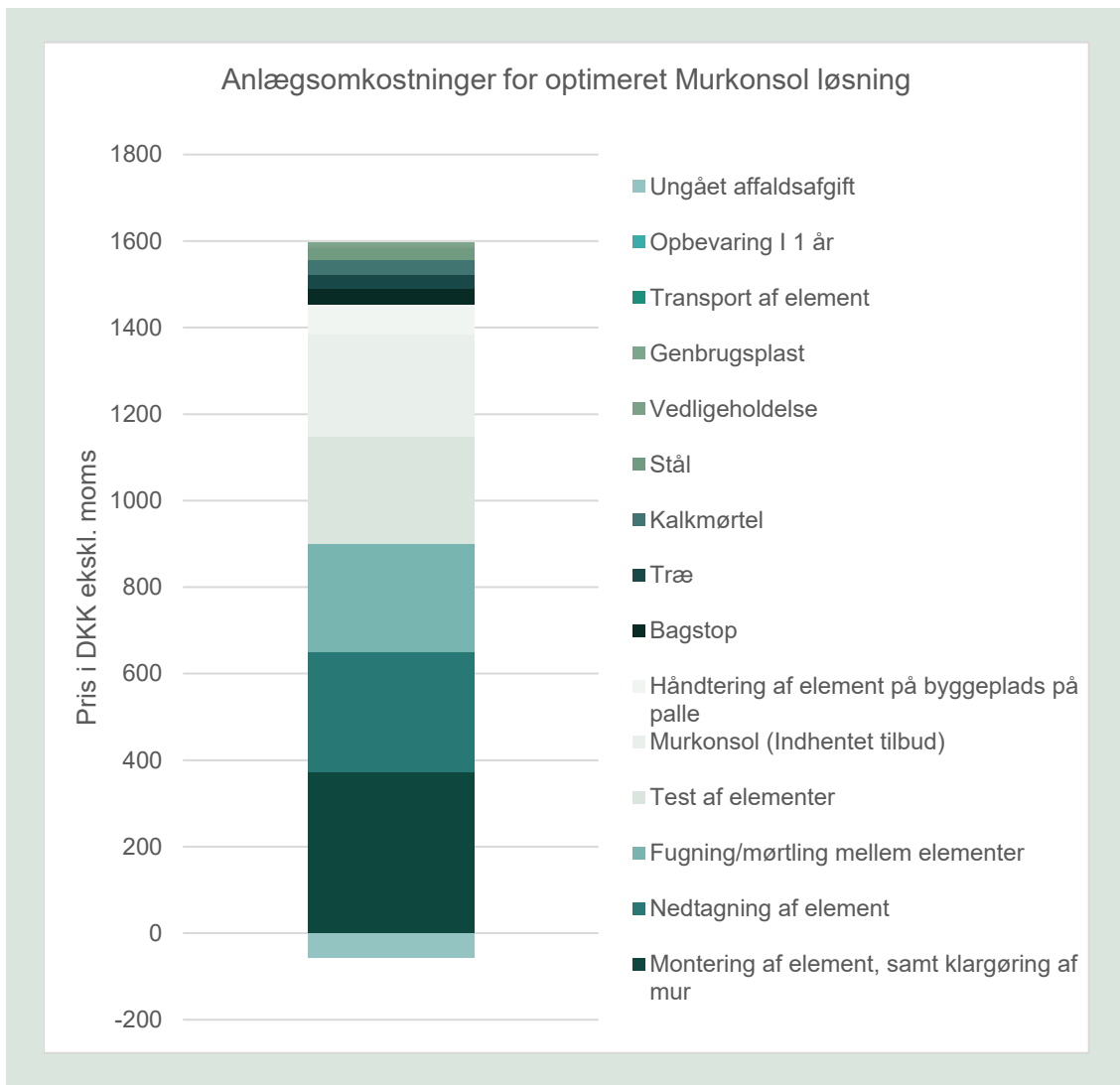


FIGUR 5.10. Anlægsomkostningerne for murkonsol løsningen. Se Bilag 11.1 for yderligere detaljer.

Fra analysen fremhæves følgende 5 hovedpointer:

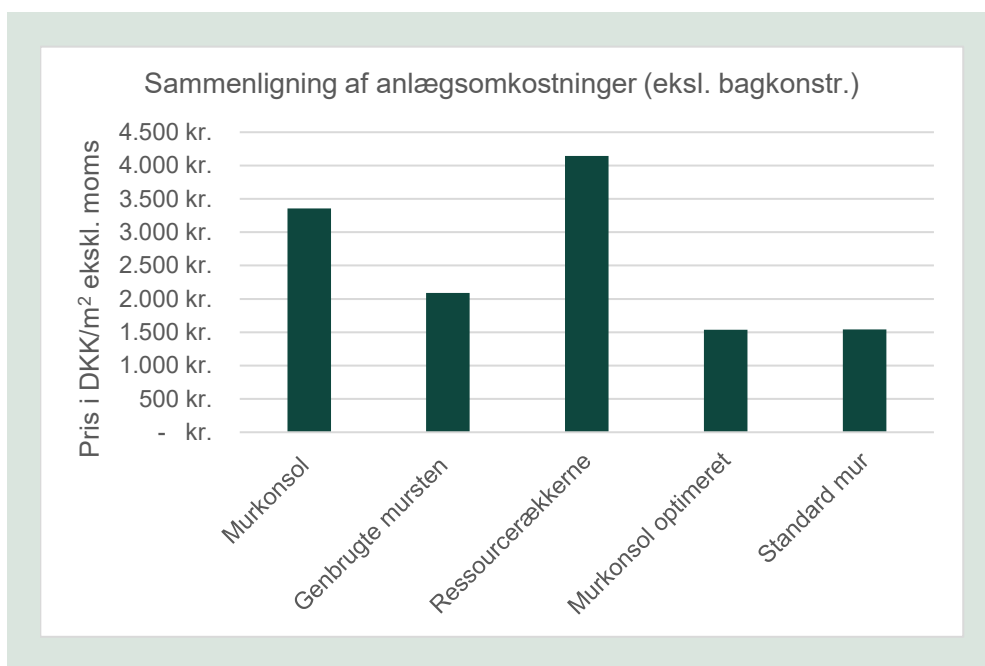
- Montering af elementerne og klargøring af muren står for 25 %. Af disse 25 % er størstedelen klargøring af muren (dvs. montering af murkonsol, fastsættelse af afstandselement, opmåling, osv.). Her er plads til en del forbedringer, som foreslås i en analyse af en optimeret løsning.
- Murkonsollen står for ca. 22 % af omkostningerne. Denne pris kan forventes at være mindre ved indkøb af en større mængde og standardiserede produkter.
- Fugning mellem elementer står pt. for 15%. Denne pris er dog estimeret ud fra vinduesfugning og kunne dermed være en del lavere.
- Transport af elementerne står for 14 % af omkostningerne. Opbevares elementerne on site vil denne omkostning undgås. Desuden vil det forventeligt blive mindre ved større projekter.
- Nedtagningen og det forberedende arbejde står for ca. 10 %. Denne kan dog have større udsving baseret på mængden der nedrives. For yderligere detaljer se afsnit 6.

Sammenlignet med omkostningerne ved en standard opmuret facade på 1.540 kr./m², vil prisen på den udviklede murkonsol løsning med upcyclede murelementer være cirka 118 % højere pr. m². I forhold til det tidligere design er prisen reduceret med 19 %. Det er vigtigt at understrege, at der kan forekomme variationer, og at priserne kan optimeres betydeligt, hvilket forventes at føre til en reduktion af omkostningerne. På FIGUR 5.10 ses et prisestimat på en optimeret løsning og proces.



FIGUR 5.11. Optimerede løsning af murkonsol løsningen. Se Bilag 11.2 for yderligere detaljer.

Grundlaget for denne udregning findes i Bilag 11.2, hvor prisen forventes at være omkring 1.540 kr./m², hvilket er sammenligneligt med priserne for en standard mur. På FIGUR 5.12 ses en sammenligning af forskellige murebygninger.



FIGUR 5.12. Økonomisk sammenligning af murede facader. Der er en vis usikkerhed på disse og de bør derfor ikke bruges til at estimere projekter men kan ses som en indikation af prisoverslag.

Fremtidige optimeringsparametre

Konstruktionsoptimering er nøglen til at reducere klimabelastningen og ressourceforbruget yderligere. Her ses forbedringspotentialer i anvendelsen af mindre stål, 100% recirkuleret stål, geometrioptimering og eventuel brug af alternative, bæredygtige materialer. Yderligere reduktioner af klimabelastninger kan opnås igennem procesmæssige forbedringer, herunder minimering af transport og fossilfri transport, dvs. el-drevne nedrivnings- og byggearbejder samt lastvogne. Optimal stål-konsolproduktion kræver skræddersyede løsninger og en veldefineret monteringssekvens for effektivitet og kvalitet.

Økonomiske optimeringer kan særligt findes i at effektivisere arbejdsprocesser og reducere priserne for indkøb af murkonsoller. Disse optimeringer forventes at kunne indfries i takt med personale opbygger erfaring samt anvendelsen af upcycledede murelementer kan skaleres.

6. Markeds- og skaleringspotentiale

Videreudviklingen af udskæringsværktøj og udskårne murfelter som byggevare er afhængig af det forretningsmæssige potentiale for at introducere udviklingen og produktet på markedet. Dette kapitel gennemgår analyser af markedet - og forretningspotentialet for at få en dybere forståelse for samt foreslå en forretningsmodel for produktet. Dette med henblik på at sikre at det er relevant for en virksomhed at etablere sig på marked for at udskære murelementer.

6.1 Marked

Dette afsnit har til formål at undersøge den nuværende markedstilstand og tendenser, som vil påvirke den fremtidige udskæring og salg af murelementerne. Afsnittet indeholder desuden en analyse af markedsandel, det potentielle kundesegment samt hvilke alternative anvendelsesmuligheder murelementerne kan have inden for andre industrier.

Potentialet og interessen for at høste murelementer sigter mod at udnytte den stigende efterspørgsel efter løsninger der kan tilvejebringe en mere bæredygtig praksis og som bidrager til en omstilling til cirkulær økonomi. Dette gøres ved at levere produktet og servicen at screene, udskære og transportere 1m² høstede murelementer, som skal genbruges eller upcycles, og dermed reducerer affaldsproduktionen eller downcyclingen af mursten fra nedrivninger.

Markedspotentialet vurderes ved at kortlægge markedstilstanden, størrelse, kernesegment og anvendelsesmuligheder. Markedspotentialet analyseres på baggrund af skaleringsmuligheder og trends for at vurdere den fremtidige markedsandel.

6.1.1 Markedstilstand og baggrund

Ud fra relevante markedsfaktorer vurderes hvilke af disse der har størst indflydelse på produktet, for at identificere mulige barrierer og katalysatorer for høstede murelementer.

De primære politiske og lovgivningsmæssige faktorer

De primære politiske og lovgivningsmæssige faktorer, der påvirker markedet, er de eksisterende standarder og reguleringer i det byggede miljø, som er essentielle at forholde sig til. Derfor sættes der krav til at produktet lever op til de bygningsstandarder og krav, som er gældende for facadebeklædning af tegl - hvilket murelementerne testes for inden udskæring.



Der ses en stigende udvikling i nye politiske tiltag og lovforslag der indføres for at reducere affaldsproduktion og miljøpåvirkning i det byggede miljø samt fremme genbrug og cirkulering af bygningskomponenter. Lovforslag og tiltag såsom lovforslaget om selektiv nedrivning fra 2024, krav om livscyklusanalyser for bygninger, taksonomiforordningen, miljøcertificeringer osv. vil komme til at påvirke genbrug af bygningskomponenter i fremtiden. Fx vil kravet til dokumentation

af CO₂ ækvivalenter per m² have indflydelse på opførelsen af nyt byggeri over 1.000m² fra 2023, og helt ned til 50m² fra medio 2025¹⁵.

De økonomiske faktorer

Byggeindustrien er i høj grad styret af økonomi. Markedet sætter krav til at produkterne bliver produceret hurtigt og billigt, hvilket vil være en stor trussel for at kunne etablere sig i industrien. Der ses dog i stigende grad villighed til at bygherre og slutbrugere vil betale mere for byggematerialer og boliger som er positioneret som "grønne" også kaldet "green premium"¹⁶. Dette vil være med til at sikre produktets fremtidige konkurrenceevne.



De teknologiske faktorer

De teknologiske faktorer vurderes at have en betydelig indflydelse på produktet. Den mest afgørende faktor for standardisering af høstningsprocessen er det tekniske høstningsværktøj. Det udviklede udskæringsværktøj og de tilhørende processer til håndtering af elementerne er blevet optimeret for at sikre, at murelementerne forbliver intakte med en høj succesrate for hele processen.



En betydelig teknologisk faktor er den manglende gennemsigthed i branchen. Det er afgørende for den fremtidige høstning og salg murelementer, at kunne identificere hvornår bygninger skal nedrives, der eventuelt kan benyttes som donorbygning, samt hvor og hvornår en tilsvarende ny bygning (modtagerbygning) skal opføres. Derved bliver det afgørende at koble donorbygning og aftagerbygning med hinanden, hvilket vil øge muligheden for at skalere murelementerne som byggekomponent.

De miljømæssige faktorer

Nye miljømæssige tendenser har medført en stigende forbrugerbevidsthed og opmærksomhed på bæredygtige alternativer. I nedrivningsklare bygninger hvor der er benyttet cementmørtel, bliver udskæring af murelementerne en afgørende metode til reduktion af CO₂-ækv., brugen af råmaterialer og affaldsproduktion i det byggede miljø. Organisationer og bygherrer favoriserer i stigende grad genbrug og renovering frem for bortskaffelse og produktion med nyudvundne materialer¹⁷. Den stigende bevidsthed og efterspørgsel af grøn byggepraksis sikrer et attraktivt marked for en virksomhed, der fokuserer på genbrug af bygningskomponenter, at etablere sig i.



De nye politiske tiltag og lovforslag samt de miljømæssige tendenser gør det til et relevant tidspunkt for en virksomhed at etablere sig på markedet for at levere produktet og servicen at screene, udskære og transportere høstede murelementer. Derudover vil en tidlig indtrædelse på markedet, etablere virksomheden som frontløber på området, hvilket giver en konkurrencefordel over for potentielle fremtidige konkurrenter. En af de største trusler er den manglende gennemsigtheden i branchen, som der gør det udfordrende at koble donorbygning og opførelse af nye projekter sammen. Dette undersøges igennem i de to næste afsnit "markedsstrørelsen og kundesegmentet", og der udvikles strategier for at håndtere denne udfordring i den anbefalede forretningsmodel.

Desuden er der en trussel i de økonomiske udsigter for at skabe en profitabel forretning. Det er helt afgørende at virksomheden kan tjene penge på deres service eller salg af murelementerne. Dette undersøges i kapitel A6.2.6 *Prissætning*.

¹⁵ [Klimakrav \(LCA\) i bygningsreglementet](#)

¹⁶ SOLUTION Circular Buildings, 2020, Lendager, A., Pedersen, E.

¹⁷ [Fra Aalborg til København: 14 offentlige, almene og private bygherrer vil have mere genbrug i byggeriet](#)

6.1.2 Markedsstørrelsen

Markedsstørrelsen defineres primært ud fra mængden af materiale som kan anskaffes, da dette repræsenterer den potentielle produktion af murelementer og reduktion af affaldsmængde. Her ved undersøges det aktuelle marked som nedrivninger af eksisterende bygninger. Der forventes at være interesse for aftagning af murelementerne, grundet det støt stigende antal m² nybyggeri¹⁸ og deres øgede efterspørgsel efter cirkulære genbrugte byggematerialer¹⁹.

6.1.2.1 Høstbar mur i Danmark

Det skal understreges at dette produkt ikke skal fremme nedrivningen af nye bygninger. Desuden er der et krav til alderen af donorbbygningen grundet cementmørtelens indførelse, hvilket blev introduceret i 1965, og det kan antages, at det først blev mere almen praksis omkring 1980 at benytte denne type mørtel. Dermed er omfanget for nedrevne murstensbygninger afgrænset til byggeri fra mellem 1980 og 2000. Som algoritme programmet viser i kapitel 3, er det ikke hele facaden der kan udskæres. Den totale bygningsmasse i Danmark, der imødekommer disse krav, er ca. 57.000.000 m² etageareal²⁰. Det forventes at ca. 70 % af disse typologier er egnet til udskæring, og af disse 70% vil 95% kunne anvendes, ikke blive beskadiget under udskæringen og sælges. Selv med disse nedsatte mængder, er det en betydelig ressource, der endnu ikke udnyttes i dag, og derved er forretningspotentialt stort. Denne analyse behandler kun det nationale danske marked og værktøjet samt forretningsmodellen forventes at kunne udbredes globalt.

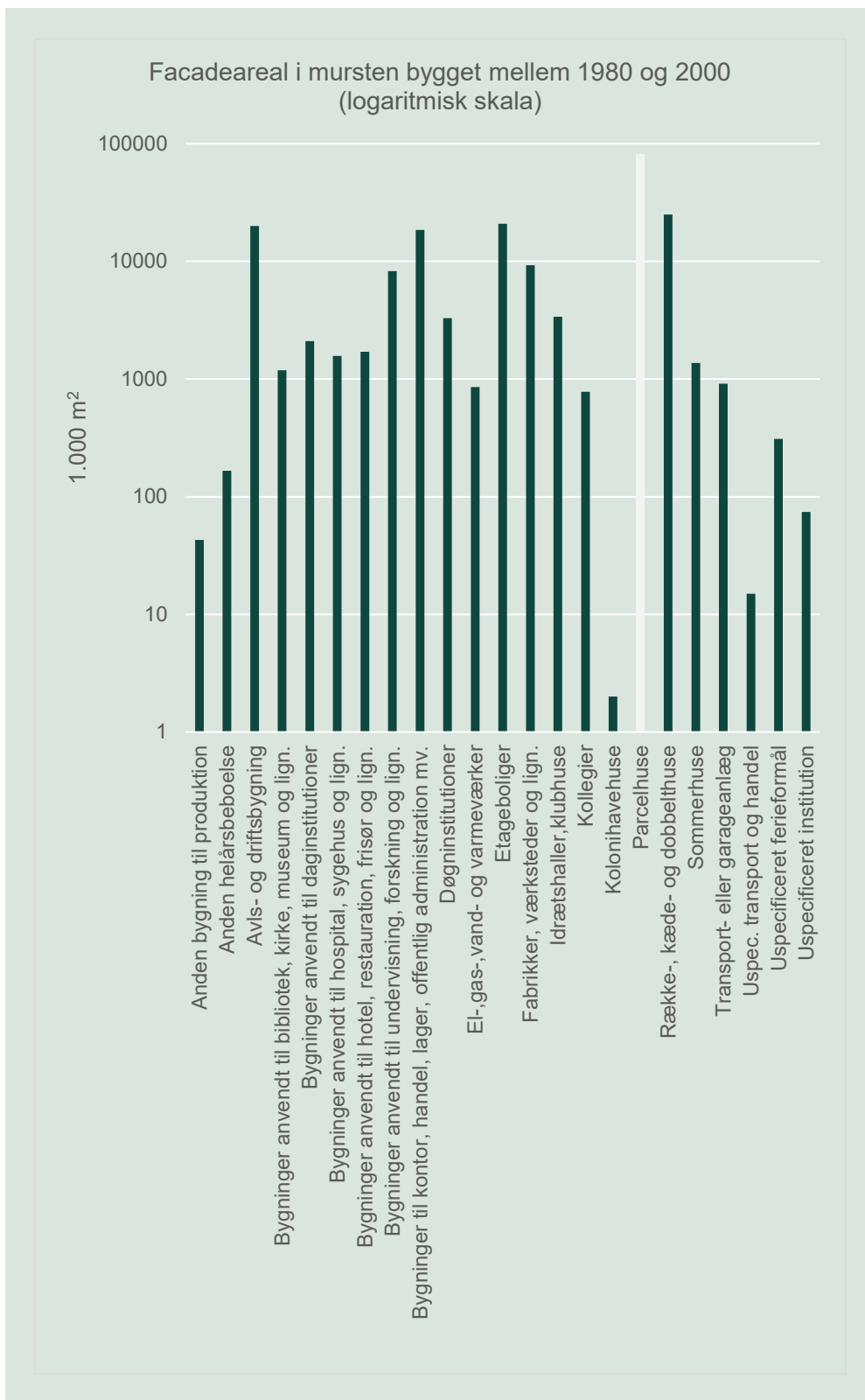
6.1.2.2 Bygningstyper

Det antages at nedrivningsprojekter, som vil benytte denne service, kræver en vis størrelse. Her bør parcelhuse fratrækkes da de højst sandsynligt ikke har et stort nok facadeareal på over 100m² høstbar mur som vurderes at være minimumskriterie for at være økonomisk rentabelt. Dette svarer til 55 % af denne masse. Denne antagelse skal dog testes i virkeligheden, da mængden af mulige nedrivningssites ville blive en del større.

¹⁸ Cirkulær økonomi i byggeriet [Temaark #2 Byggeriet som ressourcebank](#)

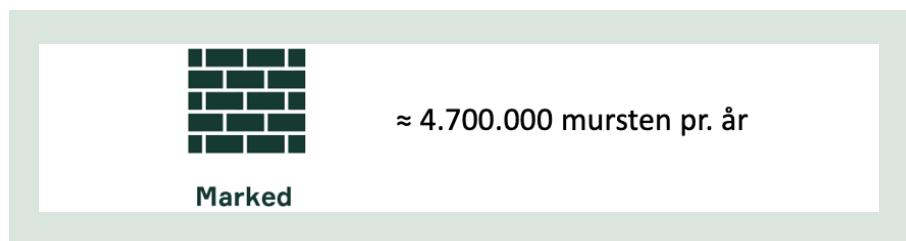
¹⁹ Bolius artikel: [Vi kan hjælpe klimaet, når vi vælger byggematerialer](#)

²⁰ [Dansk statistik](#)



FIGUR 6.1. [Fra Dansk statistik, hentet d. 4/6/2023.](#)

Ifølge Teknologisk Institut bliver ca. 0,3 % af den danske bygningsmasse revet ned hvert år²¹. Regnes med denne nedrivningsfaktor, vil ca. 75.000 m² etageareal være høstbart murværk der kan blive skåret ud til murelementer. Regnes med en faktor 1:1 mellem etageareal og m² murstensfacade er dette en markedsstørrelse på ca. 4.700.000 mursten pr. år.²²



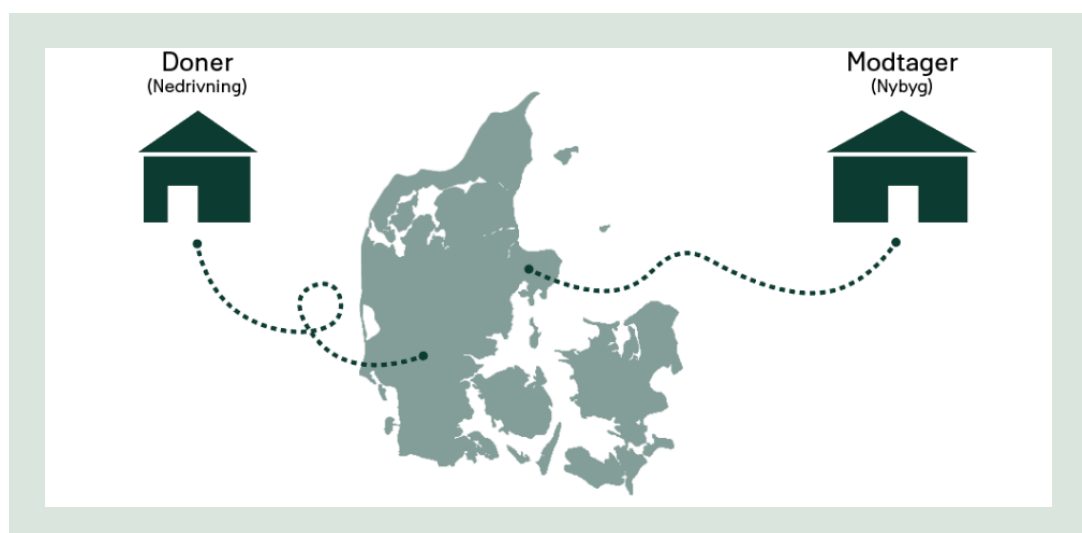
FIGUR 6.2. Estimerede mængder mursten der kan udskæres årligt

6.1.3 Kundesegment

Der vurderes at være to primære kundesegmenter:

1) Bygherrer der skal nedrive en bygning: Her udføres servicen at høste murelementerne for at reducere affaldsmængden og drive en ressourcebevidst forretning.

2) Bygherrer der skal opføre ny bygning: Her kan murelementerne sælges som materiale (f.eks. facadebeklædning) for at reducere udvinding af råstoffer og ny produktion.



FIGUR 6.3. Illustration der visualiserer den geografiske placering af forskellige aktører.

6.1.3.1 Etablere "matchmaking"

En afgørende aktivitet for at kunne udføre høstningen af murelementerne er at identificere et "match" mellem en bygning, der skal nedrives (donor-bygning), og en ny bygning der skal opføres (modtagerbygning). Dette anses som en nøgleudfordring. Koordinering mellem de involverede parter er afgørende for en optimal matchmaking mellem donorbygning og nybyg. Der er bl.a. to faktorer, som skal matches:

²¹ [Fremtidens byggematerialer – har vi mangel på råstoffer?](#)

²² Fra den totale mængde høstbar mur (over 100 m² facade i mursten), regnes det med at 75.000 m² rives ned hvert år der er bygget mellem 1980 og 2000. Med 63 mursten pr. m², svarer dette til ca 4.700.000 mursten.

Matche **tidspunktet** for nedrivning af donorbygning og opførelse af nyt byggeri, som skal finde sted indenfor en rimelig tidshorizont, for at reducere omkostningerne for opbevaring af murelementerne.



Ligeledes er den **geografiske lokation** for projekterne afgørende, da det reducerer de økonomiske omkostninger og klimabelastningen ved transport af murelementerne.



6.1.3.2 Udbuddets betydning & bygherres indflydelse

Det vurderes at være afgørende, at der er interesse fra bygherrer med donorbygningen til at genbruge og upcycle materialer fra deres nedrivning samt at dette er indskrevet i udbuddet for nedrivningen.

Der vil mest sandsynligt være en nedriver, der vinder udbuddet, som ansætter en virksomhed til at udskære murelementerne eller selv varetager denne opgave. I forlængelse af udbud er tidlig planlægning mellem bygherre og nedriver ligeledes essentielt for at sikre en strømlinet proces. Dette er specielt gældende for planlægning af hvornår høstningen af murelementerne skal finde sted under nedrivningen.

6.1.3.3 Det ideelle kundescenarie

Det kræver samarbejde på tværs af aktører og et veletableret netværk og planlægning for at opnå en succesfuld udveksling af høstning og upcycling af murelementer mellem bygninger. Matchmaking vurderes at være en af de største udfordringer for en virksomhed der etablerer sig på markedet. For at reducere behovet for planlægning og matchmaking, anbefales der at arbejde med en bygherre, der ejer både donor- og modtagerbygning. Dvs. at servicen leveres til bygherre, der ønsker at cirkulere materialer internt i deres portefølje. Denne model er udforsket i afsnit 6.2 Forretningsmodel og implementeringsstrategi.

6.1.4 Anvendelsesmuligheder

Det vurderes at anvendelse af murelementerne primært vil være relevant indenfor det byggede miljø med følgende tre brugsmuligheder. Anvendelsesmulighederne er præsenteret i prioriteret rækkefølge:

1. Facadebeklædning (som vurderes at have den største CO₂-besparelsen ved at erstatte ny produktion af nyt facademateriale i tegl)
1. Andet byggekomponent.
2. Teoretisk set kan murelementerne anvendes til andre formål fx til belægninger eller i andre industrier. De kunne for eksempel bruges i dekorative eller kunstneriske sammenhænge. Dog bør anvendelsesområdet overvejes med henblik på hhv. elementernes vægt og miljømæssig besparelse ift. det produkt det vil erstatte.

6.1.5 Vurdering af markedspotentialet

Der vurderes på baggrund af markedsanalysen, at der er et tilpas stort marked og at det desuden er et attraktivt tidspunkt af etablere sig på. Derudover vurderes det, at der er en række af alternative brugsmuligheder og skaleringsmuligheder, der gør det ekstra relevant for en forretning at indtræde på markedet.

6.2 Forretningsmodel og implementeringsstrategi

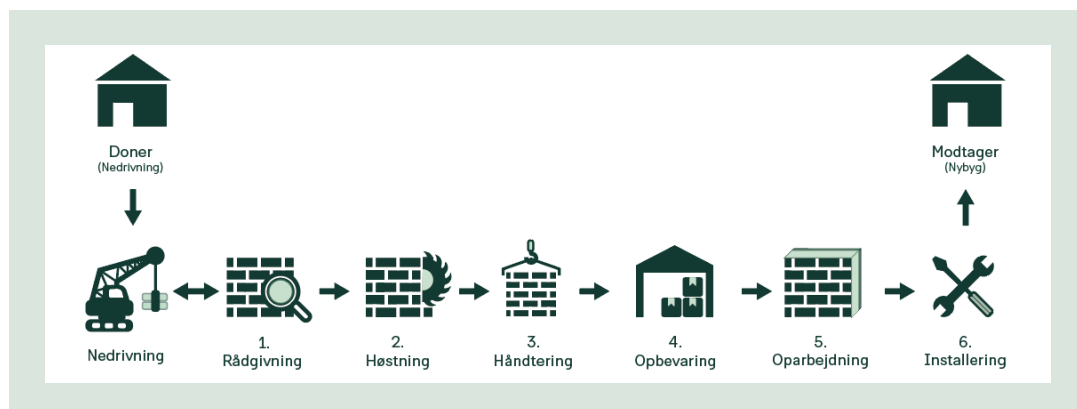
Dette afsnit har til formål opsamle de konkrete kerneaktiviteter for udskæring af murelementerne og hvilke værdiskabelser og risici, der er forbundet med disse aktiviteter. Yderligere præsenteres den anbefalede forretningsmodel samt skaleringsmuligheder.



6.2.1 Værdiskabelse

Projektet skal bidrage til at realisere muligheden for at genbruge og upcycle murelementer med cementmørtel, ved at optimere og standardisere processen for udskæring og oparbejdning. Derved er den primære værdiskabelse at reducere CO₂ udledningerne ved at bygge med

tegl, samt at reducere den nuværende affaldsproduktion af mursten. Yderligere vil dette medføre en reduktion i udvindingen af nye råstoffer til produktion af nye mursten, som vil være med til at imødekomme den nuværende efterspørgsel på teglfacader på markedet. For at realisere upcycling af murværk med cementmørtel, vurderes udskæringen af murelementerne til at være en passende intervention. Det kan dog være en meget tidskrævende, risikofyldt og omkostningstung proces. Derfor præsenteres der en række betragtninger og anbefalinger for at etablere en profitabel virksomhed.



FIGUR 6.4. Diagram som viser aktiviteterne relateret til udskæring og upcycling af murelementer med cementmørtel.

6.2.2 Etablering af virksomhed

For at vurdere om det er profitabelt og relevant for en virksomhed at etablere sig på markedet, er det afgørende at estimere et overslag på omkostningerne for at etablere sig og operere på markedet.

Udgifter relateret til køb eller leje af værktøj:

- Udskæringsværktøj som beskrevet i kapitel 3
- Algoritme til at analysere mængden
- Andet værktøj og maskiner: kran, udstyr til test af murværk etc.

Virksomhedens konkurrencemæssige fordel sikres gennem ekspertise og erfaring, som opbygges ved at udføre servicen at udskære og håndtere murelementer. Derfor er det afgørende, at dem, der udfører arbejdet, får omfattende træning i brugen af værktøjerne. Virksomhedens succes afhænger blandt andet af den succesrate for høstning, som kan opnås. For at sikre et udskæringsarbejdes succes skal høstingsraten være relativt høj (85 % effektivitet og 95% af de høstede elementer skal kunne sælges), da lavere succesrater kan have betydelige økonomiske konsekvenser (se kapitel 3).

6.2.3 Kerneaktiviteter

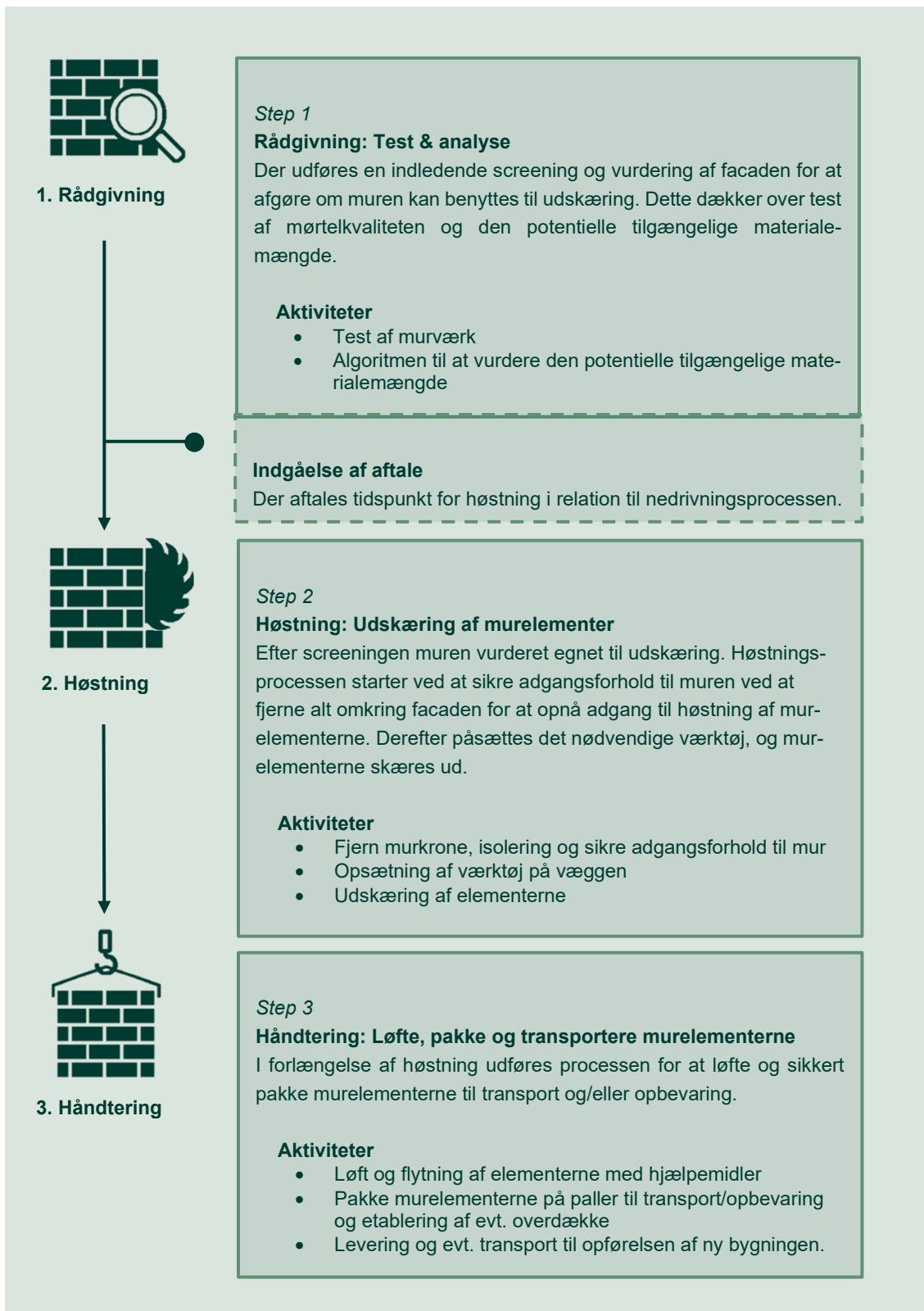
Der er tre kerneaktiviteter som virksomheden skal kunne levere i forbindelse med udskæring af murelementer:



MUDP
Værktøj



Andet
Værktøj



FIGUR 6.5. Kerneaktiviteter for virksomhed for murudskæring

6.2.4 Konkurrencemæssig fordel

Den primære konkurrencemæssige fordel vil være virksomhedens ekspertise og erfaring med det tekniske værktøj, og eventuel rådgivning. Derved er grundig oplæring og undervisning af personale afgørende for en potentiel virksomheds position på markedet. Dette vil yderligere

bidrage til at minimere risiko, øge sikkerhed og optimere processen for at genbruge murelementerne generelt.

Denne tilgang til upcycling af murelementer, er et tydeligt eksempel på hvordan en organisation eller projekt kan benytte deres eksisterende ressourcer og viden til ny værdiskabelse i form af et nyt produkt - i stedet for at bidrage til ressourceforbrug og affaldsproduktion.

Alternative produkter og konkurrenter

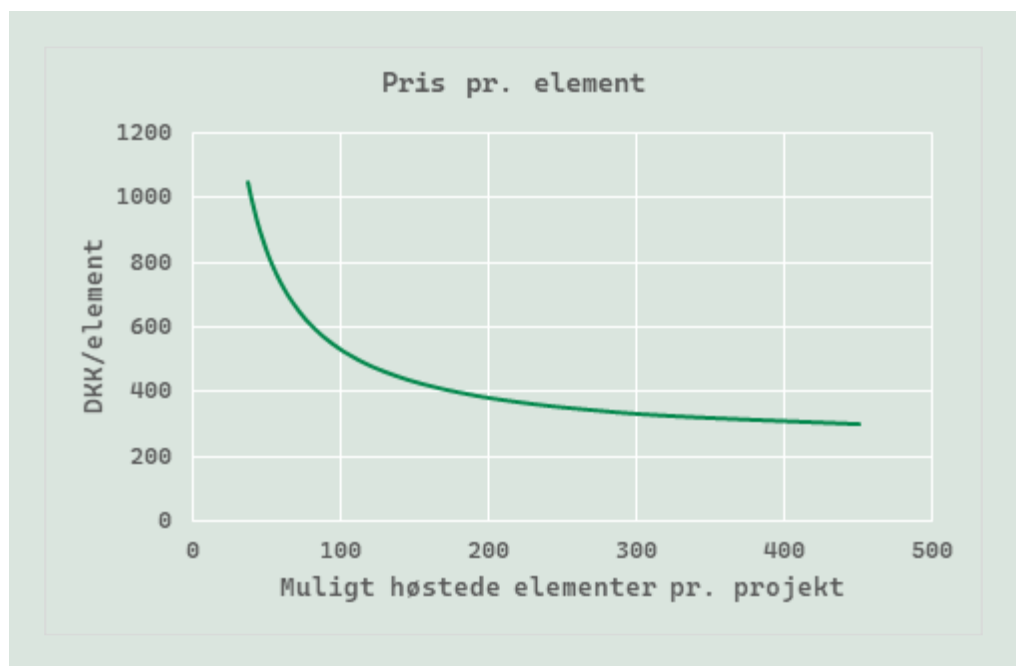
- Der er ikke mange udbydere på markedet at vælge imellem, da det kræver en markant mængde udstyr og erfaring at udskære murelementerne.
- I forhold til substituerende eller alternative produkter vurderes virksomhedens største konkurrencemæssige fordel at være murelementernes positive miljøpåvirkning. Derudover er der en konkurrencemæssig fordel i den kulturelle værdiskabelse ved den unikke fortælling om materialet, som skabes ved at upcycle murelementerne.

Kunder, relation og værdiskabelse

- Det vurderes at kunderelationen er afgørende. Der vil derfor være en stor interesse for at arbejde med bygherrer med en stor bygningsportefølje. Derved opstår synergi- og skaleringsmuligheder indenfor porteføljehåndtering hos den samme kunde.
- Kunder tiltrækkes ved at tilbyde et miljøvenligt byggemateriale, som monteres på bygningen via et standardiseret monteringsssystem. Murelementerne giver ejendomsudviklere og arkitekter mulighed for at træffe et praktisk og bæredygtigt valg indenfor byggematerialer, hvor brand-værdi af deres projekter øges. Murelementerne vil meget synligt bidrage til denne fortælling om at være miljømæssigt ansvarlige.

6.2.5 Prissætning

Med mange variable er det svært at fastsætte en standardpris for dette produkt. Dog er det muligt at have projektspecifikke priser, hvilket f.eks. virksomheden 'Gamle Mursten' også opererer med. Nedenunder ses en graf der danner et overblik over priser baseret på muligt høstede elementer. Denne pris er udelukkende for høstning og håndtering af elementerne. (Se Bilag 12 for udregnings grundlag).



FIGUR 6.6. Pris per element ift. muligt høstede elementer i et projekt.

Dette er udelukkende en vejledende prissætning – dog er det muligt at trække nogle konklusioner fra dette. Haves et projekt med mulighed for udskæring af mere end 100 elementer har man et mere robust projekt (dvs. prisen svinger ikke så meget hvis der høstes mindre end forventet), hvor prisen kan have et større prismæssigt udsving på mindre projekter. Med antagelse om en høstningsrate på 80% (85% effektivitet * 95% salgbare murelementer), svarer det til ca. 125 m² murstensfacade. Alternativt kan der fastsættes en pris, og dernæst defineres at projekter, som er mindre end dette ikke er interessante. F.eks. hvis der fastsættes en pris på 600 kr.pr element vil 80 elementer være minimumskrav til antal høstede salgbare elementer. Ved estimering af mulige elementer anbefales det at regne med at 15 % ikke kan høstes, og at der fokuseres på "murstriber" (mur uden facadebrud som vinduer eller døre) til at starte med da disse er lettest af udskære med en fordelagtig effektivitet.

6.2.6 Variable i prissætning

Priserne på det endelige produkt varierer afhængigt af flere faktorer, herunder den geografiske placering, valget af design til opsætning og fleksibiliteten i projektet. De tre mest betydelige faktorer anses for at være den geografiske placering, fleksibilitet i forhold til leveringstidspunktet og den krævede mængde af materialer.

Den geografiske lokation

Geografi vil være afgørende for om det økonomiske budget er realistisk og om projektet vil være miljømæssigt gavnligt. Lang transport mellem nedrivning og det nye projekt vil have betydelige omkostninger. Desuden tilstræbes at anvende materialer lokalt for at skabe kulturel tilknytning og en relaterbar historie for området. I scenarier hvor materialer kan anvendes lokalt vil elementerne være både økonomisk, kulturelt og miljømæssigt værdiskabende.



Opbevaring

Opbevaringen af murelementerne over længere tid kan give et stort økonomisk udsving. Der kræves koordinering mellem tidspunktet for henholdsvis nedrivnings- og byggeprojekter, for at minimere logistikken mest muligt. Projekterne opfordres til at tilbyde fleksibilitet af nedrivning- og opførelsestidspunktet for at optimere processen.



Høstningsmængde

Mængden af murelementer, som kan høstes på et projekt, er afgørende. Der sættes krav til at der som minimum skal kunne høstes 100 murelementer for at det er relevant at påbegynde høstningen af en bygning. Derudover er placeringen af elementerne afgørende for høstningen, da det er et større økonomisk gevinst ved at høste flere elementer i samme vertikale placering.



6.2.7 Mulige forretningsmodeller

I afsnit 2.2 er der opstillet mulige aftagerscenarier, hvor det blev konkluderet at scenarie 2 er mest favorabelt med den nuværende situation i markedet (bygherre A beholder egen bygningsmasse og murelementer). Baseret på denne analyse af aftagerscenarier er der anbefalet en forretningsmodel, der forventes at være mest realistisk at implementere. Den anbefalede forretningsmodel og skaleringspotentialer findes efter konklusion på det økonomisk potentiale.

6.2.8 Opsummeret økonomisk potentiale

I opstart af eventuel virksomhed kan følgende betragtninger overvejes:

Hvilke opstartsomkostninger forventes?	fx ≈ 350.000 kr. (jf. kapitel 3)
Hvad kan man få for at udføre servicen*?	fx ≈ 600 kr./m ²
Hvor mange materialer er tilgængelige?	fx ≈ 75.000 m ² årligt.

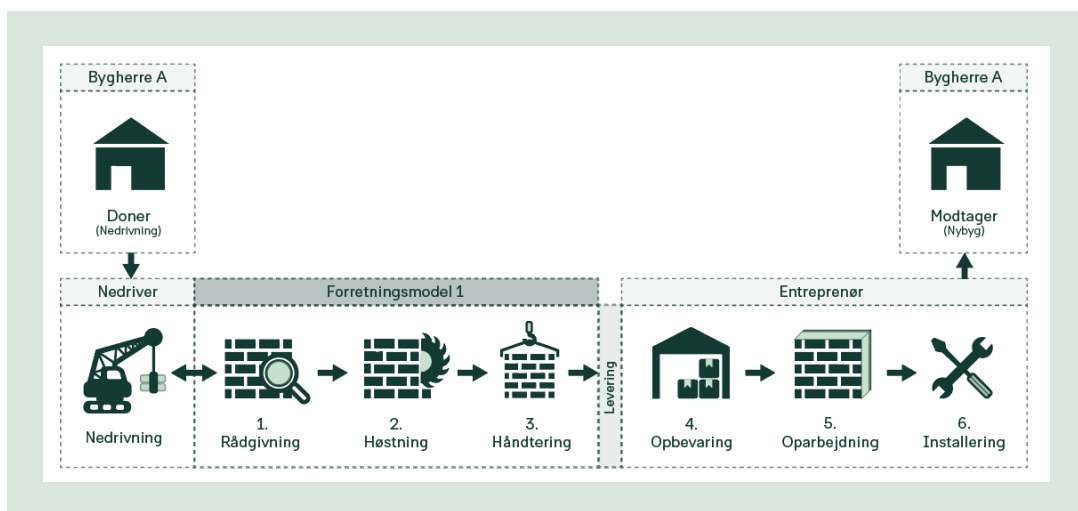
OBS: * Omkostninger skal her fratrækkes

Det vurderes, at der er potentiale for at etablere sig i industrien og at der findes tilgængelige ressourcer til at det er relevant at indtræde på markedet for høstning af murelementer til upcycling. Dog er greb som transformation og nedrivningsstop meget omdiskuterede løsninger på en bæredygtig praksis i byggebranchen, og vil være en potentiel trussel faktor for at kunne finde tilstrækkelige mængder høstbar mur.

Det er usikkert, om der kan indtjenes nok likviditet pr. dag for at gøre det attraktivt at stifte en virksomhed (ved det nuværende scenarie er omkostningerne for at udskære et murelement 325 kr. men det vurderes at kunne sælges for en højere pris). Der anbefales at konsultere nedrivningsfirmaet og bygherren for at fastlægge en passende pris for at udskære murelementerne til intern anvendelse i egen portefølje.

6.2.9 Forretningsmodel

I den anbefalede forretningsmodel arbejdes der med scenariet, hvor bygherre ejer både donorbygning og modtagerbygning. Det vil sige, at servicen leveres til en bygherre der ønsker at cirkulere materialer internt i egen portefølje. I den foreslåede forretningsmodel anses virksomheden som en servicevirksomhed, der sælger ydelsen at rådgive, udskære og håndtere murelementerne. Virksomheden er derved ikke materialeproducenten eller sælger af murelementerne som en varer, men yder udelukkende servicen relateret til udskæringen for sine kunder:



FIGUR 6.7. Illustration af processen. Se afsnit 6.2.3 for et fuldt overblik over aktiviteterne i forretningsmodel 1.

Forretningsmodellen anbefales for at reducere risikoen forbundet med brugen af murelementerne i fremtidigt byggeri. Den største risiko i virksomheden er at sikre at modulerne forbliver intakte, for at de kan benyttes til fremtidigt brug, samt forsyningssikkerhed. Derved bliver grundig oplæring og erfarent personale afgørende for at sikre en høj succesrate for udskæringen. Fra et risikoperspektiv er det sikrest at levere en grundig og professionel service fra personale, der er specialiseret i specifikt denne metode. Denne forretningsmodel kan være særdeles relevant for f.eks. diamantudskæringsvirksomheder, produktionsvirksomheder, eller nedrivningsvirksomheder, som ønsker at specialisere sig indenfor genbrug og upcycling.

Ved indtrædelse på markedet kan der med fordel arbejdes med alternative forretningsmodeller. Dette kan være med til at skabe en bred tiltrækning af kunder, og forskellige perspektiver i forretningsmodellen kan afprøves og valideres med kunder.

6.2.9.1 Skaleringspotentiale

Der foreslås at udvide servicen til at sælge rådgivning til entreprenørvirksomheden vedrørende oparbejdning og installering af elementerne. Derudover forventes det fremtidige potentiale at

øges i takt med at virksomheden indsamler relevant data og drager flere erfaringer i forlængelse af screening, udskæringen og håndtering af murelementerne. Desuden vil der både i Danmark og EU indføres flere krav og incitamenter til at fremme den cirkulære agenda hvilket positivt vil forbedre skaleringen af denne type virksomhed.

6.2.10 Implementering

Det anbefales at der startes med at have fokus på implementering på det danske marked. Dette vil være en fordel, særligt fordi Danmark har en lang tradition for at bygge med tegl og dermed en stor mængde tilgængelige ressourcer. Desuden er Danmark et af de første lande i verden til at sætte grænseværdier for byggeriets klimapåvirkning, og vil derfor i højere grad have behov for løsninger, der kan indfri og nedbringe byggeriets klimapåvirkninger. Herfra vil det være interessant at overveje indtrædelse på markeder hvor lignende krav allerede er eller vil implementeres, hvilket bl.a. ses i lande som Holland, Frankrig, New Zealand, Finland, Norge og Sverige²³. Krav til indføring af sådanne grænseværdier diskuteres også i EU regi, hvilket vil øge relevansen for denne teknologi i hele Europa. Ved implementering i det Europæiske eller internationale marked, bør der desuden fokuseres på lande med en stor bygningsmasse med teglfacader og en lignende byggeskik med den danske, for at mest mulig erfaring og viden kan overføres.

6.3 Miljømæssig indflydelse på branchen

Dette afsnit har til formål at analysere hvor stor en indvirkning de udviklede løsninger har hvad angår eliminering af affaldskategorien murværk og dertil en vurdering af potentiel CO₂ besparelse. Afsnittet kommenterer yderligere på andre relevante reduktioner i udvinding af råstoffer og produktion af mursten med nyudvundne materialer.



Indfries hele markedspotentialet og 75.000 m² murværk udskæres årligt og erstatter brugen af nyudvundne mursten, vil dette opnå en årlig besparelse på 3.525 tons CO₂ ækvivalenter per år. Dette svarer til 525 danskeres årlige CO₂ forbrug i 2023²⁴. Ses der på Danmarks samlede udledninger svarer denne årlige reduktion til under 0,1 % men vil have potentiale for at kunne indfri et større potentiale ved at implementere forbedringer. Det vil desuden resultere i et minimeret behov for udvinding af nye ressourcer til at producere nyt murværk.

Desuden vil dette have potentiale for at kunne spare samfundet for 15.000 tons affald af murværk om året.

²³ [How are the Nordic Countries Implementing Policies on Low Carbon Construction?](#)

²⁴ [Danskeres årlige CO₂ udledninger](#)

7. Konklusion

Dette projekt har haft til formål at udvikle automatiserede høstnings og klargøringsprocesser for at gøre genbrugen af murelementer lettere, optimere klimapåvirkningen og formulere en skalerbar forretnings case. Dette kapitel diskuterer hvorvidt disse mål er opnået og fremtidige optimeringsmuligheder.

7.1 Konklusion

Dette projekt er lykkedes med at gøre nedtagning af murelementer billigere og mere sikkert samtidig med, at gøre den fortsatte brug af udskårne murelementer til et mere bæredygtigt alternativ og til en overordnet set lavere pris end hvad der tidligere har kunnet opnås. Dette resultat var demonstreret på udstillingen "Planetary Boundaries" i oktober 2023 på det Kongelige Akademi.

Projektet har udviklet en ny maske til høstning af murværk – "murhøsteren" - for at gøre nedtagningen mere sikker, hurtigere og af højere kvalitet. Alle tre parametre er blevet betydeligt optimeret, og værktøjet er nu klar til praktisk anvendelse. Værktøjet har gennemgået flere iterationer for at forbedre arbejdsmiljø og optimere tidsforbruget. Det endelige værktøj består af en Husqvarna 220 ws fjernstyret sav, integreret i en rotationsmekanisme, der monteres på en løfteramme med en monteringsmekanisme til muren. Derudover er der udviklet software, som kan screene bygninger og fastlægge en præcis udskæringsplan til nedtagelsen.

Projektet har haft til formål at udvikle en forretningsmodel, som kan hjælpe skaleringen af brugen af upcyclede murelementer i det byggede miljø. Den foreslåede forretningsmodel bygger på at bygherrer beholder egen byggemasse, og dermed kan styre internt hvor materialerne skal anvendes. Dog er det også muligt at videresælge mellem projekter, selvom denne løsning er forholdsvist udforsket.

Den foreslåede nye løsning Murkonsol bevæger sig væk fra at anvende beton som binder mellem elementerne og går i stedet over til at benytte murkonsoller til hvert murelement. Dette valg reducerer risikoen for fejl i opbygning med elementerne betydeligt. Designet har økonomisk forbedring på 19% på anlægsomkostningerne og en forbedring på 20% i forhold til klimapåvirkninger over dets levetid i forhold til udgangspunktet på Ressourcerækkerne. Det økonomiske perspektiv er baseret på udstillingspriser og forventes at falde, når entreprenører får erfaring med opbygningsprocessen. Der er stadig plads til optimering af økonomien, da omkostningerne stadig er 118% højere end for en standard mur. Dog er hovedparten af omkostningerne konservative, og med en fuldt optimeret tilgang forventes omkostningerne at være sammenlignelige med en standard mur. Overgangen fra støbte elementer til individuelle konsoller gør det også muligt at genbruge elementerne i fremtiden.

Alt i alt har projektet leveret et forbedret produkt på de ønskede parametre, og der er skabt fundament for at kunne indgå på markedet for at facilitere høstning og upcycling af udskårne murelementer. På trods af dette har projektet nogle begrænsninger som er nødvendige at fastslå:

- Høstningsprocessen er rettet mod nedrivningsklare bygninger, og afhænger derfor af at kunne høste ressourcer fra nedrivninger. Med den stigende bevågenhed på transformation, omdannelse vil der potentielt opstå udfordringer i at sikre nok materiale. Derfor bør denne

Løsning betragtes som det bedste alternativ hvis en bygning er nødsaget til at skulle nedrives, og ultimativt ikke bidrage til antallet af nedrivninger.

- Projektet har fokuseret på et scenarie hvor en betydelig del af ansvaret og risikoen forbundet med cirkuleringen af murelementer ligger hos den individuelle bygherre der ønsker at cirkulere sine ressourcer. Dette projekt har arbejdet på at forbedre en lang række tekniske, arbejdsmiljømæssige, klimamæssige og økonomiske faktorer for at nedbringe risikoen mest muligt indenfor projektets rammer. Der er dog stadig mulighed for, at et firma kan se et forretningspotentiale i området og overtage ejerskab af elementerne samt stille en garanti. Hvis dette gøres, vil prisen naturligvis også stige derefter.

Der er fortsat stadig plads til forbedring som fremhævet igennem rapporten, og ved efterfølgende arbejde anbefales der at fokusere på følgende områder:

- Samarbejde med producenter om udvikling af murkonsoller, med fokus på at optimere geometrien og anvende det mindst miljøbelastende materiale (f.eks. genanvendt stål med brug af fornybar energi i produktionen).
- Udvikle digitale værktøjer til effektiv porteføljehåndtering af murelementerne.
- Opnå erfaring med opførelse af facader med brug af upcycledede murelementer i realiserede projekter og optimere processen for at reducere omkostningerne.

Bilag 1. Alternativer til udskæringsmetode af murværk med cementmørtel

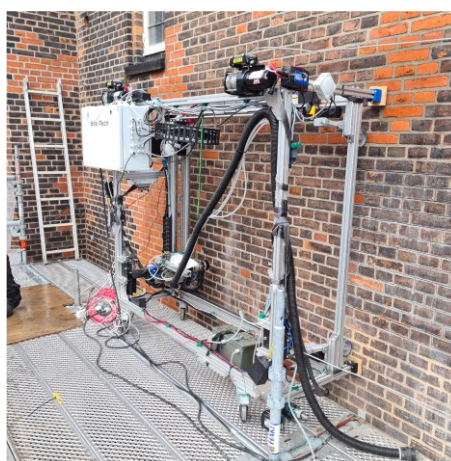
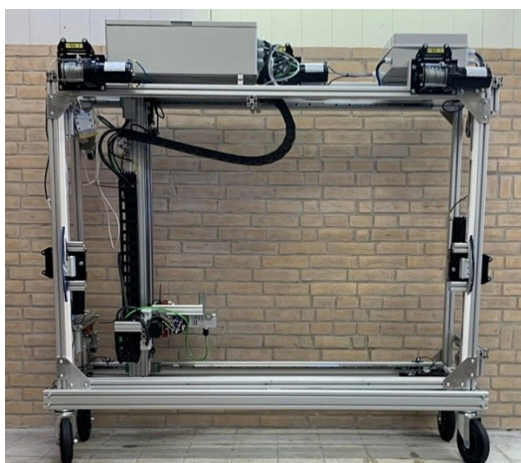
Bilag 1.1 Robotteknologi til fræsning af fuger

En startupvirksomhed arbejder på at udvikle en robotteknologi der automatisk kan fræse fuger til brug ved renovering af murfacader. På sigt kan denne teknologi muligvis udvikles til også at kunne skære enkeltsten eller større murfelter fri af murværk. Det er en interessant og relevant teknologi at have for øje i det fremtidige arbejde med at optimere processerne vedr. genbrug og upcycling af mursten.

På SITE-TECHs hjemmeside står:

"... en selvstyret og selvkorrigerende robot, som kan fjerne fuger rundt om mursten 100% automatisk. Fugefræserobotten fjerner op til 99% af fugen og efterlader kun de mindste rester til sidst"

"Vi fjerner fuger som **en service** og leverer til både private og erhvervskunder. Det vil sige at vi tager ud til projektet, før den manuelle fugejernelse og begynder at udfræse de 80-90% af fuger, vores robot kan håndtere. Dette afregnes til en kvadratmeter pris, som tager udgangspunkt i hårdhed af fugen. Efterfølgende skal den resterende fuge fjernes manuelt af en af vores samarbejdspartnere. [Site-Tech](#) kommer selv med robotten, stiller den op og betjener den igennem hele processen med at fjerne fugerne, og vi fragter selv robotten hjem igen."



Site-Tech, Fra test af robotten på Københavns Rådhus.

"Jeg tror på, at vi kan komme rigtig langt med vores mobilitetssystem, så vi **i fremtiden kan alt fra at slibe og sandblæse overflader med skadelige stoffer til at friskøre mursten**, så vi kan genanvende en langt større andel af de tonsvis af muraffald som produceres årligt i Danmark. Men i første omgang handler det altså om at modne og videreudvikle vores nuværende robot, så vi virkelig kan komme ud og løse opgaver på markedet om et halvt års tid, siger han." ([Martin van der Bijl, Founder](#))

Dog er teknologien da denne undersøgelse er udført ikke færdigudviklet, og derfor ikke aktuel at inddrage i selve udskæringsarbejdet.

Bilag 1.2 Cut n move – Odico

Transportabel fuldautomatisk og robotstyret udskæringsstation til tilskæring af fliser op til 60x80cm. Sikrer gode arbejdsmiljøforhold ved udskæring af fliseelementer. Dette kunne være en interessant teknologi, som muligvis vil kunne videreudvikles til at kunne lave sikre og præcise tilskæringer af murelementerne, hvis der ønskes særlige designs og formater.



Odico

Cut n move udskæringsstation.

Bilag 1.3 Husqvarna vægsav

Vægsaven kører på en skinne som monteres på den flade der ønskes skåret i. Benyttes bl.a. til at lave huller til døre og vinduer. Der er høj arbejdsmiljømæssig sikkerhed, da saven styres via en fjernbetjening på afstand. Derved mindses mængden af støv, støj og vibrationer, som udsættes for. Samtidig sikrer skinnen at saven føres effektivt og hurtigt på en lige linje gennem materialet, så udskæringen bliver helt præcis. Skinnerne kan fås op til 2,3m og kan samles til endnu længere forløb.



Husqvarna vægsav

Bilag 1.4 Iver entreprise – udskæring af beton

Udskæringsystem til tilskæring af betonplader til projektet i Fredensborg (Husqvarna vægsav).



Udskæringssystem til beton

Eksempel fra Iver Entreprise

Bilag 1.5 Øvrige metoder

Der findes endnu relativt få projekter der har forsøgt at løse problemet med at finde veje til bedre genanvendelse og genbrug af mursten med stærke cementmørtler. Andre projekter har forsøgt med forskellige øvrige initiativer og metoder såsom brænding ved høje temperaturer eller udskæring af sten enkeltvis.

[Brænding som metode til at adskille sten og mørtel - Erfaringer med direkte genbrug af mursten med stærke mørtler \(TI MUDP-projekt\)](#)

Brænding ved høje temperaturer for at løsne mørtel – skabte udfordringer med at sten revner, derfor blev projektet afbrudt/ikke videreudviklet.

Bilag 2. Krav og motivationer fra aktører

TABEL 2.1. Krav og motivation fra aktører

	Bygherre A	Nedriver	Oparbejder	Bygherre B
	Nedrivning som del af LCA	Økonomisk gevinst i udbud ved at nedriver får materialet som har en værdi. (investering)	Et nyt produkt, hvor det er tydeligt at se den værdi der tilføres og dermed den pris der kan tages for det.	Vil have teglfacade men også CO ₂ besparelse
	Ønske om at handle mere bæredygtigt/cirkulært (også signalværdi)	Intern oplæring i virksomhed, som kan munde ud i ny rådgivningsfunktion og opgaver.	Markedsføring Evt. mersalg af andre produkter (lock-in). Nok et mindre segment	Æstetik Leveringssikkerhed
	Lav risiko ved salg til nedriver	Anvende sin viden bredt, og dermed kunne sælge mere.	Kompetence opbygning til CØ	Ønske om at udfordre status-quo byggeprojekt
Motivationer	Mulighed for stor besparelse for Bygherre A, hvis materialerne bruges af samme bygherre i nyt projekt	Krav i udbuddet og derved forhøjet økonomi. Jo længere tid nedrivningen tager des flere penge får de. Interne bæredygtigheds-mål. De ved at deres branche ikke er god. Paletten af opgaver forøges, mere attraktiv nedriver. Svært at vinde udbud (negativ motivation). Tidsmæssigt svært at byde ind med hvis det tager for lang tid.		Værdiforøgelse via storytelling om genbrug PR
	Værditransaktion, som ikke nødvendigvis er direkte koblet til materialet: det er en udgift for nogle, er indtægt for andre i form af ex. profilering, positionering, investering			På længere sigt kan resourceknaphed motivere til at finde andre type/kilder til byggematerialer
	Regulatoriske krav om øget andel af genbrug ved nedrivninger Tid kan have en stor effekt, da det økonomisk spiller ind på hele projektet. Deres motivation er så korte nedrivninger som muligt			

	Viden om fremtidige fraktioner og viden om potentielle fremtidsscenerier	Økonomisk sikkerhed ved ydelsesbeskrivelse	Viden om funktions- og udfaldskrav for at kunne garantere et nyt produkt	Dokumentationskrav, EPD, produktgaranti mv.
Krav	Evidens for materialets egenskaber. Materialet skal være kvalificeret og testet.	Viden og erfaringer så der kan udføres klar specifikation af arbejdsbeskrivelser og udfaldskrav	En større mængde ensartede elementer, for at sikre afsætningspotentialet	Det skal kunne 'betale' sig
		Ikke for omstændig proces, ordentlige arbejdsmiljøforhold	Forstå hvor producentansvar begynder og ender	
		Klare udfaldskrav/funktionskrav til materialet	Forstå deres "udgift" ift. CO ₂ , idet deres scope 1 bliver belastet	

Bilag 3. Beregningsværktøj

Bilag 3.1 Overblik af overordnede antagelser og specifikationer af systemet

TABEL 3.1. Overordnede antagelser og specifikationer af systemet.

Specifikation af høstning		
Total-højde på mur	4	m
Antages % af høstet mur der kan sælges	95	%
Højde på høstet element	0,94	m
Bredde på høstet element	0,94	m
Resulterende vægt af element	191	kg
Klargøring af murkrone		
Positionering af udstyr	10	min
Klargøring af murkrone	4	min/meter
Salgspris pr. m ² høstet mur	350	kr./m ²
Specifikation af skæreparametre		
Tid til start af skæring	0,5	min
Skærehastighed	0,5	m/min
Omkostninger		
Antal operatør arbejdstimer pr dag	7,4	timer/dag
Omkostning pr. operatør	250	kr./mand/time
Antager % effektivitet af operatør	85	%
Maskine - lift -5 ton	1200	kr./dag
Maskine - teleskoplæsser 9 ton	1500	kr./dag
Værktøj	500	kr./dag
Transport <i>lokalt</i> site (Til og fra byggepladsen)		
Lift	1260	kr.
Teleskop læsser	1310	kr.
Transport <i>Ikke lokalt</i> site (Til og fra byggepladsen)		
Lift	2590	kr.
Teleskop læsser	3050	kr.

Bilag 3.2 Overblik af estimeret tid brugt på hver proces aktivitet

TABEL 3.2. Estimeret tid brugt per procesaktivitet.

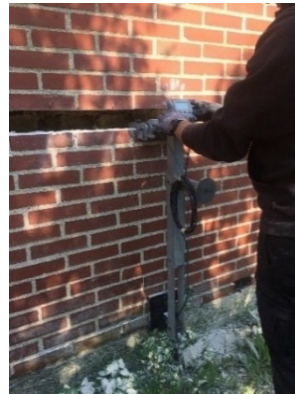
Proces	Beskrivelse	Tid aktivitet brugt	Samlet mande-tid (2 personer)	Samlet pris løn
#	-	min	min	kr./aktivitet
1	Murkrone positionering af udstyr	10	20	83
2	Klargøring af murkrone	3,8	7,5	31,3
	Samlet klargøring af murstrimmel	13,8	27,5	114,7
3	Positionering af udstyr + montage	5,0	10,0	42
4	Savning af horisontalt snit + support	2,4	4,8	20
5	Frigørelse af murbindere	1,8	3,6	15
6	Savning af et vertikalt snit	2,4	4,8	20
7	Nedkraning af murelement	1,9	3,8	16
8	Klargøring af murelement til transport	0,0	0,0	0
	Høstning af ét mur-element	14	27	112

Bilag 4. Notat fra trækstyrketest 15.05.2023

Formålet med dette notat er at kortlægge læringen fra udskæringen fra trækstyrketest foretaget d. 15.05.2023 på Kartoffel centralen, Debelvej 15 i Agerbæk.

Udførelse af testen

3 sten skæres fri og fjernes.



Billeder fra trækstyrketest

Tre sten skæres fri og fjernes (t.v.), studser fritskæres og måleinstrument monteres (t.h.).

Dernæst bliver studserne fritskåret på 3 sten. Målingen bliver kun foretaget på liggefladen. Måleinstrumentet monteres og spændes til så der trækkes i stenen til den giver sig og mørtlen slipper. Der laves prøver på tre sten pr test-sted. Måleenheden er i Newton og resultatet beregnes som gennemsnit af de tre prøver. Styrken skal være over 100 N på cementmørtel og gerne højere (TI har målt op til 200-250 N).

Der blev foretaget 3 trækstyrketest (og ikke de 6 planlagte). Det blev tydeligt ved udskæring af første test at bygningen er muret med kalkmørtel og ikke cement.



Billeder fra trækstyrketest, værktøj

Værktøj til trækstyrketest.

Cementfuge

Ved første besigtigelse blev der gættet på at den nyere del af bygningerne var med cementmørtel. Det viste sig ved udskæring at være en 12 mm cementfuge som lå uden på en kalkmørtel. En sådan fuger kan være dybere 15-12 mm eller mere (spænde 10-20mm)

- Løsning: i de indledende undersøgelser er det nødvendigt at fritskære en hel sten, for at tjekke mørteltypen. Ved tvivl kan der foretages en mørteltest hos TI.

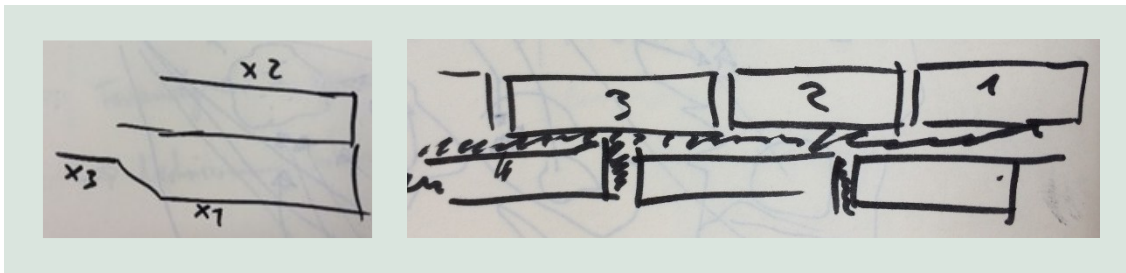


Billeder fra trækstyrketest, udskåret sten

Fugtet efter opmuring med 12 mm KC mørtel.

Cementmørtel efter 1960?

I tegningsmaterialet fremgik det at bygningen er fra efter 1960, og derfor ansås det sandsynligt at mørtlen var cement. Men (jf. TI) ses der kalkmørtel i bygninger helt op til 1980. Da cementmørtel begyndte at komme frem, var det dyrere og man kan derfor (måske) antage at der oftere blev brugt den billigere kalkmørtel i de mindre prestigefyldte byggerier, såsom lagerhaller m.v.



FIGUR 4.1. Resultater fra testen.

1 Test-sted – Facade mod øst

Røde hulsten (poresten på jysk), 12 mm cementfuge, kalkmørtel. Isolering og krydsfinerplade.

Målinger: 1) 22,5 N 2) 31,3 N 3) 41,1 N

Masser vedhæftning af mørtel på sten, men dårlig styrke.

2 Test-sted – Facade mod vest

Røde hulsten (poresten på jysk), 12 mm cementfuge, kalkmørtel. Isolering og træbeton eller krydsfinerplade.

Tydeligt vådt murværk, rådden træbeton, meget ildelugtende. Vådt murværk ses ved hvidt udtræk af salte. Stenene kan sagtens genbruges, de skal blot tørres. Misfarvningerne kan tage mange år om af forsvinde. Stenene har 3 facader og en bagside (de er næsten ens). Murbinder er rusten og her er der ingen vedhæftning.

Målinger: 1) xx N 2) 23,5 N 3) 42,1 N



Billeder fra trækstyrketest, udtrængte salte

Tydelige hvide udtræk af salte er tegn på fugt (t.v.), rusten murbinder uden vedhæftning (t.h.).

3 Test-sted – Gavl mod øst

Røde hulsten (poresten på jysk), 20 mm cementfuge, kalkmørtel. Isolering og træbeton (?) eller krydsfinerplade.

Her er der fuget efter opmuring med en KC- mørtel (cement) op til 20 mm dybde.

Målinger: 1) 22,5 N 2) 0,9 N 3) 21,5 N

Murstenen kan genbruges en-til-en

Murværket egner sig ikke til udskæring i felter – men derimod og endnu bedre kan de bruges en-til-en.

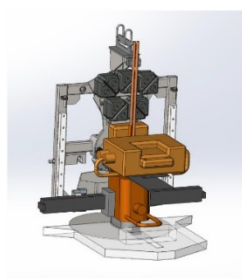
Stenene skal trykprøves (for at se hvad den kan bære) og frosttestes.

Røde poresten: TI har akkrediteret test baseret på røde poresten

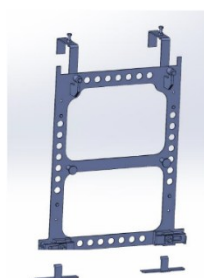
Gule sten: Det anbefales at sende dem til Holland (virksomhed?), da det vil være meget dyrere at få TI til at teste denne type.

Bilag 5. Brugermanual

UDSKÆRING AF MURFELTER



Skæreramme
med savenhed



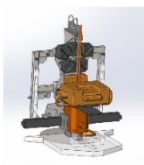
Løfteramme
med klør

UDSTYR

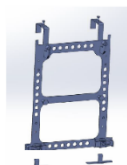
- 3 faset strøm, 400V og 16A eller med en generator med en nominel effekt på 10 kVA
- 230 v til at køre en lille vandpumpe
- Vandtilslutning
- Minikran som kan løfte 600 kg i en passende afstand 2-3 m. (ex. Jekko SPX532 minikran, Manitu eller Hoelfon C4).
- Rullestillads eller lift til montering af løfterammen.
- Paller eller transportkasser til at opmagasinere og transportere elementerne på (3 elementer pr. palle)
- Isolering og afstandstræ til at lægge imellem elementerne (isolering på stedet genbruges)
- Spændebånd (stålbånd eller tekstilbånd)
- Forskalningsbrædder til transportkasser
- Palleløfter el. gaffeltruck

FIGUR 5.119. Brugermanual, udstyr.

UDSKÆRING AF MURFELTER



Skæreramme med savenhed



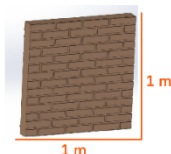
Løfteramme med klør

1. KLARGØRING AF MURKRONE - FORETAGES INDEN UDSKÆRING

Murkronen fjernes manuelt. Er der tag over muren, fjernes minimum de øverste 400mm (eller mere) af muren, således at udstyret kan løftes på plads.

2. FRIGØRING AF MURBINDERE

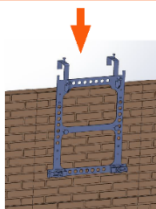
Via murens hulrum fjernes isolering og murbindere klippes manuelt for et felt på ca 1x1 meter.



3. LØFTERAMME PÅ MURVÆRKET

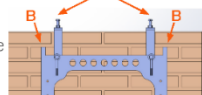
1

En løfteramme løftes manuelt på plads på muren



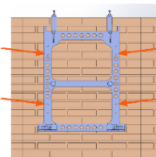
2

Med skruer (A) justeres løfterammens vertikale position, så rammens to hjørner, flugter med undersiden af den øverste mørtelfuge (B)



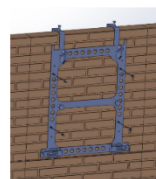
3

Der bores minimum 4 stk. ø6mm huller i murstenene ved brug af fire af hullerne i løfterammen



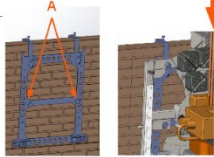
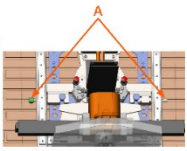
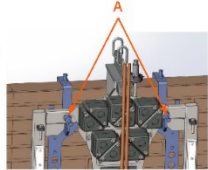
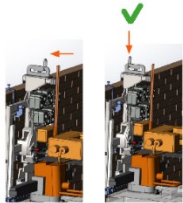
4

I hullerne monteres 7,5x80 ESSVE HCS-HF betonskrue ved brug af maksimum 15Nm. Der må ikke benyttes slagnøgle, men gerne bore/skruemaskine med slagfunktion.

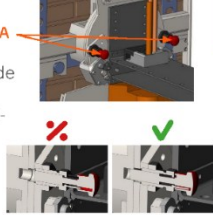
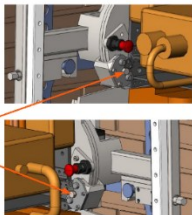
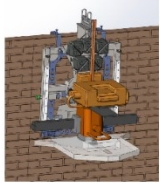
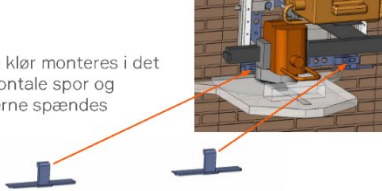

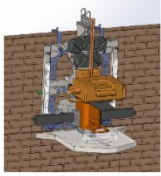


FIGUR 5.2. Brugermanual, klargøring.

4. FASTGØRELSE AF SKÆRERAMME TIL LØFTERAMME

<p>1</p> <p>Skærerammen nedsænkes over de to tappe på løfterammen (A)</p> 	<p>2</p> <p>De to fastgørelsesklør spændes og skærerammen låses til løfterammen</p> 
<p>3</p> <p>De to fastholdeskruer (A) øvst på løfterammen skrues i bund på skærerammen</p> 	<p>4</p> <p>Løftepunktet flyttes til det inderste punkt, og der løftes med ca. 400 kg</p> <p>Der tilsluttes el og kølevand til sagen</p> 

5. UDSKÆRING AF MURELEMENT

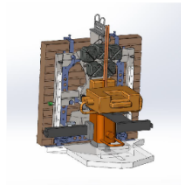
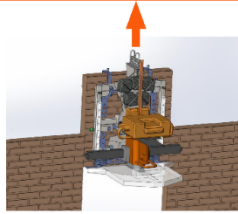
<p>1</p> <p>Én af de to fjederbelastede låsetappe (A) aktiveres og herved sikres den horisontale af sagen</p> 	<p>2</p> <p>De to bremsesko (A) spændes, hvorved føringen af sagen fastlåses til skærerammen. A</p> 
<p>3</p> <p>Først saves det horisontale snit og sagen køres tilbage til centrum af føringen</p> 	<p>4</p> <p>De to klør monteres i det horisontale spor og skrueerne spændes</p> 
<p>5</p> <p>Den ene vertikale side savs NEDEFRA OG OP. sagen køres tilbage til centrum af føringen inden sagen roteres.</p> 	<p>6</p> <p>Den anden vertikale side savs NEDEFRA OG OP.</p> <p>Efter det sidste snit roteres sagen således at den er i den horisontale position</p> 

FIGUR 5.320. Brugermanual, udskæring.

6. NEDKRANING AF UDSKÅRET MURELEMENT

1

Murelementet løftes forsigtigt væk fra muren med kran. Det vil svinge en del.



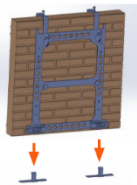
2

Når elementet er stoppet med at svinge placeres det forsigtigt på paller

7. FRIGØRINGELSE AF LØFTE OG SKÆRERAMMER

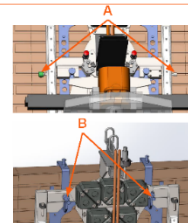
1

De to klør afmonteres



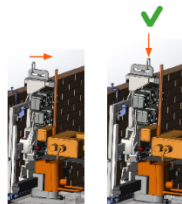
2

Skærerammen frigøres fra løfterammen ved at løsne de to fastgørelsesklør (A). Dernæst løsnes de to fastholdeskruer på løfterammen (B)



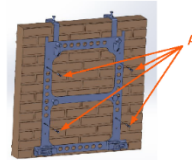
3

Løftepunktet flyttes til det ydre punkt (B). Skærerammen løftes op fra de to tappe på løfterammen. Skærerammen retunerer til skærestedet.



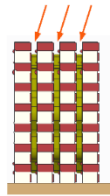
4

Løfterammen frigøres fra murelementet ved at løsne de fire betønskruer (A). Den retunerer til skærestedet.



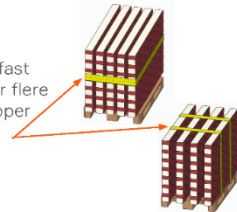
5

Rest isoleringsmateriale, fra muren og evt. 'bløde' træpinde placeres mellem murelementerne som afstandsgivere. Direkte kontakt mellem elementerne skal undgås.



6

Elementerne surres fast til pallen med én eller flere stropper (bæltestropper e.lign.)



8. GENTAGELSE AF SEKVENS 2-7

FIGUR 5.4. Brugermanual, nedkraning.

Bilag 6. Erfaringer fra tests

TABEL 6.1. Erfaringer fra tests.

Emne	Problemstilling	Løsningsforslag
Murbinderne er ikke klippet over	Hvis ikke alle murbindere er klippet over sidder murelementet fast og kan ikke løftes. Mur-elementet kan komme til skade og der kan opstå sikkerhedsmæssige udfordringer.	Før elementet skæres frit kontrolleres at alle murbindere er skåret over med en tilstrækkelig lang pin, som kan føres i mellemrummet imellem skalmuren og bagmuren.
Kontrollerede løft	For hurtige og hakkende løft kan medføre at det udskærende element svinger ukontrolleret i luften, hvilket øger risikoen for sammenstød og skader, desuden øges tiden til at sætte elementet på transportpallen.	Ved udskæringen bør elementet løftes langsomt og lige op.
Forberedelse af materiel	Manglende materiale forsinker processen og reducerer høstningsprocessens rentabilitet.	Materiel til pakning af murelementerne er forberedt og i tilstrækkelige mængder tilgængeligt, herunder klargjorte paller, spændebånd og blødt materiale afstandslag imellem elementerne (f.eks. genbrugsisolering)
Rettidigt test af maskiner og udstyr	Maskiner og udstyr som ikke fungerer efter hensigt, forsinker arbejdsprocessen og kan have store konsekvenser for overholdelsen af tidsplanen og den afsatte arbejdstid.	Maskiner og udstyr skal testes inden brug og så vidt muligt inden levering til nedrivnings-pladsen (og evt. allerede når det leveres) for at sikre at udskæringen ikke forhindres eller forsinkes af eventuelle fejl på maskinel.
Murelementets kanter kan nemt beskadiges	Murelementets kanter er særligt udsatte for skader.	Der skal sørges for at kranen styres ekstra forsigtigt tæt på objekter som murelementet kan støde ind i under løft og når det placeres til pallen.
Usynlige sætningsskader	Usynlige sætningsskader kan opstå og potentielt løsne murværket på upassende tidspunkter, hvilket udgør en risiko for personskade.	Det anbefales at personen der fastsætter skærerammen på positionsrammen, placerer sig i en sikker afstand fra murelementet både under udskæringen og ved løftet af det friskårede element. Personer må desuden aldrig befinde sig under elementet.
Vandret befæstelse af skærerammen	Hvis skærerammen ikke placeres i vater, medfører det en skæv udskæring, hvilket også påvirker præcisionen af de næste elementer. Især ved de vandrette snit gør sig manglende præcision bemærket. Her skal skærefladerne holde sig indenfor mørtelfugen.	Opsætningen af skærerammen kontrolleres med en vaterpas. I en videreudvikling af skærerammen kan en vaterpas være integreret.

Bilag 7. Tests

Bilag 7.1 Testudskæringer værktøj 1.0

Test 01 - Solrød gård



Udskæringstest ved Solrødgård

Første testudskæring var i en væg af beton, testudskæringen klargjorde en række forbedringsmuligheder. Herunder:

- Under nedkraning svingede elementet meget, derfor tog det længere tid end forventet at placere elementet.
- Da muren var skæv, blev løfterammen placeret skævt, hvilket resulterede i at saven sad fast i snittet.
- Toppen af løfterammen var for smal til muren og kunne derfor ikke monteres optimalt.
- Løsdele til montering af skære- og løfteramme var besværligt at håndtere for operatøren.
- Svært at placere saven i skinnen, da man skal sætte den fast med den ene hånd og holde saven med den anden.

Test 02 – Unord



Udskæringstest ved Unord

Forbedringsmuligheder:

- Udfordring ift. at klippe murbindere, svært at nå langt ned mellem muren og fange murbinde-
derne
- Løsdele til montering af skære- og løfteramme var besværligt at håndtere for operatøren.
- Svært at placere saven i skinnen, da man skal sætte den fast med den ene hånd og holde
saven med den anden. Der resulterede i en farlig situation hvor operatøren tabte saven.
- Testudskæringen blev afbrudt da saven gik i stykker, der viste sig at være en fejl på den le-
verede sav fra Husqvarna

Test 03 – Herlev



Udskæringstest Herlev

Endelige test med version 1 af saven. Denne testudskæring resulterede i fire udskårne elementer. Testen afslørede en række udfordringer og forbedringsmuligheder:

- Udfordring ift. at klippe murbindere
- Forsat udfordrende at montere saven på skærerammen
- Flere løsdele at holde styr på
- Skinne tager tid at flytte rundt om rammen
- Dårlig arbejdsstilling når elementet, som skal skæres ud, er tæt på jorden
- Udfordring ift. at hjørne knækker af elementerne under udskæring.
- Murbindere stikker ud fra elementerne efter udskæringen, skal klippes helt tæt, for at elementerne kan sættes i pallen.
- Isoleringen skal lægges mellem elementerne for at støddæmpe under kørsel, de må ikke kunne bevæge sig.

Bilag 7.2 Testudskæringer værktøj 2.0

07 Nordmarksvej

Høstbarhedsanalyse

Data baseret på tegningsmateriale

TABEL 7.1. Specifikationer fra udskæringstest på Nordmarksvej.

Grunddata		
Adresse	Nordmarksvej 6, Sorø	
Funktion	Tidl. Autoværksted	
Byggeår	1987	
Areal	886m ² (hele bygningen)	
Høstbarhed	Desktop/tegningsmateriale	Fysisk kvalificering

Grunddata

Murens opbygning 30 cm hulmur, uden sætnings-skader. Med misfarvninger nogle steder. Maling på indermuren.

Mursten Helbrændte gule sten (begge si-der)

Forbandttype

Mørtel Efter 1960 tyder på cement, men type ukendt

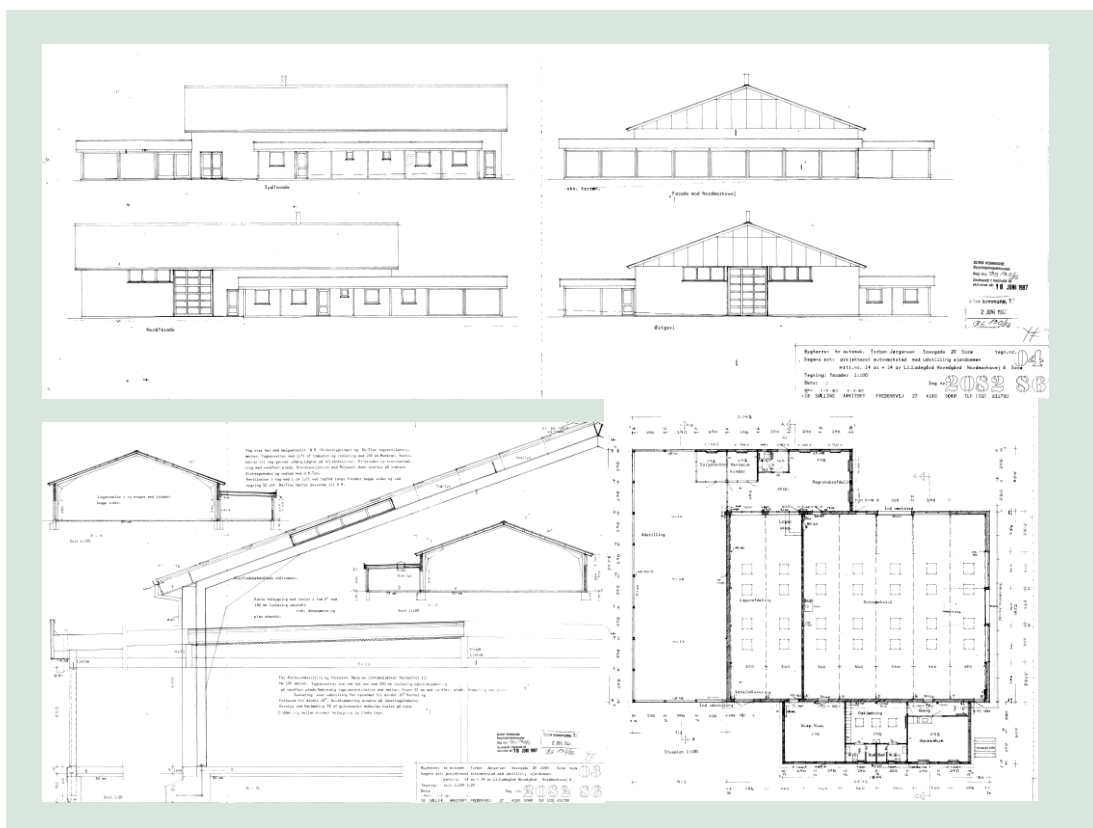
Isolering 100mm A Batts

Miljø Ukendt

Adgang Der er mere end x meter til



Udskæringstest ved Nordmarksvej



FIGUR 7.121. Tegningsmateriale fra Nordmarksvej.

Findings fra test

Problematikker fundet ved udskæring

Ukorrekt tegningsmateriale

Sammenlignet med tilgængeligt tegningsmateriale fandtes der on site et hulrum på 50mm fremfor de forventede 100mm. Dette skabte problemer med at klippe murbindere – da tilgængeligheden var udfordret,

- *Løsning: Ved vurdering om murværk kan bruges til at høste, lav hul i væggen og tjek at opbygningen stemmer overens med tegningsmateriale.*
- *Løsning: Fjern tag for at have lettere adgang til hulrum og plads til frigørelse af murelementer (OBS: Problematik ift. Nedrivningsproces – kostbar)*
- *Løsning: Skrald bagmur i ikke bærende konstruktioner for at have fri adgang til murbindere (OBS: Kan kun anvendes til 1 lags murstensvæg.*

Mursten med huller

Hjørnerne udgør de kritiske punkter ved frigørelse af murelementerne i bunden, dette problem opstår især når muren er konstrueret af hulten, da der ikke er langt fra kant til første hul.

- *Løsning: Test type af mursten forud for skæring.*

Styrke / skæring af murelement

Murelementer skæres først fri i bunden og derefter langs siderne. Hvis skæringen af siderne startes i retning fra top til bund, lægges der for meget vægt på toppen af murelementer (maskinen), og der er stor risiko for at murelementet knækker i to – eller løsnes i mørtlen. (dette skete ved første forsøg på udskæring)

- *Løsning: Siderne skal skæres i retning fra bund til top*

Skæve færdige elementer

Murelementer bliver skåret en smule skævt og der findes i begge elementer en variation på omkring 5mm mellem bredden i top og bund af elementet. Hvilket stemmer overens med en usikkerhed i manual drejning af udstyr på 2mm.

- *Løsning: Da de indgår i et samlet forbandt, som skal støbes/mørtles på ny kan en hvis skævhed accepteres – opsæt grænseværdi. (lav forsøg med tegningsmateriale) (UD*

Løsning af skæringsramme

I andet forsøg af udskæring af murelementer blev bunden skåret skævt, dette skyldes at skæringsværktøjet monteres efter rammen er indstillet. Rammen løsner sig ved montering og rykker sig.

- *Løsning: Tjek at rammen sidder korrekt efter at skæringsværktøjet er monteret.*

Æstetiks udtryk af færdigt murelement

Rammens montering kræver at der bliver boret huller midt i murstenen. Boringen af huller gør at derudover hullet skrældes lidt mursten af omkring hullet. Æstetisk bliver det meget tydeligt. Det forsøges at placere hullerne efter mørtlen, men det er problematisk da mørtlen ikke er stærk nok til at skruen fæstnes ordentligt til materialet.

- *Løsning: Afhængig af den fremtidige monterings metode – skal udseendet testet med efter pudning – kan dette accepteres?*

Byggepladsforhold

Plads

Da skæringsværktøjet skal løftes på plads af en manitou kræves der en del plads ud fra væggen for at have plads til værktøjet. I dette tilfælde 7m ca, det skyldtes primært at den mindste

manitou ikke var tilgængelig. Den der anvendtes, havde fødder – hvilket ikke er nødvendigt – pladskrav med mindre manitou skal beregnes.

Arbejds miljø

I sammenligning med tidligere udskæringer fra fx Ressourcerækkerne er arbejds miljøet i høj-sædet. Der er høj sikkerhed ift. Man skal ikke holde udstyr i arbejdsprocessen. Da der monteres vand under nedskæring, støver det minimalt. Og selve udskæringen tager få minutter hvorved larmen er minimal.

Arbejdsflow

En mand kan arbejde på at demontere murelementet – mens den anden kan påsætte ny ramme.

Kan man ikke udskære to elementer i et ryk hvis man frigør taget?

08 Musikhuset/ Kulturtorvet 7A, Farum

01 Høstbarhedsanalyse

Data baseret på BBR/ tegningsmateriale

TABEL 7.2. Specifikationer fra udskæringstest ved Musikhuset i Farum.

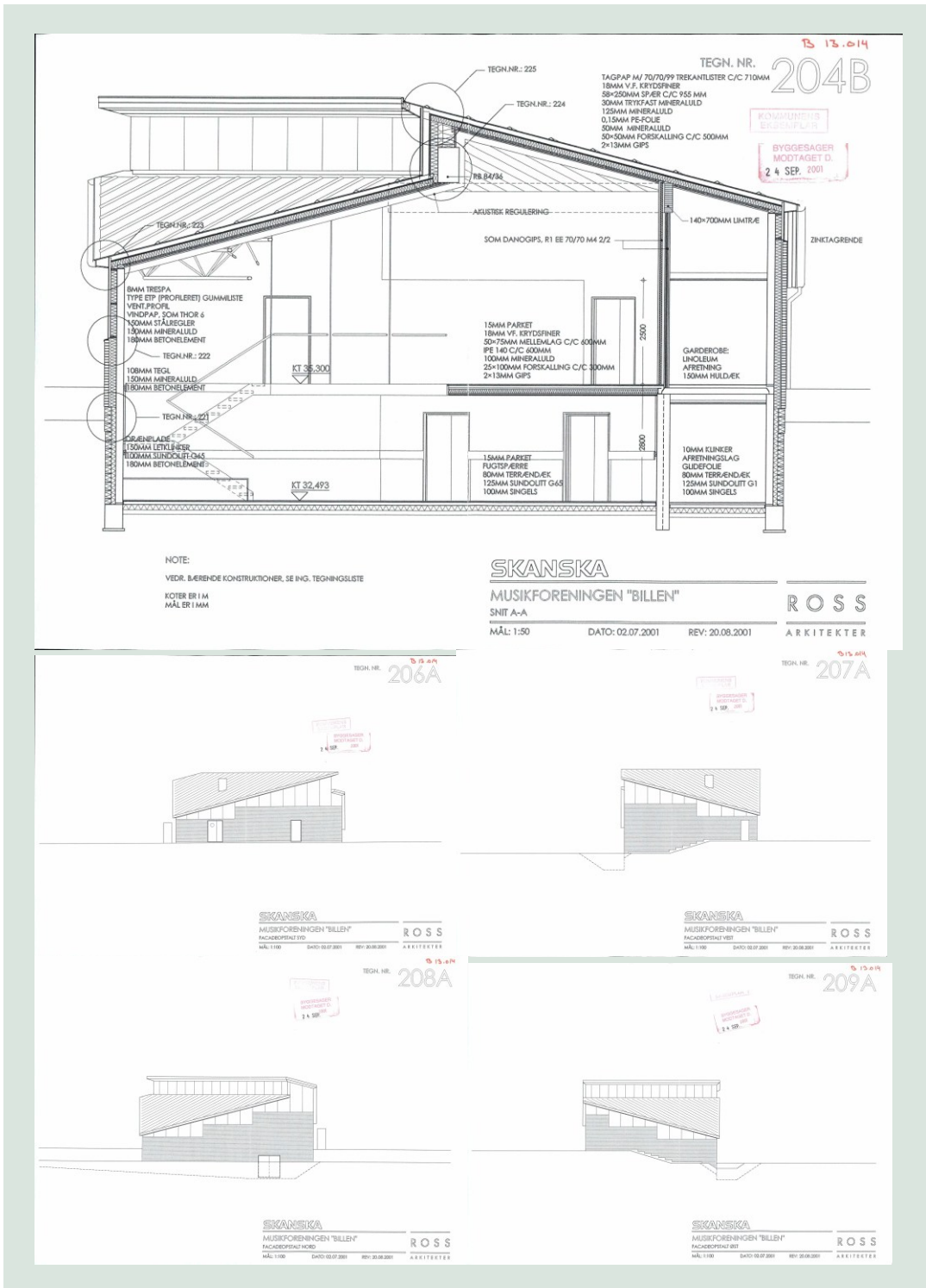
Grunddata		
Adresse	Kulturtorvet 7A, 3520 Farum	
Funktion	Kulturelle formål	
Byggeår	2003	
Areal	322m ² (samlet bygningsareal)	
Høstbarhed	Desktop/tegningsmateriale	Fysisk kvalificering
Murens opbygning	En opmuring, ingen efterfugning	
Mursten	Mørk-/rødbrun	
Forbandttype	Løberforbandt II	
Isolering	Isoleringsbats	
Mørtel	2003 tyder på cement, men type ukendt	Cement
Miljø	Ingen	
Trækstyrketest	>400	
Adgang	Der er god plads hele vejen rundt om bygningen over 4 m. Stor terrænforskel, skrånere fra sydsiden ned mod nordsiden.	Svært tilgængelig på øst-, vest- og nordsiden grundet terrænforskel og græsareal og smal >3m flisegang
Algoritme/høstbare felter	Ukendt, men 556 m ² facade med mur	



FIGUR 7.2. Musikhuset i Farum, BBR.



Musikhuset, Farum



FIGUR 7.3. Tegningsmateriale af Musikhuset i Farum.

09 Frederiksborgvej 5/ Kulturtorvet 3, Farum

01 Høstbarhedsanalyse

Data baseret på BBR/ tegningsmateriale

TABEL 7.3. Specifikationer fra udskæringstest ved Frederiksborgvej i Farum.

Grunddata		
Adresse	Kulturtorvet 3, 3520 Farum	
Funktion	Undervisning og forskning	
Byggeår	1970 (om-tilbygget 1995)	
Areal	1066m ² (samlet bygningsareal)	
Høstbarhed	Desktop/tegningsmateriale	Fysisk kvalificering
Murens opbygning	Fuget efter opmuring	
Mursten	Mursten gule (på de to gavle)	
Forbandttype	Løberforbandt I	
Isolering	Isoleringsbats	
Mørtel	1970 tyder på cement, men type ukendt	Kalk med 10-12 mm cementfuge
Miljø	Ingen	
Trækstyrketest	>83	
Adgang	Der er god plads ved gavl mod syd over 4 m. Dårlig plads på gavl mod nord under 2 m.	
Algoritme/høstbare felter		



FIGUR 7.4. Frederiksborgvej i Farum, BBR.



Frederiksborgvej i Farum

Bilag 8. Designvurdering

TABEL 8.1. Designvurdering.

Design parametre	Stablet	Hempcrete	Murkonsol
Designmæssig fleksibilitet	Stables uroteret. Kan forskydes horisontalt.	Hvert enkelt element kan roteres og forskydes vertikalt og horisontalt.	Hvert enkelt element kan roteres og sættes i forskellige dybder, samt forskydes vertikalt og horisontalt. Desuden kan der let inkorporeres andre materialer i facaden.
Bygbarhed	Kravene til elementernes ensartethed er relativt store da en mindre variation i vinkel eller dimensioner er udfordrende at løse udelukkende med mørtel i opmuringen. Da tolerancerne på de udskårne murelementer er relativt store (både i dimensioner samt i vinklen på skæringen) kan det skabe problemer når de er stablet oven på hinanden.	Kræver ekstern produktion. Nem at stable.	Ingen max højde på byggeri. Afkobling mellem elementer mindsker risikoen placeret på individuelle elementer. Elementerne skal placeres på konsoller relativt præcist, men elementernes størrelsesmæssige tolerancer er ikke kritiske.
Økonomi	Elementerne skal testes og mures sammen. Det vil kræve længere tid ved montering og dermed vil denne proces blive dyrere end alternativer. Desuden tilføjes mørtel.	Elementerne skal testes og derefter igennem et yderligere produktionsled og der skal tilføjes hempcrete materiale. Dog kan dette have en besparelse på andre dele af murebyggeriet da hempcrete har isolerende egenskaber.	Elementerne skal testes og der tilføjes konsol fastsat på bagstruktur, f.eks. i form af bjælker udformet i genbrugstræ som demonstreret på udstillingen Planetary Boundaries - Rethinking Architecture and Design.
Cirkularitet	Kan nedtages selektivt, men kræver ekstra påpasselighed ved nedtagning.	Elementerne sammensættes til en komposit og kan dermed ikke adskilles som udgangspunkt, hvilket besværliggør genbrug.	Kan nemt nedtages selektivt element for element.
Miljøpåvirkning	Lav, ingen tilføjede materialer, på nær mørtel til opmuring.	Tilføjelse af hempcrete (som erstatter andre materialer til stabilisering og samling af elementerne) Tilføjelse af ekstra transport til produktion. Da elementerne bliver en komposit giver en mere begrænset levetid på elementerne.	Tilføjelse af konsol i stål.

Bilag 9. Arkitektoniske muligheder

Bilag 9.1 Facadeudtryk

TABEL 9.1. Facadeudtryk.

	1. Forskydning af elementer	2. Rotation af elementer	3. Tilføjelse af elementer #1	4. Tilføjelse af elementer #2	5. Grønne vægge/plantekasser	6. Farve Kombi-nering
Fordele	<ul style="list-style-type: none"> - Giver en visuel interesse, at der fluktueres i forskydning. - Kan bruges til at skabe dybde og ændre i kompositionen. - Kan skabe en kontinuitet (eller kontrast) til omkringliggende omgivelser/bygninger. <p>+100 års levetid, alt afhængigt af bagvedliggende opbygning og vedligeholdelse.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Giver en visuel interesse, at der roteres i elementerne. - Kan bruges til at skabe specifikke mønstre/Personalisering. - Skaber variation. - Understreger brugen af moduler murstenselementer. <p>+100 års levetid, alt afhængigt af bagvedliggende opbygning og vedligeholdelse.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Kan benyttes, ved mangel af elementer. - Giver en visuel interesse, at der fluktueres i materialer. - Kan bruges til at skabe dybde og ændre i kompositionen. - Kan skabe en kontinuitet (eller kontrast) til omkringliggende bygninger og andet brugt materiale i bygningen. - Kan have en positiv miljømæssig indvirkning, i form af evt. Genbrugte materialer. <p>Materiale forslag: -Træ -Lameller -Aluminium -Zink</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Kan benyttes, ved mangel af elementer. -Giver en visuel interesse, at der fluktueres i materialer. - Kan bruges til at skabe dybde og ændre i kompositionen. - Kan skabe en kontinuitet (eller kontrast) til omkringliggende bygninger og andet brugt materiale i bygningen. - Kan have en positiv miljømæssig indvirkning, i form af evt. genbrugte materialer. <p>Materiale forslag: -Træ -Lameller -Aluminium -Zink</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Kan benyttes, ved mangel af elementer. -Nem montering, via. Præfabrikerede plantekasser direkte på murværk eller via Skinnesystem. -Grønne vægge kan skabe æstetisk tiltalende og beroligende miljøer. -Producerer oxygen. -Naturlig kulstofbinder. 	<ul style="list-style-type: none"> - Kan benyttes, ved mangel af elementer. -Giver en visuel interesse, at der fluktueres i murstens-farver. - Kan bruges til at skabe specifikke mønstre/Personalisering. - Kan skabe en kontinuitet (eller kontrast) til omkringliggende omgivelser/bygninger. <p>+100 års levetid, alt afhængigt af bagvedliggende opbygning og vedligeholdelse.</p>
Ulemper	<p>Kræver anden bagvedliggende opbygning, ift. Standard placerede murstenselementer.</p>	<p>Kræver anden bagvedliggende opbygning, ift. Standard placerede murstenselementer, i form af at skruehullerne typisk ikke sidder de samme steder når man roterer murstenselementet.</p>	<p>-Reduceret levetid afhængigt af det tilføjede materiale.</p>	<p>-Reduceret levetid afhængigt af det tilføjede materiale.</p>	<p>Kræver typisk stål el. Plastik til montering.</p> <p>Ca. 5-10 års levetid alt afhængigt af vedligeholdelse og klima.</p> <p>Kræver typisk specialister til at stå for vedligeholdelse.</p>	<p>Kræver at man høster forskellige farver af murstenselementer.</p>

	1. Forskydning af elementer	2. Rotation af elementer	3. Tilføjelse af elementer #1	4. Tilføjelse af elementer #2	5. Grønne vægge/plantekasser	6. Farve Kombi-nering
Mængde materiale & Økonomi	Potentielt kompliceret opbygning for at opnå forskydning.		150x1200mm x 6 planker i snit pr. m ² el. 140x940 x 8 planker i snit pr. m ²	140x940 x 8 planker i snit pr. m ² 140x1890 x 8 planker i snit pr. 2m ² 140x2825 x 8 planker i snit pr. 3m ²	Ca. 5000kr. pr. m ² . Ved Byggros.com (BGreen-it Living Wall)	

Bilag 9.2 Hjørnesamlinger

TABEL 9.210. Hjørnesamlinger.

	1. Hjørnesamling af træ	2.Hjørnesamling af mursten	3. Hjørnesamling af aluminium #1	4. Hjørnesamling af aluminium #2
Fordele	-Hurtig bygbarhed, siden træhjørneprofilen typisk kommer som et element. -Miljømæssigt, siden materialet er af træ Kan genbruges, hvis vedligeholdelse tillader det. -Kan matches med andet træ i konstruktionen, hvilket kan give en god kontinuitet. Ca. 20-40 års levetid, alt afhængigt af vedligeholdelse	- Æstetisk look, der matcher murstens opbygningen af murelementerne. +100 års levetid, alt afhængigt af vedligeholdelse.	-Simpelt look, der sætter fokus på murstenselementerne. -Hurtig bygbarhed, siden alu. hjørneprofilen typisk kommer som et element. -Genbrugte elementer kan potentielt benyttes. -Høj holdbarhed og genbrugelighed. Ca. 20-50 års levetid, alt afhængigt af vedligeholdelse.	-Simpelt look, der sætter fokus på murstenselementerne. -Hurtig bygbarhed, siden alu. hjørneprofilen typisk kommer som et element. -Genbrugte elementer kan potentielt benyttes. -Høj holdbarhed og genbrugelighed. Ca. 20-50 års levetid, alt afhængigt af vedligeholdelse.
Ulemper		Længere opbygningstid, siden man skal have brug af specialister.	Hvis genbrugt aluminium ikke bliver brugt, kan det have en negativ miljømæssig indvirkning.	Hvis genbrugt aluminium ikke bliver brugt, kan det have en negativ miljømæssig indvirkning.
Mængde materiale & Økonomi	90x90x270 cm 103kr.pr. M	Ca. 40 mursten pr. Hjørne, hvis væggen er 3 murstens-elementer høj (ca. 3 m) Genbrugte mursten: ca. 10kr.pr. Sten + Mørtelomkostninger	136kr.pr. m	175kr.pr. 30x30mm, L: 1m

Bilag 10. Beregningsgrundlag klimapåvirkning

Bilag 10.1 Antagelser til carbon footprint analyse

Antagelser til Carbon footprint analyse

En standard murkonsol kan benyttes til murelementet

Der er kun behov for 4 muranker (franske skruer)

En standard mur bruger cementmørtel

En mur med genbrugsmursten bruger kalkmørtel

Teglelementvægge limes på beton

Når murelementer støbes sammen med beton eller hempcrete, kan de ikke adskilles igen uden at ødelægge stenene

Det større krav til konstruktionerne grundet murelementerne på konsol-lerne, antages at have ens klimabelastninger som et større fundament krævet ved normal mur. Dermed ekskluderes dette

Det antages at alt i konstruktionerne kan holde 50 år.

Det antages at elektricitet mix til processer ved udskæring er standard dansk mix

Det antages at løfteplatforme benytter elmotorer

Det antages at alt stål benyttet er rustfrit stål

Bilag 10.2 Mængdeskema

TABEL 10.1. Mængdeskema.

Mængde- skema	Murkonsol	Genbrugte Mursten	Ressource- rækkerne	Teglelement- væg	Standard mur
Murelement	1 m ²		1 m ²		
Stål	3,73 kg		50 kg		
Afstandsklods	0,1 kg				
Afstandsklods træ	0,01 m ³				
Franske Skruer	0,23 kg				
PE skum	0,04 kg				
Genbrugte mur- sten		157,5 kg			
Mørtel		38 kg			
Beton			0,05 m ³ (genbrugs- beton)	0,05 m ³	
Mursten				0,013 ton	157,5 kg
Cementmørtel				0,01 liter	38 kg
Lim				7,5 kg	

Bilag 10.3 Processer

TABEL 10.2. Processer.

LCA-processer			MUDP				
	Processer	Beskrivelse af processer	Mængde		GWP kg CO ₂ /m ²		
Produkt A1-A3	Transport	Transport af udstyr (tur-retur)	180	km	0,01		
	Udvinding af genbrugte materialer	A1	Forberedelses-proces	Fjernelse af de første 40 cm	-	-	
			Udskæringspro-ces – løft	Lifte til udskæring (2 stk.)	0,14667	kWh	0,0208
			Udskæring	Udskæring af murværksele-menter med skæreværktøj	0,3375	kWh	0,047925
			Pakning	Palle	25		0,0118225
			Flytning	Palleløfter til flytning af palle til og fra lastbil	0,08	kWh	0,0107
			Samlet				0,11
			Transport	A2	Transport	Transport af murfelter	100
	Bearbejdningsproces	A3	Produktion (Nyt)	Produktion af mørtel til udfyld-ning af huller og åbninger	7	Kg	0,707
			Oparbejdning og produktion	Bearbejdning af elementer - manuelt (afstøvning og hulle-fyldning)	-	-	-
Spild			Antager 10%			0,0707	
					0,7777		
Endt levetid C3-C4	Affaldshåndtering	C3	Affaldsbehand-ling, knusning	Kan antages det samme som SBi 2019:08		1,07	
	Bortskaffelse	C4	-	-		-	

Bilag 11. Beregningsgrundlag anlægsomkostninger

Bilag 11.1 Overslag på baggrund af forsøg (Murkonsol)

TABEL 11.1. Beregningsgrundlag, overslag baseret på test.

Basis	Materiale	Mængde	Enhed	Enhedspris ekskl. Moms		Pris ekskl. Moms	Links
				Enhedspris ekskl. Moms	Enhedspris ekskl. Moms		
						kr.	
Murkonsol (Indhentet tilbud)	Stål	1	lbm	735	1	735	Fra snak med producent
Genbrugsplast	Afstandsklods	4	stks	1,022	kr./stk	4,56	K-Klods
Træ	Monteringslægte	2	lbm	15,2	kr./lbm	33,94	
Stål	Franske skruer	4	stks	6,46	kr./stk	28,85	Trækonstruktionsskrue
Bagstop	PE skum	2	lbm	16	kr./lbm	35,72	Bagstop
Kalkmørtel	Mørtel, tør	3	Kg	9,664	kr./kg	32,37	KALK Rødvig Juramørtel
Transport af element	I lastbil, 200 km (2 ture på palle med 4 elementer på)	0,50	Paller	873	kr./palle	487,31	Bring priser
Nedtagning af element	2 personer, 15 minutter	0,5	timer pr. Nedtagning (2 gange 15 minutter)	500	kr./time	279,1	Beregning fra IPU
Håndtering af element på byggeplads på palle	1 person, 0,5 timers kørsel	0,125	timer/element	500	kr./time	69,78	Estimat
Montering af element, samt klargøring af mur	2 personer, 0,75 time/element	1,5	timer (2 gange 45 min)	500	kr./time	837,3	Fra interview med Logic og Co (beskrevet proces samt tidsforbrug)
Fugning/mørtling mellem elementer	1 person, 1 time	1	Time	500	kr./time	500	Københavns Fugeservice
Test af elementer	30000 I test fordelt ud over 100 m ²	100	m ² nedrevet bygning	24849	kr./nedrivning (100 m ²)	248,49	Indhentede test priser fra 2023
Opbevaring i 1 år		12	Måneder	940	kr./måned	112,8	Lager til leje
Vedligeholdelse				7	kr./50år	7	Danske tegl
Undgået affaldsafgift	Container til rene tegl I KBH området (leje 1.600, 1 dags 48kr.) fordelt på 100 elementer	0,2	Ton	192	kr./ton	-56,80	Junk Busters

Omregningsfaktor fra element til 1 m² (benyttet til processer: Nedtagning, Håndtering, Montering)

1,1164

Bilag 11.2 Overslag på optimeret proces (optimeret)

TABEL 11.2. Beregningsgrundlag, overslag – optimeret.

Basis	Materiale	Mængde	Enhed	Enhedspris ekskl. Moms	Enhed	Pris ekskl. Moms	Links
Murkonsol (Indhentet tilbud)	Stål	1	lbm	233,97	1	233,97	Fra snak med producent
Genbrugsplast	Afstandsklods	4	stks	1,022	kr./stk	4,56	K-Klods
Træ	Monteringslægte	2	lbm	15,2	kr./lbm	33,94	
Stål	Franske skruer	4	stks	6,46	kr./stk	28,85	Trækonstruktionsskrue
Bagstop	PE skum	2	lbm	16	kr./lbm	35,72	Bagstop
Kalkmørtel	Mørtel, tør	3	kg	9,664	kr./kg	32,37	KALK Rødviq Juramørtel
Transport af element	1 lastbil, 200 km (2 ture på palle med 4 elementer på)	0,0	Paller	873	kr./palle	0	Bring priser
Nedtagning af element	2 personer, 15 minutter	0,5	timer pr. Nedtagning (2 gange 15 minutter)	500	kr./time	279,1	Beregning fra IPU
Håndtering af element på byggeplads på palle	1 person, 0.5 timers kørsel	0,125	timer/element	500	kr./time	69,78	Estimat
Montering af element, samt klargøring af mur	2 personer, 0.75 time/element	0,667	timer (2 gange 20 min)	500	kr./time	372,13	Fra interview med Logic og Co (beskrevet proces samt tidsforbrug)
Fugning/mørtling mellem elementer	1 person, 1 time	0,5	time	500	kr./time	250	Københavns Fugeservice
Test af elementer	30000 l test fordelt ud over 100 m ²	100	m ² nedri-vet bygning	24849	kr./nedrivning (100 m ²)	248,49	Indhentede test priser fra 2023
Opbevaring i 1 år		0	måneder	940	kr./måned	0	Lager til leje
Vedligeholdelse				7	kr./50år	7	Danske tegl
Undgået affaldsafgift	Container til rene tegl i KBH-området (leje 1.600, 1 dags 48kr.) fordelt på 100 elementer	0,2	ton	192	kr./ton	-56,80	Junk Busters
Omregningsfaktor fra element til 1 m ² (benyttet til processer: Nedtagning, Håndtering, Montering)	1,1164						

Bilag 12. Pris per element

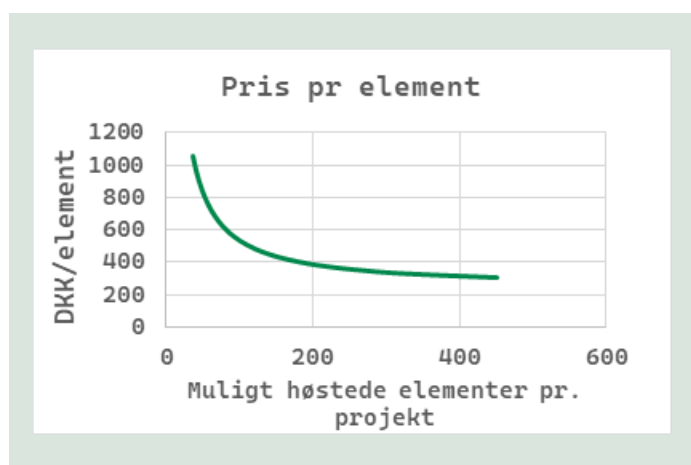
TABEL 12.1. Pris per element.

Pris pr. Element		Opstartspris			
Omkostning for nedtagning (mandetimer)	127 kr./element	Transport af maskiner	5640	kr.	Se baggrundsdata
Omkostning for maskinudleje	102 kr./element	Oplæring	3700	kr.	1 dags oplæring
Vedligeholdelse af værktøj	5	Test	20000	kr.	Teknologisk institut
Total			29340	kr.	

Total omkostning	235 kr./element
-------------------------	------------------------

<i>Foreslået salgspris af element</i>	<i>600 kr./element</i>
---------------------------------------	------------------------

Mængder elementer for at møde opstartspris	80 elementer
--	--------------



FIGUR 12.22. Pris per element, afhængigt af antal muligt høstede elementer.

Resume

Rapporten undersøger mulighederne for at automatisere selektiv høstning og klargøring af murelementer fra nedrivningsklare bygninger med det for-mål at øge genbrug og upcycling af murværk i dansk byggeri. Baggrunden er et betydeligt ressource- og klimaaftryk fra branchen, hvor 225.000 tons murstensaffald årligt downcycles, bl.a. pga. cementmørtels høje styrke, som vanskeliggør adskillelse af mursten og direkte genbrug.

Projektet udvikler et semi automatisk skæreværktøj – en “murhøster” – der effektivt kan udskære standardiserede murfelter (940 × 940 mm) med mini-mal beskadigelse. Værktøjets design omfatter præcisionsstyring, rotati-onsmekanisme og løfteramme, som forbedrer arbejdsmiljøet og reducerer tidsforbrug og omkostninger. Parallelt udvikles en algoritme, der optimerer udskæringsplaner baseret på bygningens geometri og økonomi.

Projektet kortlægger hele værdikæden fra screening af donorbygninger, udskæring, logistik og opbevaring til design og montering af murfelter i nyt byggeri. Et nyt designkoncept baseret på murkonsoller muliggør montering uden betonbagplade, hvilket reducerer CO₂ udledning markant og forbedrer fremtidig demonterbarhed. LCA analyser viser, at løsningen nærmer sig klimaperformance for genbrugte enkeltsten og væsentligt overgår både standardmurværk og tidligere upcycledede koncepter.

Økonomiske analyser peger på, at procesoptimering, standardisering og skaleret produktion er centrale for konkurrencedygtighed. Projektet anbefaler fortsat teknologisk udvikling, etablering af standarder og samarbejde på tværs af branchen.

Samlet viser projektet, at automatiseret høstning af murelementer kan blive en nøgleteknologi til at øge cirkulariteten i byggeriet – forudsat yderligere modning, branchetilpasning og politisk understøttelse.



Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35
5000 Odense C

www.mst.dk