



UDVIKLINGSPROJEKT

LERALLIANCEN

*Eksemplificering af stampet
lerjords potentiale som
en klimavenlig, bærende
bygningskomponent.*

LERALLIANCEN

Kopiering tilladt med kildeanvisning.

August 2025

Leralliancen er udviklet med støtte fra Realdania.



Forfattere og projektgruppe: Christian Hanak, Trine Sofie Dusine Schmidt Nielsen, Simeon Bamford, Marius Strathe Sørensen, Morten Emil Engel.

Layout/Illustrationer: Juul Frost Arkitekter og Reværk.

Tak til styregruppen, herunder Stig Hessellund, Mia Manghezi, Jens Breinholt, Christian Nørgaard, Michael Plesner.

En særlig tak til samarbejdspartnere og ekspertgruppe for deres bidrag til publikationen, stærke engagement og for at dele deres viden og erfaringer igennem udviklingsprojektet. Herunder Johan Klejs, Finn Kirkegaard Christensen, Mathias Thor, Jimmi Stok Jensen, Stefanie Weidner, Simon Steffen, Arash Ehtesham, Jesper Frank Axelsen, Benedicte Burchardt, Annette Beedholm Rasmussen, Jakob Fisker, Ida Bertelsen, Per Goltermann, Emilie Henriksen, Jens Lind Gregersen, Mikkel A. Thomassen, Niels Brix, Johan Jeppesen, Micki Aaen, Hans Jørgen Daabeck, Michael Uldahl, Sanne Kjældgaard, Michael Gasberg, Tonny Hjorth.

Indhold

04	Forord
05	Hvorfor stampet lerjord - og hvorfor nu?
07	En alliance opstår
08	Fordele ved stampet lerjord i byggeri
10	Materialet Lerjord igennem tiden - og ind i fremtiden
14	Metode Fra jord til byggeri
16	Råmateriale Fra moræneler til element - trin for trin
19	Refleksion: At gå fra 26 til 4 forekomster af énjord
28	Refleksion: Kalkstabiliseret ubrændt lerjord af DTU Sustain & Construct
30	Produktion Fra forskning til præfabrikeret byggeelement
40	Refleksion: Automatisering af Robot at Work
46	Dokumentation Fra kuber til element
58	Refleksion: Test af lerjord som byggemateriale af Teknologisk Institut
60	Refleksion: Når tyske standarder møder dansk byggeri af Werner Sobek
62	Anvendelse Materialets potentiale og begrænsninger
64	Refleksion: Byggeri og anvendelse af CPH Village, KIRKBI og PensionDanmark
66	Perspektiver Et ambitiøst udviklingsprojekt
72	Data-ark Præfabrikeret stampet lerjordselement
74	Vidensgrundlag

Forord

Jorden. Vores hjem i universet og kilde til alt kendt liv. Det er her vores mad gror, det er her vores huse bygges og det er her vores fremtid formes.

Vores bygninger trækker store vekslers på både klimaet og klodens ressourcer. En stor del stammer fra den energi, vi bruger til opvarmning, belysning og ventilation – men en voksende andel stammer fra de materialer, vi anvender til at opføre og renovere vores bygninger med. Der ligger derfor en bunden opgave for os, der beskæftiger os med det byggede miljø: Vi er nødt til at kigge nærmere på byggeriets materialeforbrug og ændre den måde, branchen i dag producerer, bygger og renoverer på. Vi har ikke andet valg.

Forskningen har gennem de seneste år gjort os klogere på planeten Jordens bæreevne. Den kaldes "carrying capacity", og det er et nybrud, at vi kan kvantificere præcist, hvor meget økosystemerne kan holde til. Det betyder også, at vi ved, hvor meget vi skal reducere byggeriets aftryk i et livscyklusperspektiv. For at holde os inden for planetens kapacitet. Og det kræver en enorm reduktion – på meget kort tid.

Realdania arbejder med byggeriets omstilling ved at give støtte til viden og eksempelprojekter inden for renovering, transformation og anvendelse af fornybare ressourcer, herunder genbrug og biobaserede materialer. Vi arbejder med både at støtte produktudvikling, nye værdikæder og bygherrer, som tilsammen skal vise vejen til fremtidens byggeri.

Og måske Jorden – eller jord – kan være en af nøglerne til at reducere byggematerialernes aftryk. Jord er i dag mest af alt en forhindring. Vi bruger ressourcer på at flytte voldsomme mængder jord rundt med gravemaskiner og lastbiler i arbejdet med byggeri og anlæg. Men med Leralliancen genopstår en gammel byggeteknik i ny form. Et forsøg på at genintroducere jord som en ressource i byggeriet ved at skalere den gamle teknik med stampet lerjord og gøre den relevant i et nutidigt industrialiseret byggeri.

Som supplement til de biobaserede materialer tilbyder ler en bred vifte af anvendelsesmuligheder – fra ubrændte mursten og plader med plantefibre til puds og maling, der både kan tætnes og forskønne. Ubrændt ler bidrager samtidig med naturlige egenskaber til fugt- og varmeregulering.

Og når lerjord stemples, kan den fungere som bærende konstruktion. Det reducerer behovet for træ og åbner mulighed for at trække på byggeriets omfattende erfaring med beton og præfabrikation. Her er med andre ord tale om et materiale, der både kan skåne klimaet og inspirere til nytænkning i byggeriets praksis.

Potentialet er der. Interessen fra bygherrer og rådgivere er der.

Men der er også barrierer: Manglende værdikæder, manglende robusthed i forhold til håndtering og fugt, brandtest og en økonomi, der kan være lige så tung, som jorden er at flytte.

Byggebranchen har brug for innovative samarbejder for at overkomme alle disse barrierer. Leralliancen er netop sådan et samarbejde mellem fremsynede aktører – både bygherrer og rådgivere – og jeg er meget glad for at have kunnet støtte og følge projektet.

Denne rapport er et skridt på vejen. Og vil nok ikke bringe os i helt mål, men forhåbentlig står der også en byggebranche klar til at bygge videre på erfaringerne og deltage i samarbejdet.

Rigtig god læselyst.

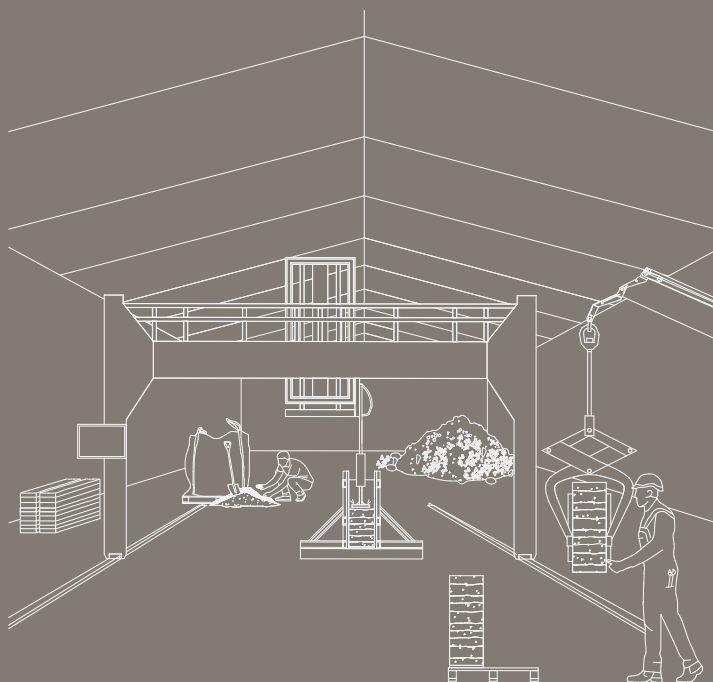
Stig Hessellund
Projektchef, Realdania

Hvorfor stampet lerjord – og hvorfor nu?

Byggeriet står over for afgørende udfordringer. Ressourcerne er knappe, klimaet kræver handling, og de nuværende byggemetoder er ofte både miljøbelastende og komplekse. Der er brug for et grundlæggende skifte i måden, vi bygger på – og i de byggematerialer, vi anvender.

Leralliancen er opstået som et fælles initiativ mellem en gruppe af innovative rådgivere, bygherrer, forskningsmiljøer og entreprenører som ønsker at fremme dette skifte. Med støtte fra Realdania har alliancen arbejdet på at udvikle stampet lerjord som et moderne og bæredygtigt byggemateriale – med potentiale til at erstatte beton i bærende konstruktioner, hvor det giver mening.

Formålet er at bringe et af verdens ældste byggematerialer ind i en nutidig og industrialiseret kontekst – dokumenteret, standardiseret og skalerbar – så det kan blive en reel del af fremtidens bæredygtige byggeri.



Parterne ønsker at erstatte beton med stampet lerjord, hvor det giver mening.

Målet er at eksemplificere stampet lerjords potentiale som en klimavenlig, bærende bygningskomponent.

Det er projektets ambition at genoplive materialet herhjemme, løfte det til et nyt udviklingstrin i en industrialiseret og skalerbar version og vise dets relevans som en central komponent i fremtidens arkitektur.

LERALLIANCEN

Realdania
Filantropi
Stig Hessellund

Bevilling

Arkitekter/ Bygherre

Juul Frost Arkitekter
Projektleder
Christian Hanak/
Trine Schmidt Nielsen

Pension Danmark
Bevillingsmodtager
Mia Manghezi /
Jens Breinholt

ReVærk
Materialeudvikling
Simeon Bamford
Marius S. Sørensen

KIRKBI
Christian Nørgaard

ENGEL ARCHITECTS
Design/kommunikation
Morten Emil Engel

CPH Village
Michael Plesner

DTU sustain
Råmateriale
Ida Bertelsen

Jens Lind Gregersen
Chefkonsulent / Geolog
Region Hovedstaden

Niels Brix / Johan Jeppesen
Case-study; Hus af jord

LCA
Micki Aaen
LCA specialist, Aaen
Engineering

Testparadigme
Werner Sobek

En Jord
Råmaterialeleverandør
Johan Klejs

Homogenisering

Sourcing

Workshop 01
Manuel stampning

Aug 23

Litteratur

Houben & Guillaud
Erden
BC Materials
Fetdeterre
Cycleterre

Robot at Work
Produktion
Mathias Thor

Aarhus Universitet
Indikative test
Annette Rasmussen
/ Jakob Fisker

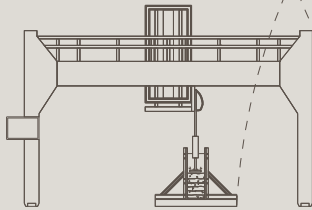
Cylindertest

Workshop 02
Håndtering,
produktion
byggeplads

Hans Jørgen Daabeck
Projektchef, Jorton
Sanne Kjældgaard
Entrepriseleder, Jorton
Michael Uldahl
Murermester, Jorton
Michael Gasberg
Kompetencechef, NCC

Organisering
Mikkel A. Thomassen
Smith Innovation

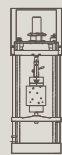
Produktionssetup



Produktions parametre

Workshop 04
Produktion
Robot At Work

Workshop 05
Produktion
Kuber, element



Trykstyrke



Teknologisk Institut
Testansvarlig
Arash Ehtesham /
Jesper Frank Axelsen

Komkurre korrektion



Workshop 03
Hydraulisk/
pneumatisk
stampning
AU

Casebyggerier

Case 01
Juul Frost Arkitekter+
Pension Danmark

Case 02
ReVærk+
KIRKBI

Case 03
ENGEL ARCHITECTS+
CPH Village



Travbyen KIRKBI

Workshop 06
Produktions opstart
Kuber



Workshop 07
Produktions opstart
Elementer

Spydspidstest



Fuldskalatest



Verificering



DTU Construct
Test og verificering
Per Goltermann

Jorton
Opmuring

Aug 25

Werner Sobek
Ingeniør
Stefanie Weidner /
Simon Steffen

Introduktion

En alliance opstår

Et strategisk samarbejde

Leralliancen er initieret af en gruppe rådgivere og bygherrer og omfatter i dag en bred kreds af samarbejdspartnere. Fra råmaterialeleverandører én jord, til tekniske tests ved Teknologisk Institut, DTU og Aarhus Universitet, og videre til robotbaseret produktion i samarbejde med Robot At Work. Et testparadigme er udarbejdet i samarbejde med ingeniørerne hos Werner Sobek, hvis internationale erfaringer bidrager med vigtige perspektiver på materialets potentiale.

Projektets ekspertpanel tæller bl.a. Region Hovedstaden, NCC og Jorton, som sikrer både faglig dybde og praksisnær validering.

Sideløbende følger alliancen den internationale udvikling i lande som Tyskland, Schweiz, Østrig, Belgien og Frankrig, hvor stærke forskningsmiljøer og pionerbyggerier har banet vejen for stampet lerjord. Samtidig spirer beslægtede initiativer frem på flere kontinenter – og materialets globale potentiale kalder på mere internationalt samarbejde og erfaringsudveksling på tværs af klimazoner og byggepraksis.

4 til 1 planet som afsæt

Leralliancen udspringer af de første erfaringer fra 4 til 1 planet-programmet – et initiativ støttet af Realdania og Villum Fonden, som fremmer innovation og nedbringer boligbyggeriets klimaaftryk.

Gennem pilotprojekter har parterne i 4 til 1 planet testet nye metoder og materialer, herunder stampet lerjord, med fokus på både CO2-reduktion og cirkulær ressourceanvendelse. De foreløbige livscyklusberegninger viser, at kombinationen af lerjord og træ kan nedbringe udledningen med op til 75 % i forhold til konventionelt byggeri.

Arbejdet viser også, at materialets kompleksitet kræver fælles indsats: Det skal dokumenteres, standardiseres og videreudvikles teknologisk. Netop derfor er Leralliancen opstået – som en platform for at samle viden, overvinde barrierer og udvikle nye løsninger i fællesskab og på tværs.

Et fælles engagement

Leralliancen bæres frem af et stærkt fagligt engagement – både internt blandt partnerne og via bidrag fra eksterne eksperter og institutioner. Undervejs er det blevet tydeligt, at materialet – og de værdier det repræsenterer – vækker nysgerrighed, motiverer og samler. Det skaber ikke kun nye tekniske løsninger, men også nye samarbejdsformer og en fælles retning og ambition om at gentænke byggeriets fremtid.

Fordele ved stampet lerjord i byggeri

Stampet lerjord har dokumenterede egenskaber:

Lavt CO2-aftryk og lavt energiforbrug - uden brænding eller brug af kemikalier *

Lokal tilgængelighed og høj grad af cirkularitet - kan formes, genbruges og tilbageføres til jorden efter brug **

Gode fugtregulerende og termiske egenskaber *

Naturligt brandhæmmende *

Bidrager til sundere indeklima - kan absorbere luftbårne partikler *

Mulighed for eksponeret overflade og som bærende konstruktion **

Potentiale for automatisering og industrialisering via nye teknologier **

* Egenskaberne er baseret på dokumentation fra en række studier, erfaringer fra konkrete byggeprojekter og forskningsinitiativer.

** Baseret på egne resultater og fund gjort i udviklingsprojektet.

Materialet

Lerjord igennem tiden - og ind i fremtiden

Hvorfor lerjord som fremtidens byggemateriale?

Lerjord er et af verdens ældste og mest udbredte byggematerialer. På verdensplan bor omkring en tredjedel af befolkningen i bygninger opført i ubrændt lerjord. I Danmark har vi historisk set også brugt ler i byggeriet, i en række forskellige byggeteknikker, herunder lerklinede tavle i bindingsværksbyggeri, ubrændte lersten og som stampet lerjord med og uden naturfibre. Interessen aftog dog i takt med industrialiseringen og betonens indtog og udbredelse. I dag oplever materialet en global renæssance, især i lande som Tyskland, Schweiz og Frankrig, hvor moderne arkitektur og forskning går hånd i hånd.

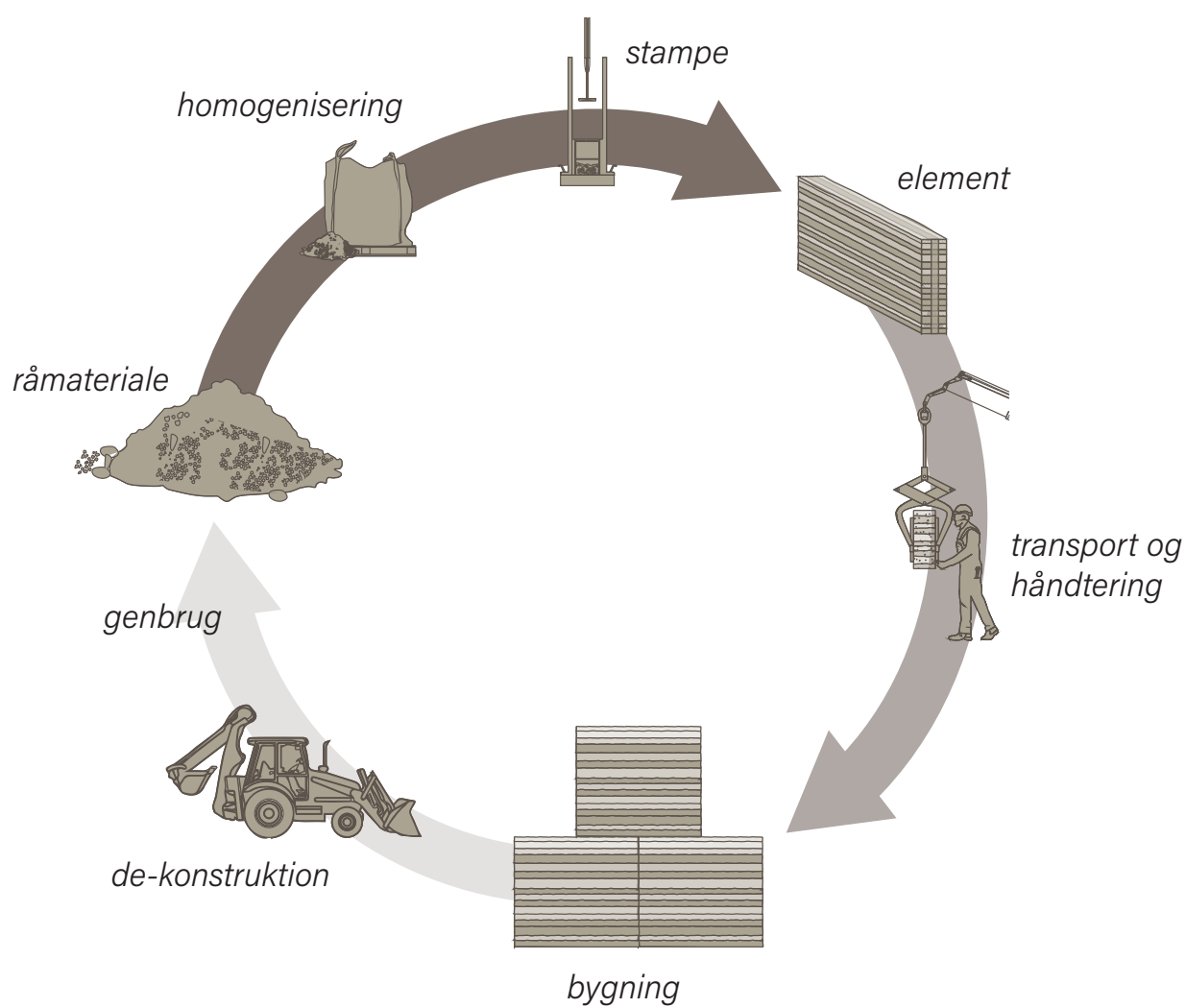
Samtidig vokser behovet for lokale, klimavenlige byggematerialer. Her er anvendelsen af træ ofte i fokus, men meget kommer fra udlandet og kræver transport over lange afstande. Danmark har begrænsede skovressourcer, mens lerjord findes næsten overalt – og ofte er tilgængelig lige dér, hvor vi bygger.

Anvendelse af beton betyder stor udledning i produktion og prognoser viser at ressourcer som sand og grus under pres. Prognoser viser, at Danmark kan stå over for reel mangel inden for de næste 30 år (NIRAS, 2018).

Ved at anvende overskudsjord, der frigøres i stort omfang i forbindelse med byggeri og anlægsarbejde – omkring 15 millioner tons om året (Region Hovedstaden, 2025) – kan vi både mindske mængden af affald og reducere materialetransporten. En stor del heraf er moræneler, som i dag primært anvendes til vejopfyld og støjvolde, men som i mange tilfælde vurderes at være velegnet til stampet lerjords byggeri.



Moræneler inden stampeproces



Hvad er stampet lerjord?

Stampet lerjord (også kaldet rammed earth) er en byggeteknik, hvor fugtig moræneler/lerjord komprimeres i lag i en form.

Moræneler (ler-till) er dannet direkte fra gletscheris, typisk ved smeltning. Under istiderne har gletscherne bevæget sig henover landet og dels aflejret usorterede, blandede jordarter: moræneler, sand og grus. Det er dårligt sorteret, stenholdigt og kan indeholde materiale både fra fjerne egne – fx grundfjeldet i Norden – og fra lokal undergrund. Ligger det over kalk, er det ofte mere kalkrigt end moræneler over ler eller sand.

Aflejringen sker på mange måder, hvilket giver stor variation i kornstørrelse og mineraler – både lodret og på tværs af områder. Når gletscherne transporterer materialet, kan det blive knust (især de største partikler) og slebet, hvilket giver en blanding af grove fraktioner (grus/sand) og fine fraktioner (silt). (Torsten Holmboe, Teglværksler i Danmark)

Moræneler dækker op imod 40% af de overfladenære (kvartære) jordlag. Moræneleret er den mest udbredte jordtype i store dele af Danmark og kan mange steder således udvindes 1-3 meter under humusjordlaget. Fordelingen af aggregater ler, silt, sand, grus og sten har lokale variationer og har afgørende betydning for egnetheden af materialet som konstruktivt byggemateriale.

Selve forarbejdningsprocessen foregår som følger:

1. En forskalling (form) opsættes
2. Lerjord fyldes i - et lag ad gangen
3. Hvert lag stemples hårdt med tryk
4. Lag på lag bygges op til den ønskede højde
5. Element afforskalles og sættes til tørring

Det er netop denne proces, Leralliancen arbejder med at industrialisere – bl.a. ved hjælp af robotteknologi – så materialet kan anvendes effektivt i professionelt byggeri.

Et svar på flere udfordringer

Stampet lerjord adresserer to af byggeriets største udfordringer:

- Substitution af beton – med et bærende og CO2-venligt materiale med høj densitet
- Håndtering af overskudsjord – ved at anvende det som en ressource fremfor et affaldsprodukt

Traditionelle betonbyggerier har høj klimabelastning og lav genbrugsværdi. Træ rummer store kvaliteter, men har ofte begrænsninger ift. brand, fugt og akustik. Der er i byggebranchen behov for alternativer, hvis egenskaber kan supplere og i visse anvendelser erstatte disse materialer.

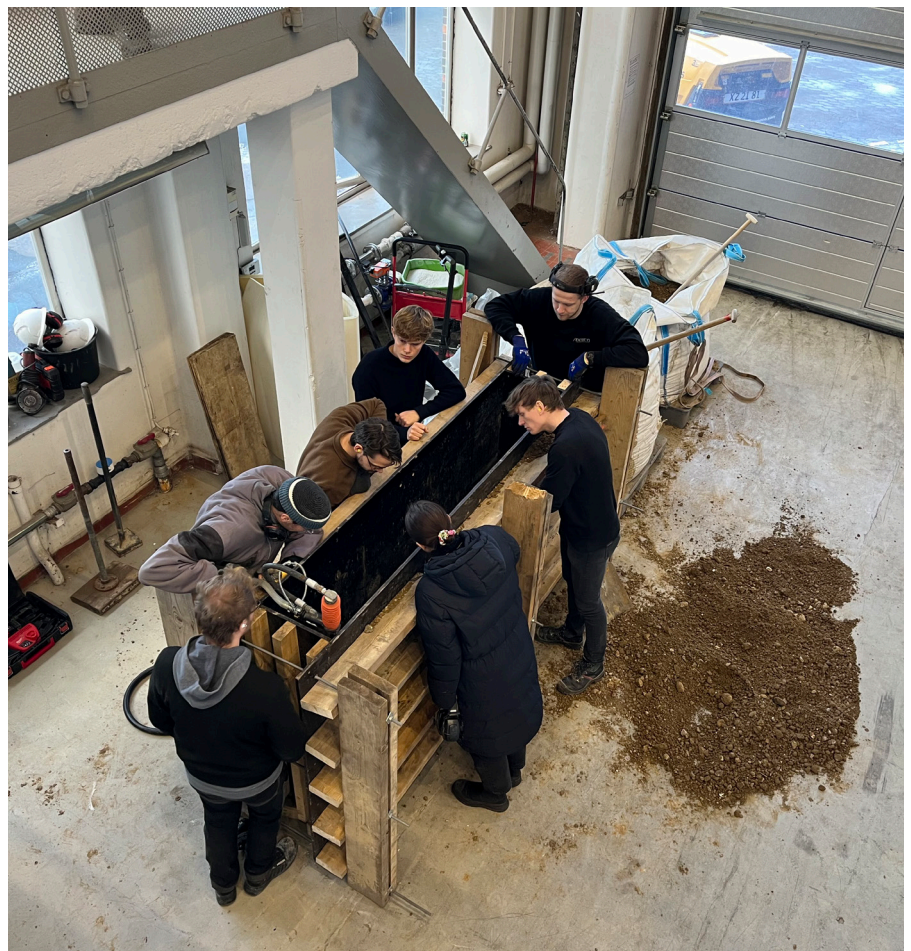


Foto fra Workshop 01 - Manuel stampning af element

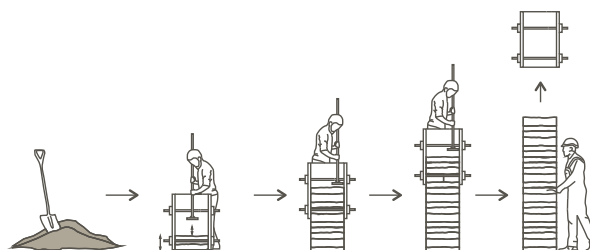
Gentænkning af den historiske byggeteknik

Som historisk byggeteknik er stampet lerjord velkendt og udbredt. Med Inspiration fra Europa har stampet lerjord været forsøgt indført i Danmark siden franskmændene Francois Cointereaux tilbage i 1800-tallet udgiver den første oversatte guide til stampede lerkonstruktioner. I mellemkrigsårene står arkitekt Sven Risom for flere danske lerhuse og en guide til lerkonstruktioner. Senere bliver teknikken "genopdaget" i 80'erne og 90'erne af tegnestuen Vindrosen med opførelse af ungdomsboliger i Svebølle og udgivelse af bogen *Lerjord* som byggemateriale. Historisk har byggeteknikken været et svar på ressourcemæssige udfordringer - også i Danmark.

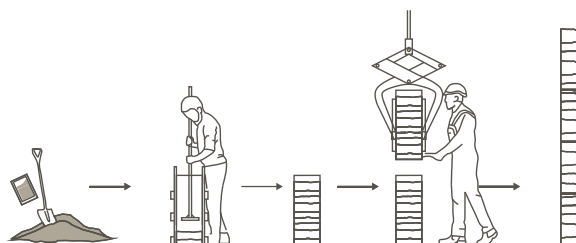
I dag er det Leralliancens mål er at vise, at materialet også idag har et stort potentiale og kan bruges konstruktivt og er skalerbart - som et reelt alternativ til beton i fremtidens byggeri. Vi ønsker ikke blot at genopdage et gammelt materiale, men at bringe det ind i fremtiden med moderne dokumentation, teknologi og produktionsmetoder. Leralliancen er ikke kun et testprojekt - det er udtryk for en ambition om at ændre vores måde at tænke materialer på. Stampet lerjord viser, at vi kan bygge mere ærligt, lokalt og klimavenligt - uden at gå på kompromis med hverken funktion, æstetik eller kvalitet.

Med forskning, test og udvikling arbejder Leralliancen for at gøre stampet lerjord til et professionelt, bæredygtigt og skalerbart byggemateriale - også i større byggerier og offentlige udbud. Denne ambition deler projektet med en række nutidige initiativer på tværs af Europa, hvor materialet de senere år har fundet nogen genkomst. Her arbejdes der dog til stadighed oftest i forskningsregi eller i eksperimentelle byggerier, ligesom materialet ofte anvendes mere for dets æstetiske kvaliteter end andre praktiske egenskaber som f.eks. dets indeklimafordele. I Leralliancen arbejder vi for at eksemplificere stampet lerjords potentiale både som en klimavenlig, markedsduelig og bærende bygningskomponent.

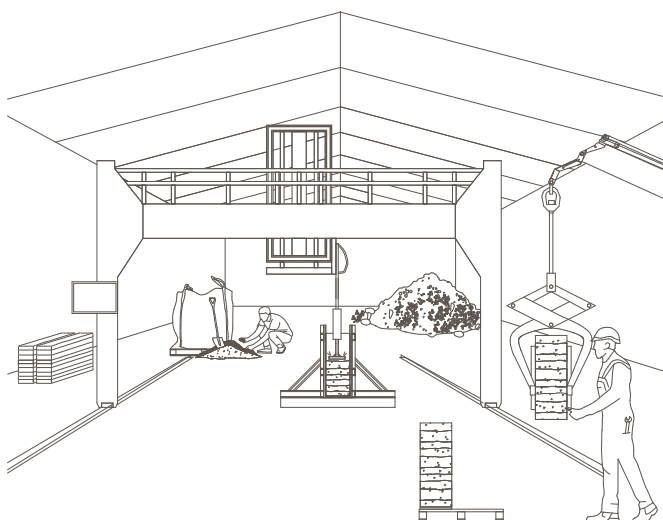
Stampet lerjord støbt på stedet



Præfabrikerede elementer



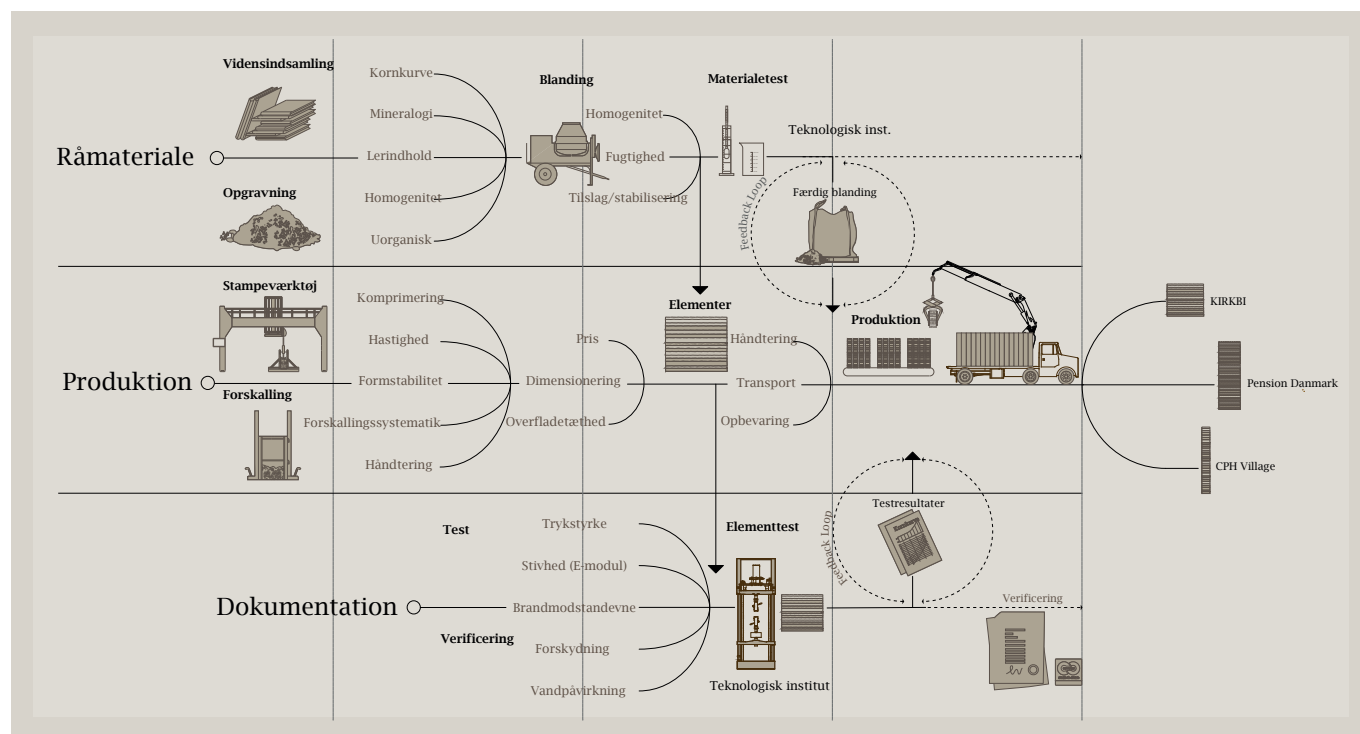
Halvautomatisk produktion i Leralliancen



Metode

Fra jord til byggeri

Skal vi anvende stampet lerjord i større byggerier, er det nødvendigt med en systematisk dokumentation af materialets egenskaber – fra råmateriale til produktion til verificering. Leralliancen har derfor udarbejdet et fuldt test- og udviklingsprogram, hvor hvert trin bidrager til materialets godkendelse og skalerbarhed.



Procesplan og de tre spor udviklingsprojektet systematisk har gennemgået: Råmateriale, produktion og dokumentation.

Fra plan til praksis – og tilbage igen

Udviklingen af stampet lerjord som byggekomponent kræver at der gennem en iterativ proces arbejdes tværfagligt blandt en stor gruppe samarbejdspartnere. Et eksperimenterende og bredspektret spænd fra lavpraktisk jordhåndtering til digital kodning. Et arbejde, hvor materialeforståelse bliver opbygget gennem håndholdte forsøg, erkendelser og gentagelser. Hver test bidrager til at gøre os klogere – og rejser samtidig ofte nye spørgsmål.

Vi startede med ambitionen om et udviklingsforløb, hvor alle elementer i procesplanen vægtes lige – fra materialetest til design af byggelement, robot-automatisering herunder påfyldning, afforskalling og komprimering til konkrete byggeprojekter. Undervejs blev det tydeligt, at ét område krævede mere opmærksomhed end forventet: håndtering og kvalitetssikring af råmaterialet.

Kompleksiteten er grundlæggende at skaffe ensartet råmateriale på tværs af testtrin, samt opretholde det korrekte vandindhold for materialet. Dette gør det mere komplekst at fortolke og drage entydige konklusioner i de indledende tests.

Vi bruger derfor en stor del af projektet på at forfine testmetoder, forstå variationer og afklare materialets præmisser. Det er både en teknisk og erkendelsesmæssig rejse – hvor vi må prioritere af flere omgange, for at holde vores ambition om at nå i mål med et dokumenteret byggemateriale.

Ambitionen er endvidere at nå i mål inden for en forholdsvis kort tidsramme på blot to år. Derfor har vi ikke mulighed for at afsøge de afvigelser, vi oplever fuldt ud. Da vi opnår tilfredsstillende resultater ved en forbedret råmaterialeblanding, vælger vi på den baggrund at fortsætte testfaserne herudfra.

Fremover er det en fordel at udbygge forståelsen af de grundlæggende forhold omkring udfald og ensartethed i råmateriale, for dermed at sikre en kontinuerlig homogenitet og kvalitet. Her afhjælper skalering af råmateriale-mængder imidlertid også disse udfordringer.



Det første robotstampede lerjordsselement og test på kubniveau

Bærende element til indvendig brug

Fra projektets begyndelse er ambitionen at udvikle en byggeklods, der kan anvendes i tre konkrete case byggerier – både som indvendige bærende vægge i to og tre etager, og som facadeelement.

Tidligt i forløbet bliver det dog klart, at der var behov for at fokusere indsatsen grundet et omfattende testforløb med tilhørende økonomi. Derfor præciseres målet: at udvikle og dokumentere stampet lerjord som et bærende bygningselement til indvendig brug.

Med dette fokus opnår vi i projektet en realistisk afgrænsning og mulighed for særligt fokus på test, dokumentation og udvikling af et produkt, der kan anvendes i moderne byggeri – og som kan tilpasses de krav, den professionelle byggebranche stiller.



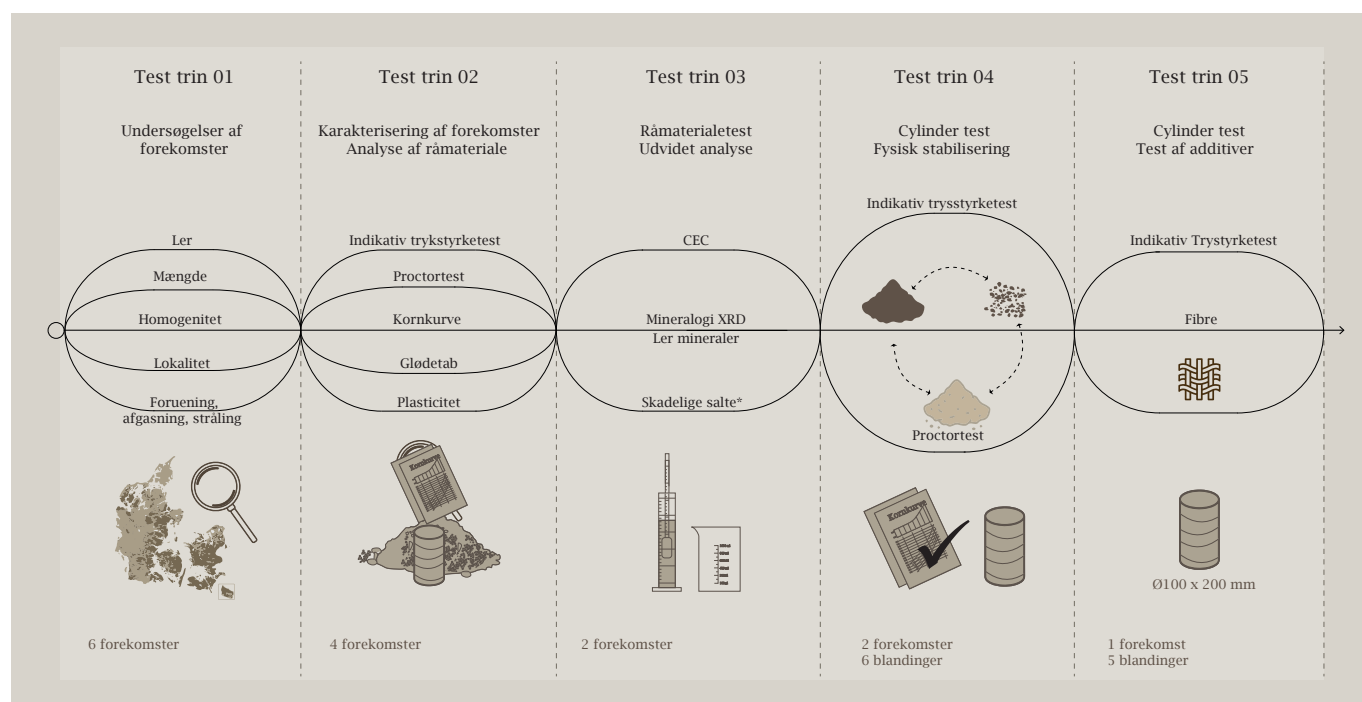
Den tyske standard - DIN 18945 - bidrager til at sætte rammerne for både testforløbet, dokumentationskrav og paradigme for projektering med stampede lerjordsselementer.

RÅ MA TERI ALE

Råmateriale

Fra moræneler til element - trin for trin

For at sikre kvaliteten og den tekniske dokumentation gennemfører Leralliancen et omfattende testforløb, opdelt i otte testtrin – fra råjord til færdigt byggeelement. I de første fem testtrin tester og undersøger vi råmaterialet, hvilket beskrives nærmere i dette afsnit. De sidste tre testtrin fokuserer på test og dokumentation af komprimerede kuber og byggelementer, hvilket uddybes i afsnittet om dokumentation.



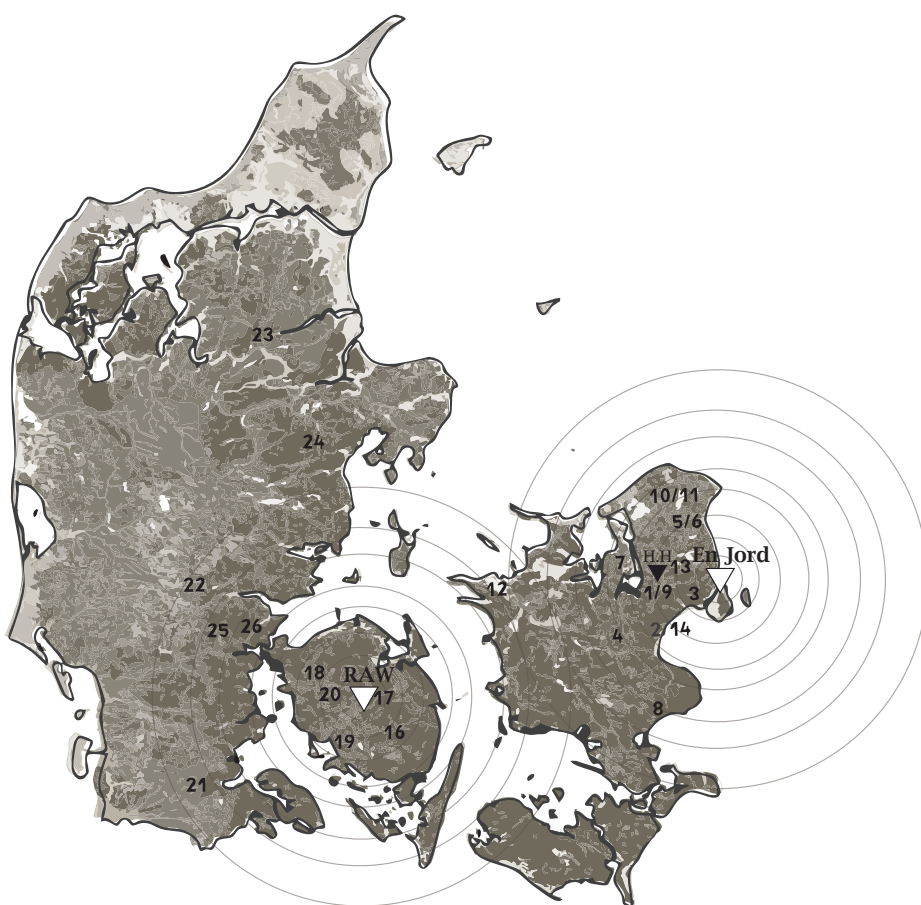
Projektet undersøger, hvordan overskudslerjord fra forskellige kilder kan anvendes til stampede elementer, trods krav om høj kvalitet og ensartethed i moderne byggeri.

Da lerjord er et naturligt materiale varierer forekomster i kornstørrelse, fugtindhold og mineralindhold. Derfor udvikles et testprogram, som spænder fra råmateriale til færdige elementer og vurderer disse ud fra tekniske, logistiske, miljømæssige og lovgivningsmæssige kriterier. Ved at starte med råmaterialet er det målet, at opnå erfaring og viden, som

ikke blot muliggør anvendelsen i tre planlagte casebyggerier, men også at skabe et fundament for udbredelse, og bredere accept af materialet i det konventionelle danske byggeri.

I projektet søges det bevidst at arbejde med lerjord fra forskelligartede kilder. Tre typer af forekomster indgår – grusgrave, modtageanlæg og byggepladser – for at afprøve løsninger på tværs af forskellige materialestrømme og geografiske forhold. Målet er på sigt, at blive i stand til at indsamle, karakterisere og anvende et bredt udvalg af overskudsjord.

Testparadigme, trin 01-05 ud af i alt 08 testtrin



1	Nærheden	Hedehusene
2	JC	Greve
3	RGS Kalkstab	Selinevej
4	RGS	Gadstrup
5	TSG	Kvistgård (overjord)
6	TSG	Kvistgård (harpeaffald)
7	TSG	Landerslev
8	Lhoist Blåler	Faxe
9	Nymølle H.	Hedehusene
10	FujiFilm	Hillerød
11	Novo	Hillerød
12	Novo	Kalundborg
13	PD	Ballerup
14	SCT	Greve
15	Grusgrav	Valby, NS
16	Jordrens Syd	Ringe
17	Nymølle	Stenløse
18	Nymølle	Alsbo
19	Nymølle	Skallebjerg
20	OUH	Odense
21	Jordrens Syd	Aabenraa
22	Grusgrav	Vandel
23	Randers Tegl	Hobro
24	Nymølle	Haldum
25	Nymølle	Almind
26	Autismecenter	Fredericia

En ambition som er nødvendig for en mere klimavenlig udvinding og produktion. I projektet har vi forsøgt at indsnævre de kritiske parametre for stampet lerjords teoretiske egnethed, men undervejs har det også handlet om at finde løsninger, der fungerer i praksis, og om at identificere de begrænsninger, der følger med når, man udvikler og skalerer brugen af naturlige materialer.

Test trin 01

Kortlægning af forekomster

Udgangspunktet for projektet er at kortlægge og karakterisere et udsnit af danske forekomster af moræneler med henblik på anvendelse i byggeri.

Målet er at opnå dybere forståelse for råmaterialets sammensætning og ligeledes undersøge:

Kan vi, ved at indhente råmateriale med forskelligt geografisk og ressource-mæssigt ophav pege på tendenser for råmaterialet i Danmark eller definere et udfaldsrum i råmaterialets sammensætning.

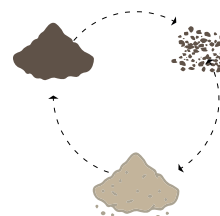
Igennem projektets testtrin udvælges først 4 og slutteligt 1 forekomst som vi, efter bedste skøn, vurderer repræsentativ, tilgængelig og brugbar ift. umiddelbare mekaniske egenskaber.

En jord foretager en landsdækkende screening af 26 jordforekomster med bred geografisk spredning. Disse inkluderer både overskudsjord fra byggepladser, jord fra modtageanlæg og materiale fra grusgrave. Screeningen indebærer indikative kornkurve analyser og praktiske betragtninger. Ud fra denne kortlægning vælger vi fire forekomster, som repræsenterer forskellig geologisk variation og forskellige ophav.

Som konklusion på testtrin 1 udvælges følgende forekomster til videre testtrin:

- Nymølle Stenløse (grusgrav, Fyn) senere udskiftet med Nymølle Hedehusene (grusgrav, Sjælland)
- J.C. Greve (byggeplads, Sjælland)
- Nærheden (byggeplads, Sjælland)
- Nymølle Haldum (grusgrav, Jylland)

Se bilag 1



En kornkurve beskriver sammensætning af kornstørrelser for en given jordart. Kornstørrelsesfordelingen har indflydelse på jordartens styrke, lejringstæthed, permeabilitet og kohæsion. Kornstørrelsesfordelingen bestemmes bl.a. ved at sigte udvalgte fraktioner af jorden. Kornkurven viser kornstørrelsernes kumulative vægtandelen.

Sten	200-20 mm
Grus	20-2 mm
Sand	2-0.06 mm
Silt	0.06-0.002 mm
Ler	0.002-0 mm

Refleksion

At gå fra 26 til 4 forekomster

Johan Klejs, énjord

Enjord har haft ansvaret for materialeudvinding i projektet. De har stået for kortlægning, screening og analyse af lerjord fra forskellige kilder samt udvikling af råmaterialestrategier. Deres arbejde danner grundlaget for udvælgelse af lerforekomster til videre test og sikrer, at råmaterialet opfylder kravene til præfabrikerede byggematerialer.

Hvordan har I udvalgt de fire jordforekomster til de videre tests?

Udvælgelsen bygger på en kombination af tekniske, logistiske og strategiske hensyn. Først og fremmest har vi set på kornkurverne i de foreløbige analyser. De skal enten allerede ligge inden for det anbefalede indeks eller kunne bringes derhen med relativt enkle justeringer — fx ved tilsætning af sand.

Hvilken betydning har det i praksis?

Det betyder, at vi kan minimere behovet for kompliceret forarbejdning. Jo tættere vi er på den ideelle kornkurve fra start, jo mere effektivt og økonomisk bliver det at arbejde med materialet i større skala. For eksempel ligger J.C. Greve allerede helt inden for det anbefalede indeks, mens resterende alle har potentiale, men kræver lidt tilpasning, især på grund af et højt lerindhold.

Hvad med tilgængeligheden – hvor vigtigt er det parameter?

Det er helt centralt. Vi har vurderet, om jordforekomsten kan leveres stabilt og i de nødvendige mængder. Grusgrave som Hedehusene og Haldum har en klar fordel her: De har volumen, kontinuitet og det nødvendige maskinel til at tørre

og bearbejde jorden. Men også byggepladserne J.C. Greve og Nærheden er interessante, fordi de er en del af store, langstrakte projekter. Vi har tidligere arbejdet med jorden herfra og kender både kvalitet og logistik.

I har valgt forekomster fra både grusgrave og byggepladser – hvorfor blande dem?

Det giver os mulighed for at teste forskellige typer materialestrømme og finde løsninger, der fungerer både i industrielle og mere urbane sammenhænge. Det er vigtigt for os at forstå bredden i det danske jordlandskab, så vi kan udvikle metoder, der kan skaleres på tværs af typer og steder.

Der er også en tydelig geografisk spredning – er det bevidst?

Ja, helt klart. Leralliancen arbejder landsdækkende, så vi har ønsket at teste forekomster fra både Jylland, Fyn og Sjælland. Det var faktisk årsagen til, at vi i første omgang havde valgt Nymølle Haldum fremfor Nymølle Hedehusene. Grundet vedvarende tilgængelighed endte vi dog med at anvende Hedehusene, og på den måde er det jo også et godt eksempel på hvor mange parametre der skal tages med i betragtning når man skal udvælges en forekomst.



5 indsigter i håndtering af råmateriale

Udarbejdet i samarbejde med énjord

Tid er afgørende. Hvis det skal lykkes at anvende overskudsjord fra montageanlæg og byggeplads, skal samtlige råmaterialetest udføres inden for en kondenseret og effektiv periode på cirka en uge. Derfor anbefales det, at der arbejdes med den mest stabile forekomst, som er overjord fra grusgrave.

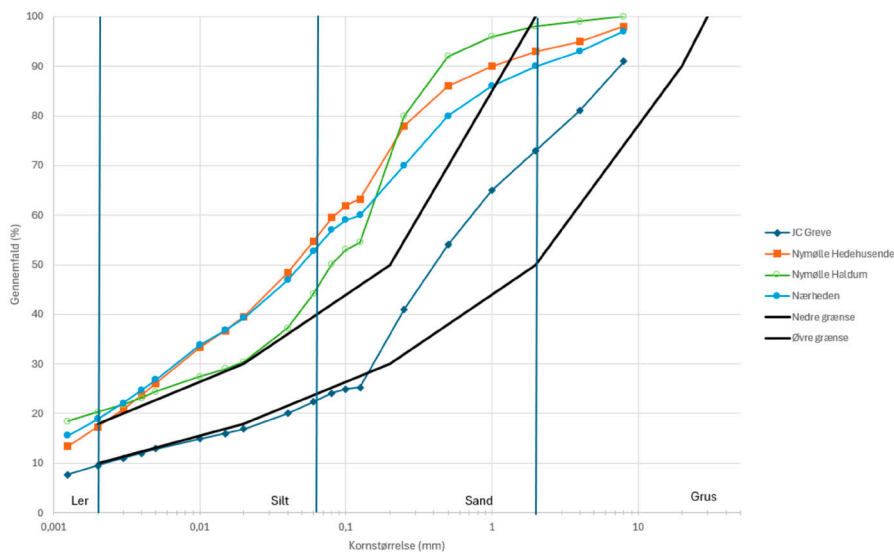
Skala er en vigtig faktor. Vi kan modtage 100–200 ton ad gangen og har mulighed for at koble os på de større strømme gennem eksisterende transportlogistik.

Flytning bør minimeres, og jorden flyttes helst kun én gang, da gentagne flytninger øger omkostninger og kompleksitet. En ekstra flytning kan dog være nødvendig for at sikre opkvalificering og præcis materialebehandling.

Sæson har indflydelse på råmaterialeudvindelsen. Våde vintre besværliggør materialeproduktionen, da både soldning og stampning kræver tør jord. Derfor planlægges tørring om sommeren i ventilerede haller eller halvtage for at sikre materiale til vinterproduktion.

Forureningsgrad skal overholde krav iht. Klasse 1 / Kategori 0–1 hvis materialet skal anvendes i byggeriet. Jordens forureningsgrad vurderes tidligt, og selvom afgangning først testes senere, er klassificeringen afgørende for anvendeligheden.

Kornkurve



Resultat af kornkurveanalyser

Nymølle Hedehusene:
Ler 17,3%, Silt 37,4 %, Sand 38,7%, Grus 7%

J.C. Greve:
Ler 9,5%, Silt 12,9 %, Sand 50,6%, Grus 27%

Nærheden:
Ler 18,9 %, Silt 33,8 %, Sand 37,3%, Grus 10%

Nymølle Haldum:
Ler 20,3%, Silt 23,8 %, Sand 53,9%, Grus 2%

Kornkurve over fraktioner målt på sigtesøjle og Sedigraph af Teknologisk Institut, se bilag 6. Øvre og nedre grænse refererer til den optimale sammensætning som defineret i Houben et al., 1994, Earth Construction: A comprehensive guide, ITDG Publishing

Test trin 02-03

I testtrin 2-3 karakteriseres sammensætning og egenskaber for de fire udvalgte lerjordsforekomster. Med Teknologisk Institut som primær testpartner gennemføres en række test, som definerer de kritiske parametre for egnethed af den stampede lerjord. Som konklusion på disse testtrin udvælges en forekomst til de videre testtrin.

Testforløb og metoder udarbejdes i et tæt samarbejde mellem rådgiver, Teknologisk Institut, Werner Sobek og DTU, med inspiration i kendt forskning og litteratur samt tyske standarder.

Kornkurve og fraktioner

Kornkurveanalyser på tværs af de fire forekomster viser gennemgående et høj indhold af silt og fint sand og lav andel af grovere fraktioner. Hvilket stemmer overens med generelle tendenser for dansk moræneler, karakteriseret ved en bimodal kornkurve med to "toppe" (Torsten Holmboe, Teglværksler i Danmark 2001)

Overordnet har kornkurverne de samme tendenser som de indikative kornkurver indhentet af énjord. Dog er der i Teknologisk Instituts prøver generelt et højere indhold af ler og lavere indhold af grus, hvilket kan forklares ud fra den valgte testfraktionen maksimal partikelstørrelse 16mm.

Se bilag 6

Trykstyrke

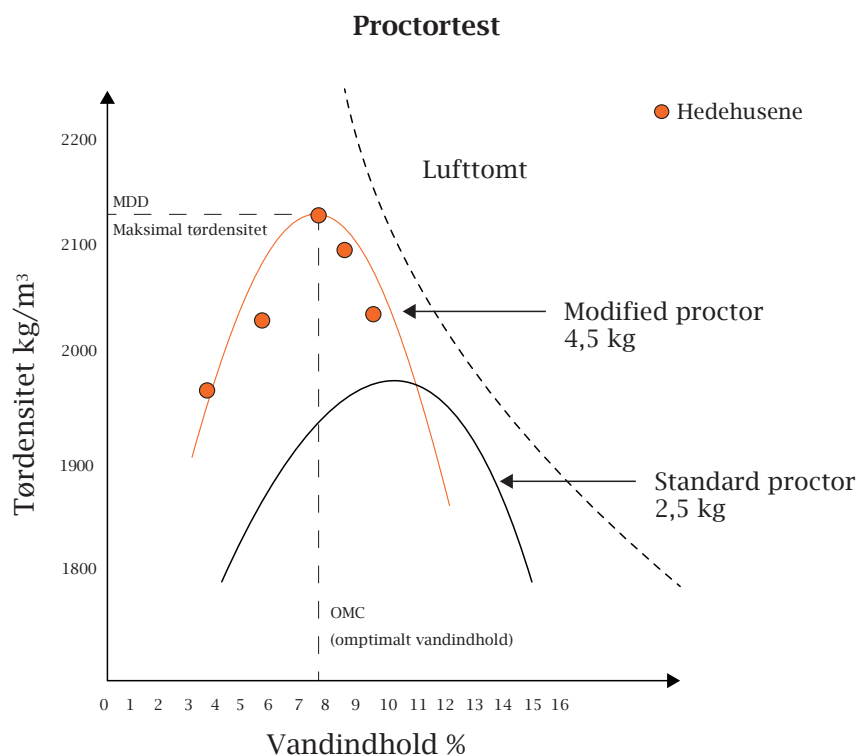
Trykstyrken er det ultimative parameter, som bruges til vurdering af den stampede lerjords konstruktive egnethed i projektet. I modsætning til mange konventionelle materiale afhænger styrken af stampet lerjord ikke af brænding eller hærdning. Styrken af stampet lerjord kommer i høj grad af lerets molekylære struktur, hvis sammenhængsevne (kohæsion) binder jordens aggregater sammen i plastisk tilstand. Foruden leren er også tætheden eller kompressionen af jorden ved stampning afgørende for lerjordens styrke. Udover disse principper er der en lang række parametre herunder sammensætning, vandindhold og tørring, som er kritisk for lerjordens styrke.

For at vurdere materialets egnethed som byggemateriale testes testemners trykstyrke for de udvalgte forekomster. Testene udføres på cylindre Ø100 og trykprøves efter samme fremgangsmåde som DTU. Testene viser en lavere trykstyrke end forventet. Årsagen vurderes umiddelbart at skyldes usikkerheder omkring testmetode. Dog kan styrkerne vurderes komparativt.

Gennemsnit for trykstyrketest:

- Nymølle Hedehusene: 1,06 mPa
- J.C. Greve: 0,85 mPa
- Nærheden: 0,86 mPa
- Nymølle Haldum: 1,23 mPa

Se bilag 3



Vandindhold og komprimering

Det optimale vandindhold defineres ud fra den fugtighed hvor materialet opnår den højeste tørdensitet. Til dette formål udføres proctor-tests for de fire udvalgte forekomster. Den højeste tørdensitet angiver iht. litteraturens anvisninger der hvor vi ser den største styrke, idet der synes at være en sammenhæng mellem densitet og styrke i stampet lerjord.

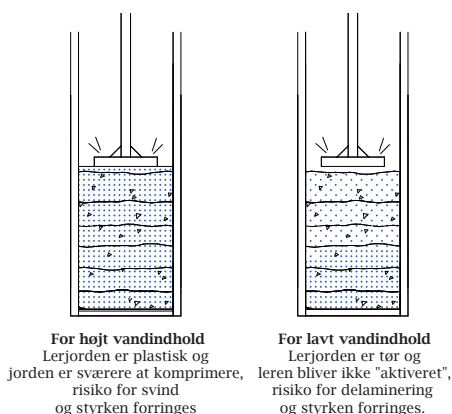
Vi udfører modified proctor-test, hvilket betyder at der er et tungere lod på stampen (4,5 kg) for at simulere den højere trykpåvirkning, som påtænkes i produktionen af elementerne.

Resultat af modified proctor:

- Optimalt vandindhold OMC: 7,6-7,8%

Generelt for forekomsterne ligger det optimale vandindhold ved testmetode lavere end hvad der generelt ses og anbefales for stampet lerjord omkring (8-12%). Senere undersøgelser sår også tvivl om denne metode (Bertelsen, I.). Det optimale vandindhold er foruden brug af proctortest formentlig også afhængig af lerjordens plastiske egenskaber.

Se bilag 12-15



Proctor kompressionstest er en laboratoriemetode til eksperimentelt at bestemme det optimale vandindhold, hvor en given jordtype bliver mest tæt og opnår sin maksimale tørdensitet

Glødetab og organisk indhold

Gennem glødetabstest og test af skadelige salte vurderes lerjordenes egnethed. I glødetabstesten bestemmes indholdet af organisk materiale, Udover JC Greve har alle prøverne et relativt lavt organisk indhold, og derudover bestemmes alle prøverne til at have et tilladeligt indhold af skadelige salte iht. til DIN 18945.

Se bilag 2

Plasticitet

Lerjord er kendetegnet ved sin høje plasticitet, hvilket betyder, at den kan formes, når den er våd, men bliver hård, når den tørrer. Disse egenskaber skyldes i høj grad lermineraleernes evne til at absorbere og afgive vand, hvilket får leret til at svulme op (ekspansion) og krympe sammen (svind).

Lerjordens plasticitet kan beskrives ved plasticitetsindekset, udfaldsrummet hvor materialet opfører sig plastisk, bliver bestemt som forskellen mellem flydegrænsen og plasticitetsgrænsen defineret ved Atterbergs grænser.

Plasticitetstest viser at Nymølle Haldum som den eneste forekomst ligger inden for de anbefalede værdier for plasticitet (Houben, Guillaud, 1994). Dog ligger de øvrige forekomster meget tæt og nært de anbefalede værdier.

Se bilag 5

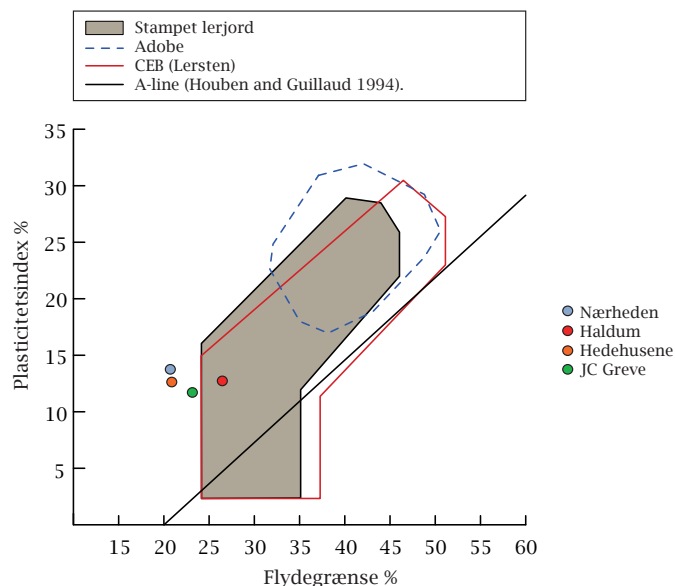
Mineralogi

For at forstå det udvalgte materiales konsistens og potentiale undersøges de på mineralogisk niveau. XRD-analyse (røntgendiffraktion), giver os detaljeret indsigt i mineralogien (sammensætning af mineralsk indhold), ler-indhold og fordeling af ler-mineraler i forekomsten.

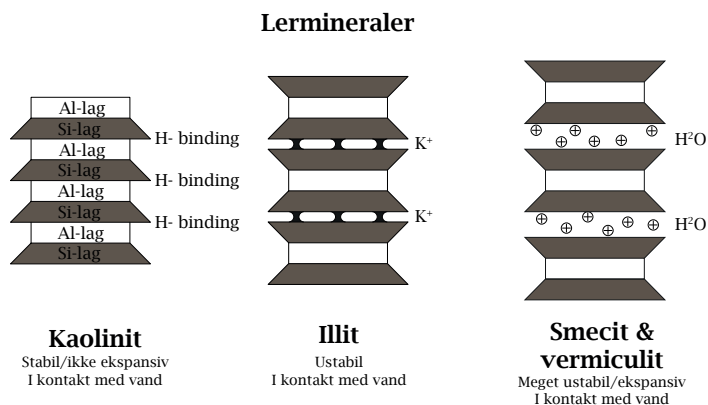
Vores resultater viser tendenser som:

- Lidt lavere ler-indhold end antaget (8-10%)
- Højt indhold af Calcit (kalk)
- Anden sammensætning af ler-mineraler (højt indhold af Illit)

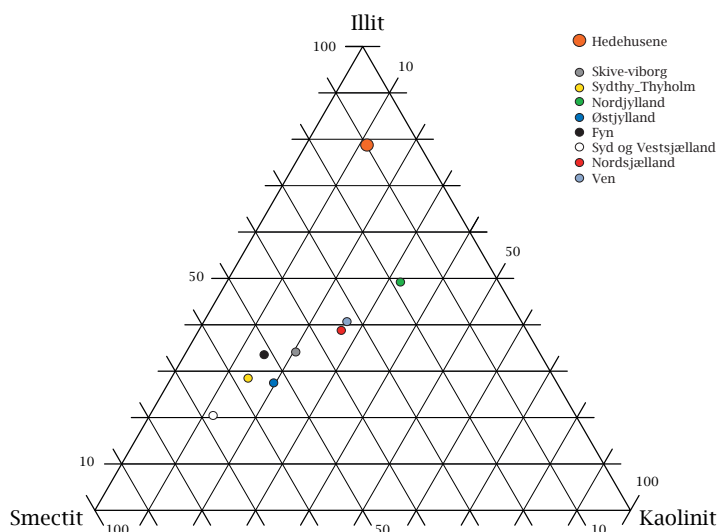
Moræneleret udvundet i Hedehusene har et relativt højt indhold af calcit 25%, hvilket måske kan forklares ud fra forekomstens relative nærhed til en kalkrig undergrund (Bryozokalk).



Flydegrænse og plasticitetsindex. Anbefalede værdier for stampede lerkonstruktioner iht. Houben and Guillaud 1994.



Houben & Guillaud, 1994



Trekantsplot over gennemsnitsfordelingen af lermineralene smectit, illit og kaolinit i de kvartære bjergarter på tværs af danmark. (Torsten Holmboe, Teglværksler)

Fordelingen af lermineraller viste at Hedehusene indeholder en større mængde af lermineralet Illit 79 % og en mindre andel af kaolinit 12% og smectit 9%. Fordeling af lermineraller kan have stor betydning for lerjordens plastiske egenskaber herunder svind og kohæsion i materialet. Fordelingen af lermineraller afhænger i høj grad af forekomstens geografi, (se trekantplot). F.eks. ses på Sjælland en overvægt af lermineralet Illit, hvilket desuden forøges ned gennem jordprofilerne (Torsten Holmboe, Teglværksler i Danmark)

Se bilag 2

Udvalgt forekomst

På baggrund af undersøgelserne i testtrin 2-3 udvælges forekomsten Nymølle Hedehusene til videre testtrin. Hedehusene viser ved de første analyser udført af (énjord) at bestå af fraktioner: Ler 8%, Silt 22 %, Sand 50%, Grus 20%. Senere undersøgelser af Teknologisk Institut bekræfter endvidere valget af denne forekomst og indikerer en højere andel af ler. Det optimale vandindhold, for den udvalgte forekomst udført ved modified proctor-test af Teknologisk Institut: 7,8 %.

Desuden udvælges forekomsten da den udmærker sig på følgende parametre:

- Vedvarende tilgængelig - aktiv grusgrav
- God at arbejde med (tilpas plastisk og opleves derfor god at arbejde med i stampeprocessen)
- Repræsentativ for hvad vi så som generelt tendens ift. kornkurve
- Ligger indenfor den optimale fordeling af fraktioner med undtagelse af en stor andel af fint sand
- Høj trykstyrke relativt til forekomsterne



Udvalg af forekomster med stor farvevariation, som kan skyldes forskelle i organisk indhold, kalk og lermineraller

Test trin 04-05

Fysisk stabilisering og tilsætning af fibre

I denne fase fokuseres på at styrke og stabilisere materialet yderligere gennem fysisk stabilisering (tilsætning af mere ler, grus eller sten). Det skete dels ved at manipulere kornkurven. Testene udføres på cylindre Ø100 og tryktestes.

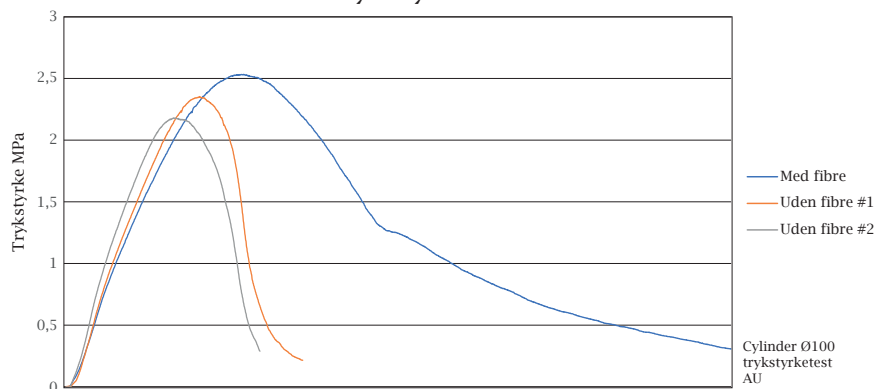
For at bestyrke materialet tester vi virkningen af at tilsætte følgende tilslagsmaterialer:

- Slamler - restmateriale fra grusvask i grusgrav
- Brændt flint – 4 restfraktion fra Luxol
- Bundsikring - grus
- Stabilgrus
- Kommercielt lerpulver

Formålet er at påvirke både de fine og grove fraktioner og optimere sammensætningen ved brug af en 'kornkurve-generator', som udvikles i samarbejde med Teknologisk Institut, og potentielt kan overføres til andre projekter. I praksis viser det sig undervejs dog vanskeligt at forbedre den udgravede jord markant gennem disse manipulationer, og vi opnår ikke mærkbare forbedringer af trykstyrken. Test i denne periode viser sig imidlertid senere at være udført på uhomogeniseret ikke-optimalt råmateriale, hvorfor resultaterne skal ses i lyset af dette.

Det er således vores vurdering at muligheden for at styrke materialet ved manipulation af tilslagsmaterialer stadig rummer et potentiale, som det vil være hensigtsmæssigt at teste og undersøge videre.

Trykstyrke - fibre



Parallelt med ovenstående eksperimenteres med alternative bindemidler og naturlige fibre. Indikative test med naturlige fibre, bl.a. Sisal-fibre viser tendenser til øget trykstyrke og ændret deformationsadfærd, herunder forlænget brudforløb og forøgelse af trækstyrken. Selvom testene stadig er på indledende niveau, peger resultaterne i retning af en interessant og bæredygtig optimeringsvej.

Tryktest hos AU. Undersøgelser viser tendenser til øget deformationsadfærd i råmateriale med tilsat Sisal-fibre

Sideløbende forsøges foruden stabilisering med fibre også tilsætning af mineraliske bindere herunder OXARA og naturlig vulkansk aske i indikative test.

Se bilag 7



Cylindre med afretningslag til test

Refleksion

Kalkstabiliseret ubrændt lerjord

Ida Bertelsen, adjunkt, DTU Sustain og
Per Goltermann, professor, DTU Construct

DTU er samarbejdspartner i Leralliancen og bidrager med omfattende erfaring fra tidligere forskningsprojekter, som danner fundamentet for både testparadigmet og det overordnede kendskab til lerjord som råmateriale og byggemateriale. De har solid erfaring med tests og har bidraget til at øge forståelsen og styrke vidensgrundlaget. Derudover har de flere studerende, der forsker i stampet lerjord.

Hvilke overvejelser gør i jer om kalkstabilisering af ubrændt ler?

I det aktuelle projekt er der udelukkende anvendt blokke af stampet, ubrændt lerjord, hvilket har givet en række fordele og ulemper. I en videre udvikling er det relevant at overveje, om tilsætning af kalk (brændt, hydrat eller hydraulisk) kan forbedre materialets egenskaber – særligt med hensyn til holdbarhed og styrkeegenskaber især i fugtig tilstand. Der er dog væsentlige praktiske, miljømæssige og indeklimamæssige faktorer, som er værd at tage i betragtning.

Ser I særlige fordele ved kalkstabilisering i forhold til holdbarhed?

Ubrændt ler har en meget begrænset holdbarhed ved udsættelse for fugt og direkte vandpåvirkning. Tilsætning af få procent kalk kan forbedre vandbestandigheden og dermed øge materialets holdbarhed pga. kemiske bindinger mellem kalk og lerjord. Kalken, afhængigt af kalktypen, skal dog have tid til at reagere med lerjorden for at danne de nødvendige kemiske bindinger og dermed udvikle tilstrækkelig styrke. Det er vigtigt at bemærke, at materialet stadig skal beskyttes mod vand, indtil kalkhærdningen er tilstrækkelig. Den nødvendige hærdetid afhænger af adskillige faktorer såsom temperatur og luftfugtighed, samt mængden og typen af kalk, men en betydelig forbedring af holdbarheden opnås efter kort tid (timer/dage).

Hvilke erfaringer har I med materialets styrke i relation til hærdning?

Styrken af ubrændt ler afhænger af lertype, komprimeringsgrad og fugtindhold. Uden kalk tørrer blokkene relativt hurtigt (uger) og opnår styrke gennem udtørring. Styrken vil dog reduceres betydeligt, hvis lerjorden udsættes for fugtpåvirkning. Styrkeudviklingen af kalkstabiliseret lerjord afhænger af kalktypen, lerjordens reaktivitet, hærdetemperatur og om der er tilstrækkeligt med fugt til stede, så reaktionerne kan foregå. Ved kalktilsætning kan den fulde udnyttelse af kalken tage måneder/år at opnå. Alternativt kan hærdning accelereres med høj temperatur (f.eks. ved 30+ °C), hvilket er muligt i en fabrik, men vanskeligt på en byggeplads.

Har kalktilsætning en effekt på materialets indeklimategenskaber?

Ler har gode egenskaber som varme- og fugtbuffermateriale. Kalktilsætning kan forringe fugtbufferevnen og dermed påvirke det positive bidrag til regulering af indeklimaet. Graden af den mindskede fugtbufferevne afhænger dog også af lertype samt mængden og typen af kalk.

Hvordan påvirker kalk produktionsprocessen?

Tilsætning af kalk kræver omhyggelig planlægning. Valget står ofte mellem lokal produktion med ler fra byggepladsen (lavere CO₂-aftryk, men større logistiske udfordringer) eller industriel produktion med ensartet kvalitet. Kalktilsætningen kan komplicere komprimeringsprocessen, men der findes gode erfaringer med effektiv iblanding både på byggepladser og i fabrikker og det er en velkendt teknik til jordstabilisering.

Hvordan vurderer I klimabelastningen ved kalkstabilisering?

Den laveste klimabelastning opnås ved brug af lokalt forekommende lerjord uden kalk og med minimal transport. Tilsætning af kalk og fabriksproduktion øger både CO₂-udledningen og energiforbruget, men kan til gengæld give bedre kvalitetssikring og hurtigere proces på byggepladsen.



Råmateriale med stor variation i tilslag

LERALLIANCEN

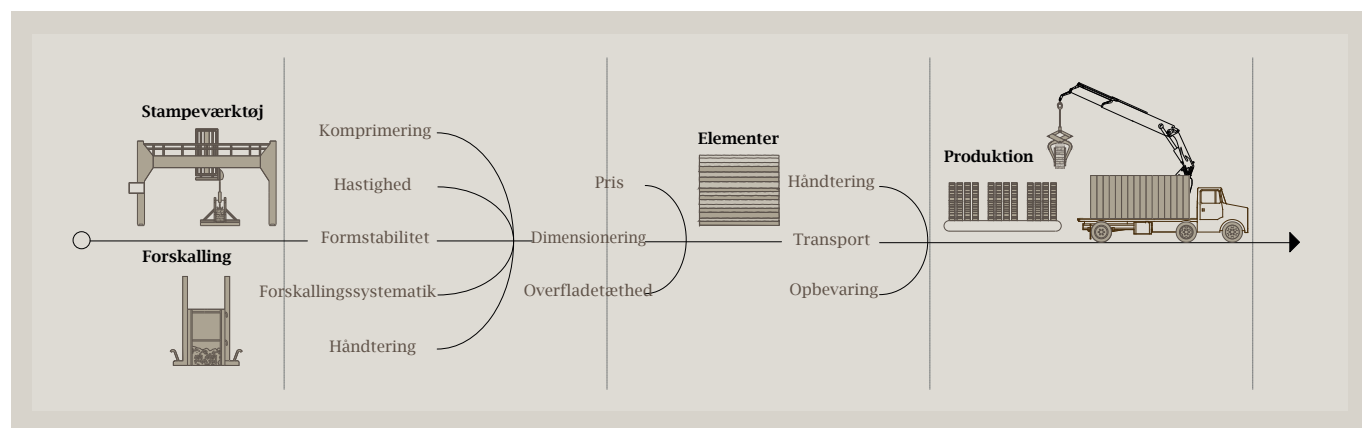
PRO DUK TION



Design

Fra forskning til præfabrikeret byggeelement

I Leralliancen har vi ikke blot testet materialet – men også designet og udviklet et produktionsklart byggeelement tilpasset den danske byggebranche.



Procesplan for spor to i udviklingsprojektet der omhandler produktion



Udviklingsproces

Gennem et iterativt forløb er der arbejdet med alt fra håndtering af store mængder lerjord, forskalling- og formudvikling, komprimeringsgrad, afforskalling og tørring – til pakning og transport.

Målet er at opstarte en værdikæde, hvor materialeegenskaber, produktionsteknik og byggepraksis spiller sammen.

Procesdiagrammet viser de centrale faser i arbejdet og de parametre, der undervejs har påvirket beslutninger om form, størrelse og logistik.

Designparametre

Designparametre inkluderer:

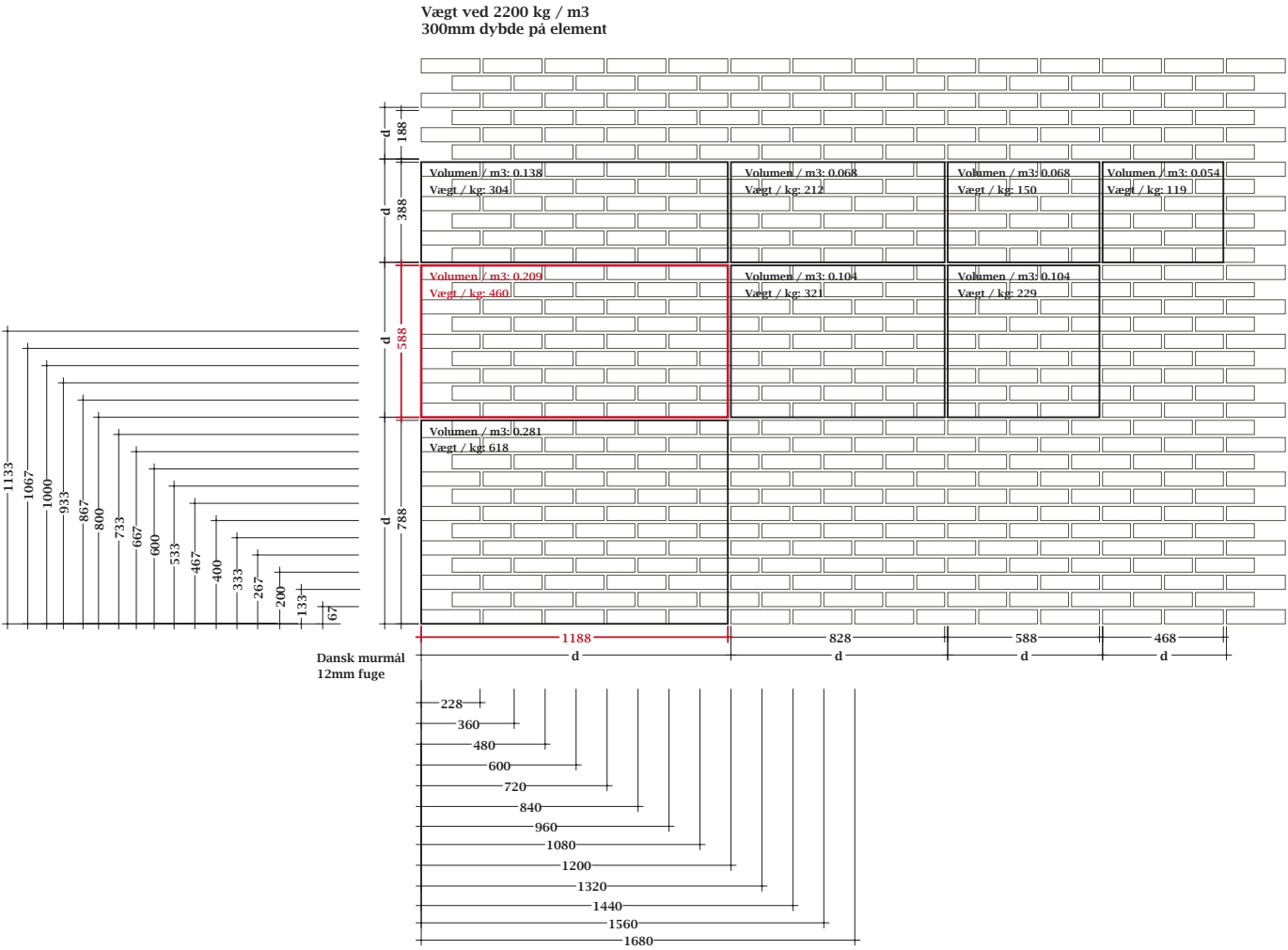
Håndtering og transport: Elementerne skal kunne stables på paller så de let kan transporteres fra produktion til byggeplads.

Vægt: Elementet skal kunne løftes med en manuel værkstedskran og håndteres med almindeligt grej på byggepladsen. Derfor er vægten holdt lige under 500 kg pr. element.

Bygbarhed: Elementerne kan stables og samles med høj præcision – en vigtig forudsætning for både arkitektonisk udtryk, bygbarhed og styrke.

Produktudviklingen er sket i tæt dialog med én jord, Werner Sobek, Jorton, NCC og øvrige samarbejdspartnere, som har bidraget med viden om montage, løft, emballering og byggepladslogistik.

Opmuring hos Teknologisk Institut af Jorton



Elementstørrelse og skitse på udvidet sortiment



Elementstørrelse

Element M1200 er et præfabrikeret byggeelement, designet med udgangspunkt i de gældende danske murmål. Med en dimension på 1200 × 600 × 300 mm matcher elementet de kendte projekteringsstandarder og er afstemt til en fuge på 12 mm. Elementet er dermed 1188 × 588 × 300 mm når de er færdigproduceret.

Det gør det intuitivt at anvende for både projekterende rådgivere og for udførende murere og entreprenører. Samtidigt minimeres behovet for specialtilpasninger.

Formatet er bevidst valgt og placerer sig som et mellemformat, mellem andre komprimerede lersten (typisk mindre) på markedet og gængse betonelementer:

Større end den klassiske mursten - reducerer montagetid, hurtigere opmuring og færre fuger.

Mindre end vægelementer i beton - en naturlig konsekvens af materialets begrænsninger - men også med det potentiale at det vil være håndterbart både i nybyggeri, transformation og til montage på etager.

Justeringer i udviklingen af elementet

Udviklingen af det præfabrikerede byggeelement har krævet en lang række afvejsninger. Den optimale størrelse afhænger af en kombination af faktorer: vægt, håndtering, produktionsvilkår, konkurrerende produkter, arkitektoniske murmål og byggetekniske krav.

Elementet er desuden udviklet med fokus på modularitet, montagevenlighed og industriel gentagelse, og ambitionen er at sortimentet skal udvides og med tiden produceres i forskellige varianter.

Elementets bredde bestemmes primært af krav til bæreevne, lyd og varmeisolerings samt brandmodstand.

Højden imødegår almindelige rumhøjder på 3 meter, mens længden tilpasses almindelige modulmål i byggeriet.

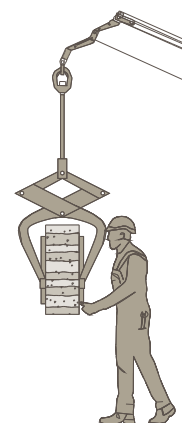
For at udnytte potentialet i stampet lerjord og mulig robotproduktion er elementet væsentligt større end mursten - men stadig håndterbart. Erfaringer fra produktion og montage viser, at ca. 500 kg er en praktisk vægtgrænse, der tillader løft med almindeligt byggepladsudstyr uden behov for store kraner.

Et element i denne størrelsesorden balancerer montageeffektivitet og fleksibilitet - og vurderes konkurrencedygtigt i forhold til fx porebeton og letklinkerblokke.

Særlige opmærksomhedspunkter der blev rejst i udviklingen og under produktionen:

Fugt og tørring af både lerjord og elementerne fremstår som kritiske faktorer, særligt i et klima som det danske. Det peger på behov for enten overdækning eller sæsonproduktion.

Lagbinding kræver særlig opmærksomhed. For at sikre god sammenhæng mellem de stamperede lag, arbejdes der med særligt udformede stampehoveder og med mulig stabilisering af top og bund.



Løfteteknik med klemmeåg



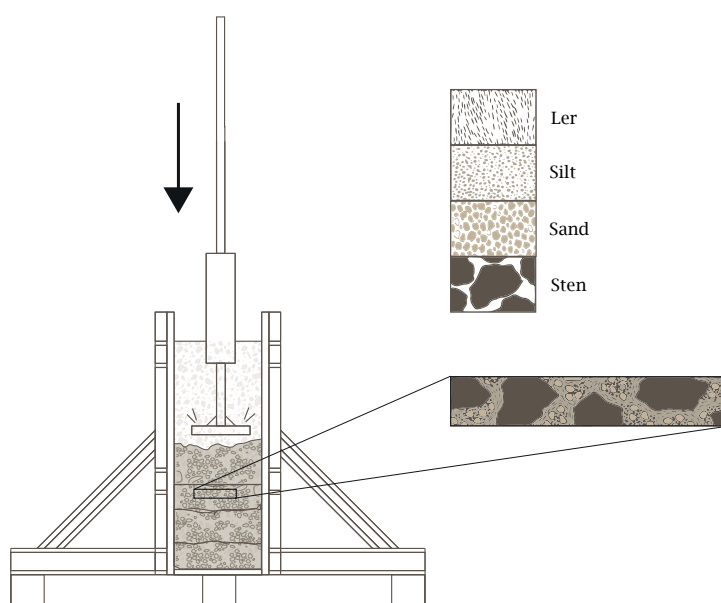
Det første element i produksjonslinjen hos Robot at Work

Komprimering

Styrken af stampet lerjord afhænger i høj grad af jordens sammensætning og komprimeringsgrad. Hvor godt lerjorden kan komprimeres, afhænger af, hvor tæt jordens fraktioner fordeler sig og "pakkes" gennem stampning. For eksempel vil sandkorn kunne udfylde tomrum mellem sten, hvilket øger tørdensiteten (vægten per volumen af det tørre materiale).

Komprimeringsgraden påvirkes desuden af komprimeringstrykket, komprimerings-hastigheden, lagtykkelsen samt valget af stampeværktøj. Højere tryk og tyndere lag giver som regel en bedre komprimering.

Ved øget tryk kan der dog opstå lagdeling, hvilket kan svække bindingen mellem lagene (delaminering). Dette kan undgås ved at tilpasse stampehovedet – for eksempel fra en flad bund til en vinklet eller savtakket bund.



Jordens sammensætning og komprimering

Industrialiseret produktion – med robotteknologi

Fra prototype til produktion – udvikling af industriel metode

I Danmark eksisterer der endnu ikke en etableret industri til produktion af stampet lerjord. I projektet arbejdes der med at gå fra manuel til robotbaseret produkt. Det omfatter alt fra håndtering til løbende kontrol af råmateriale og påfyldning af forme til komprimeringsteknik og afforskalling og pakning af elementerne til transport.

For at gøre stampet lerjord anvendeligt i skala – og med metoder, der matcher byggebranchens krav – arbejder Leralliancen målrettet med at automatisere og effektivisere produktionen. I samarbejde med Robot At Work er der udviklet og testet flere generationer af pneumatiske og robotstyrede stampningsværktøjer. Arbejdet har fulgt en trial-and-error-proces, hvor både formværktøjer, komprimeringsstrategier og materialetilførsel er blevet optimeret trin for trin.

Udvikling i tre generationer:

1. generation: Test af geometri og trykoverførsel på kube-niveau (20 x 20 x 20 cm), med test af komprimeringsgrad. Test af både hydraulik, trykluft og hybrid til komprimering.

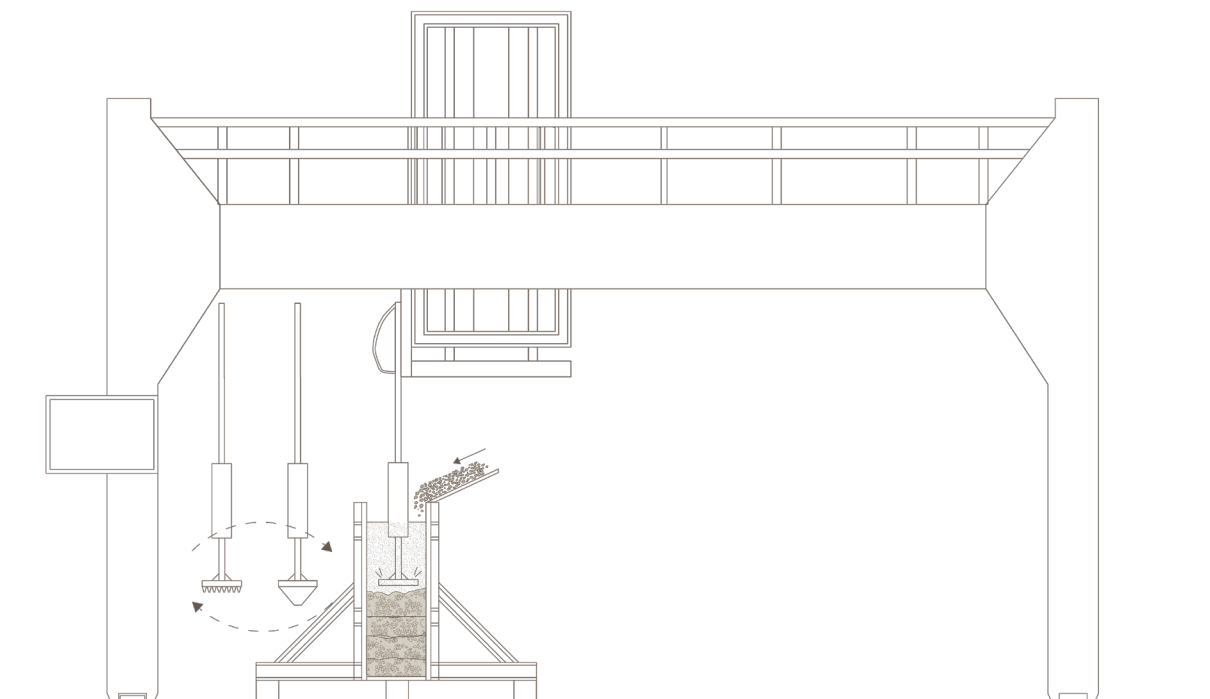
2. generation: Automatisk pneumatisk stamper monteret på robotbro med vertikal og horisontal bevægelse samt løftfunktion.

3. generation (prototype): Integreret monitorering af lagtykkelse og komprimeringsgrad for øget proceskontrol.



Den robotbaserede løsning muliggør ensartethed, effektiv produktion og skalerbarhed, samtidig med at den minimerer manuel håndtering og fysiske belastninger, som traditionelt er forbundet med produktion af stampet lerjord.

Produktionslinje hos Robot at Work



Produktionssetup - og et præcist byggeelement

Udviklingen af et præfabrikeret byggeelement i stampet lerjord stiller store krav til produktionssetuppet – ikke mindst i forhold til trykstyring, rytme og præcision. For at sikre ensartethed og strukturel kvalitet i hvert enkelt element, arbejdes der med en række nøgleparametre i stampningen.

Styret tryk og pneumatisk drift

Et centralt fokuspunkt i produktionen er styring af det påførte tryk. Det kræver ensartet komprimering i hele elementets volumen, både vandret og lagvist, for at sikre god sammenbinding og tilstrækkelig densitet. Der arbejdes med pneumatiskke stampeværktøjer, og det er en aktuel overvejelse, hvordan lufttrykket og hastighed bedst tilpasses til både forskellige materialetyper og fremtidig automatisering således at der opnås højst muligt styrke samtidig med at energiforbruget holdes minimalt.

Stampningsrytme og cyklustid

Hastigheden på selve stampningen er en kritisk faktor. For hurtig stampning kan give ujævn komprimering og manglende lagbinding, mens for langsom proces går ud over produktionseffektiviteten.

Målet er at finde et balanceret tempo, der sikrer høj kvalitet uden at kompromittere det industrielle flow. Der eksperimenteres derfor med forskellige lagtykkelser, trykintervaller og cyklustider – både manuelt og med henblik på senere robotoptimering.

Højde- og lagkontrol

For at opnå præcision og reproducérbarhed i elementerne er kontrol med laghøjden og den samlede elementhøjde afgørende. Der arbejdes med målinger og sensorer til løbende at verificere laghøjde og kompakteringsgrad. Højderegistrering er desuden integreres i formwork-systemet og bruges som datagrundlag for kvalitetskontrol og dokumentation.

Skitse på udskiftelige stampehoveder til robotarmen

Refleksion

Automatisering

Mathias Thor, Robot at Work

Robot at Work har ansvar for produktionen af elementerne i projektet. De benytter en robotautomeret produktionslinje med et fleksibelt system, som kan understøtte udviklingen af lerstampeværktøj og forme. Kombinationen af avanceret software og automatiserede processer effektiviserer traditionelle byggeprocesser.

Hvordan har I videreudviklet jeres robotsystem i dette projekt?

Hos Robot At Work har vi videreudviklet vores fleksible robotsystem med fokus på at gøre produktionen af stampet lerjord præcis, skalerbar og professionelt anvendelig. Systemet er udviklet til lagvis komprimering af lerjord – nu med fuldautomatisk styring, proceskontrol og datalogning.

Hvad er systemets største styrker?

En af systemets største styrker er den modulære og fleksible opbygning, som gør det muligt hurtigt at afprøve forskellige stampeteknikker og samtidig integrere flere sensorer og værktøjer. Under dette projekt har vi blandt andet monteret en laserafstandsmåler, som automatisk registrerer lagtykkelsen før og efter komprimering – et vigtigt datapunkt til vurdering af komprimeringsgrad og elementkvalitet.

Hvordan ser I på fremtidige udvidelser?

Systemets arkitektur gør det muligt at tilføje yderligere værktøjer – herunder et endnu ikke realiseret automatisk materialepåfyldningssystem, som vi planlægger at teste i fremtidige iterationer. Med et sådant system vil det være muligt at styre mængde og placering af materiale præcist, hvilket åbner for strategisk stabilisering: En teknik hvor specifikke lag optimeres målrettet – fx med justeret fugtindhold eller tilsætningsstoffer – for at forbedre bæreevne, tørretid eller formstabilitet.

Er systemet klar til industriel produktion?

Den nuværende version af systemet kan dække et arbejdsområde på over 100 meter i længden, hvilket muliggør opstilling af mange forme samtidigt og produktion af elementer i *lights-out*-tilstand

– uden behov for konstant bemanding. Dette gør systemet velegnet til industriel opskalering med fokus på høj volumen og ensartet kvalitet.

Hvordan ser det ud med energiforbrug og produktionshastighed?

Systemets nuværende energiforbrug ligger på ca. 1,5 kWh pr. element (300 mm × 1200 mm × 600 mm), og takttiden er ca. 3,67 t/element, hvilket resulterer i 17 t/m³.

Et element består af 11 lag, hvor hvert lag kræver ca. 17 minutters manuelt arbejde inkl. påfyldning af jord og 3 minutters reel stampning med systemet.

Ved en opstilling med flere forme, som er i gang parallelt og/eller automatisk påfyldning under kørsel ville takttiden kunne reduceret til 33 minutter, resulterende i 2,55 t/m³.

Denne produktionshastighed er et klart mål for fremtidige iterationer – endda med mulighed for yderligere optimering.

Derudover skal fremtidige versioner kunne logge flere relevante procesdata under produktionen – herunder fugt, temperatur, tryk, 3D-scanning af lagoverflader og vibration – hvilket giver et stærkt grundlag for dokumentation, kvalitetssikring og kontinuerlig læring.

Hvordan ser I systemets betydning i et større perspektiv?

Med det videreudviklede robotsystem bygger vi bro mellem materialets historiske karakter og fremtidens behov for præcision, dokumentation og skalerbar produktion. Stampet lerjord får dermed et nyt teknologisk fundament, der muliggør indfrielse af både æstetiske, bæredygtige og strukturelle ambitioner.

Kvalitetssikring og kontrol af de stampede lerjordselementer

Parallelt med udviklingen af produktionsteknologien er der i projektet opbygget en praksis for kvalitetssikring, der har til formål at sikre ensartethed, høj styrke og lang holdbarhed i de fremstillede lerjordselementer.

Tørningskontrol gennem vejning

Et centralt kvalitetssikringsværktøj har været systematisk vejning af elementerne før og under tørningsprocessen for at sikre, at de er tilstrækkeligt tørre før videre håndtering, test eller transport:

1. Elementet vejes i våd tilstand umiddelbart efter stampning.
2. Under tørningsforløbet vejes det dagligt, og vægten registreres i en log.
3. Når vægten er stabil i mindst fire sammenhængende dage, vurderes elementet at være jævnt og tilstrækkeligt tørt.

Tørningstiden er afgørende for elementets styrke og modstandsdygtighed over for svind og revnedannelse, og skal derfor nøje overvåges.

Fugtkontrol før komprimering

Et andet vigtigt kvalitetspunkt er fugtindholdet i lerjorden før stampning. Fugtindholdet har stor betydning for komprimeringsevnen og efterfølgende tørring. For højt vandindhold reducerer jordens evne til at pakke tæt, da overskydende vand forhindrer en tæt pakning af partiklerne.



Workshop hos AU: Råjord skovles ud på gulvet for at vurdere homogenitet og fugtindhold – en praktisk test, hvor materialet både undersøges visuelt og mærkes med hænderne

Fugtigheden kontrolleres manuelt inden produktionen:

Måling af vandindhold: Det ideelle fugtindhold er omkring 8 %. Dette kan måles ved at veje en prøve, tørre den i ovn i 24 timer og derefter veje den igen for at bestemme vandtabet. Forskellen i vægt mellem våd og tør jordprøve indikere mængden af vand, som var i prøven og fugtindholdet kan dermed udregnes i procent.

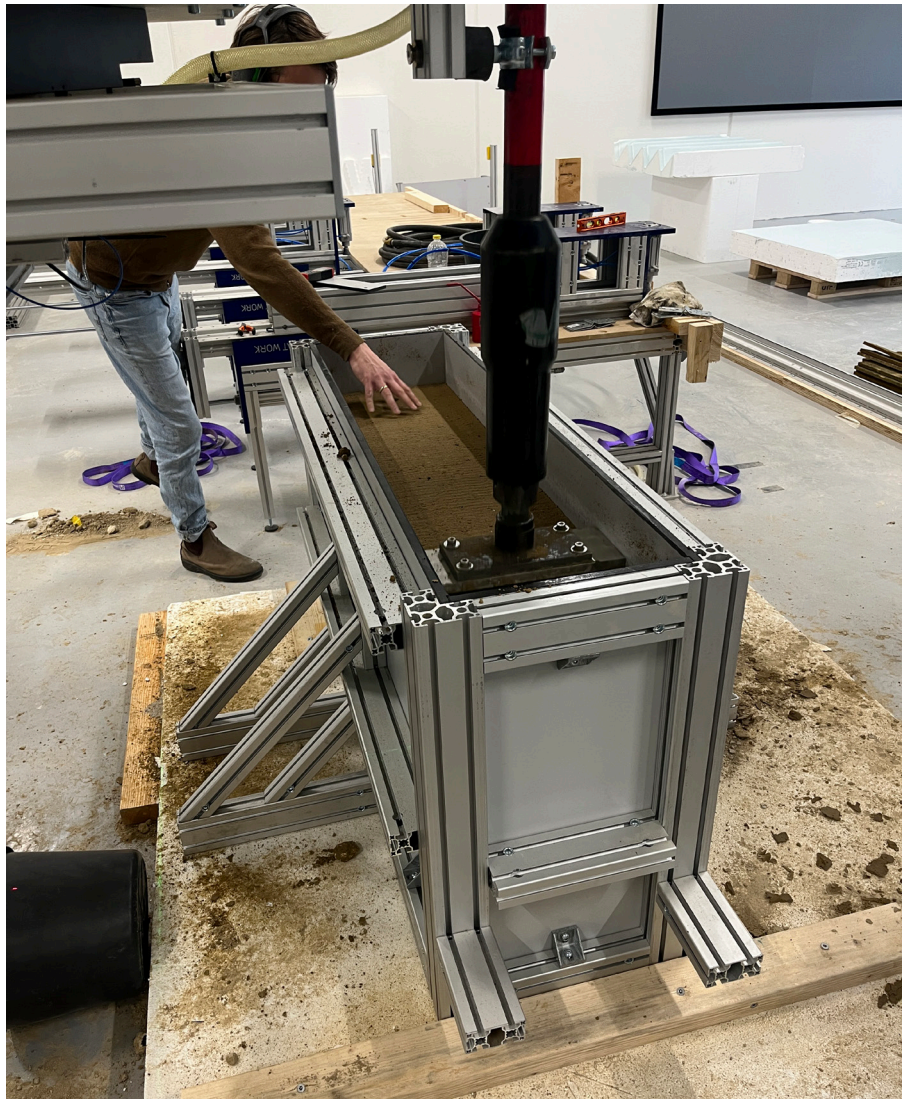
Visuel og taktil test: Hvis overfladen efter stampning fremstår hård, er jorden klar til brug. Hvis man derimod let kan trykke en finger ned i materialet, er det for vådt og skal tørres yderligere.

Geometrisk præcisionskontrol

Elementets geometriske præcision, er af afgørende betydning for opmuringsprocessen. Her gør udfald i dimensioner det nødvendigt at arbejde med uhensigtsmæssige tolerancer og gør det svært at eksempelvis holde en opmuret væg i lod.

For at sikre præcisionen af elementets geometri er der undervejs i produktionen føres der log med de indmålinger robotten rapporterer efter hvert lag. Udover at registrere komprimeringsgraden føres således også kontrol med elementets totalhøjde, så der kan justeres undervejs for at tilnærme sig den korrekte endelige højde.

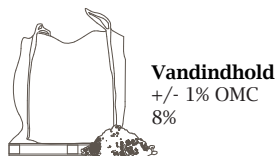
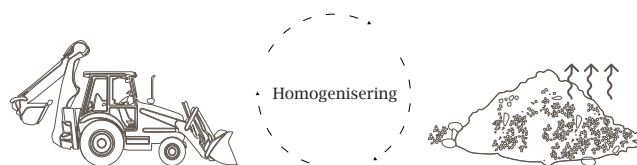
Imens elementets bredde- og længdepræcision kan sikres igennem tilstrækkelig forstærkning af den anvendte forskalling, er den højdemæssige præcision sværere at opnå. Årsagen er, at små afvigelser i mængde af tilføjet, løs råjord giver stor variation i endelig højde, og at mængden og fordelingen af råjorden - med nuværende setup - er svært af indmåle.



Visuel og taktil test: Fugtkontrol ved komprimering

Kvalitetssikring

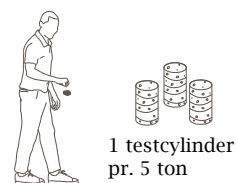
Råmateriale



Karakterisering



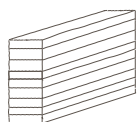
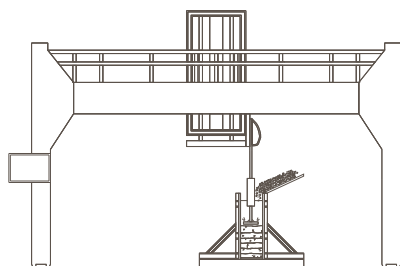
Mineralogi og Kornkurve



Droptest - test af fugtindhold

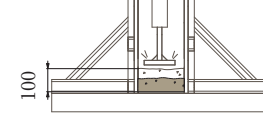


Produktion

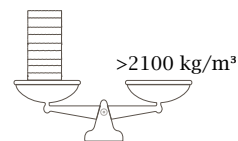


Geometri tolerance:
H: 3 mm
L: 3 mm
B: 3 mm

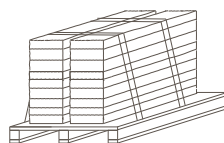
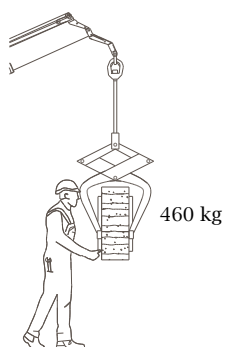
Kompression
100 mm
↓
60 mm



Densitet



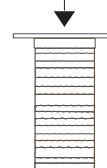
Færdigt element



Tørring
6 uger
< 1,5 fugtindhold

Trykstyrke

2 Mpa



Fra råmateriale til transportklart element

Håndtering af både råmateriale og færdige elementer er en central del af produktionsflowet – og en af de processer, der rummer størst potentiale for effektivisering. I de første faser af projektet er der arbejdet med manuelle løsninger, men erfaringerne peger tydeligt mod behovet for systematisering og mekanisk støtte i en fremtidig opskalering.

Manuel materialehåndtering

I de gennemførte testproduktioner er råmaterialet håndteret manuelt: lerjord blev fyldt fra bigbags til forme via spande og skovle, og opfyldningen skete lagvist og uden automatisering. Denne tilgang har givet vigtig indsigt i materialets reaktion og komprimering, men understreger samtidig behovet for et mere strømlinet og ergonomisk produktionssetup, særligt ved gentagelser i større skala.

Form og afforskalling

Der er benyttet aluminiumsforme foret med kompositplader, som sikrer en glat overflade og nemmere afforskalling. Selve afforskallingen er dog en tidskrævende og manuel proces, der kræver løft, adskillelse og rengøring efter hvert støbt element. Der arbejdes derfor med muligheder for optimering – eksempelvis formdele med hurtigkobling, formolie og materialer med lav vedhæftning – samt vurdering af, hvordan robotteknologi kan assistere i fremtiden.



Produktionslinje hos Robot at work. Her ses det første element på palle, og i front illustreres den manuelle proces med påføring af råmateriale til form.



Håndtering i våd og tør tilstand

De færdigstøbte elementer håndteres i to kritiske faser:

- Umiddelbart efter stampeproces, hvor elementet stadig er sårbart og har høj fugtindhold
- Efter tørring, hvor vægten er reduceret, og overfladen er mere robust

Begge tilstande stiller krav til både løftegrej, stabilitet og underlag. Der arbejdes med at udvikle løsninger, hvor bundplader kan følge elementet gennem hele processen og samtidig fungere som håndteringsflade under transport.

Pakning og transport

Efter tørring pakkes elementerne på paller, hvor de fastgøres for at modstå vibrationer og belastning under transport. Her har faktorer som vægtfordeling, overfladebeskyttelse og stabling vist sig afgørende.

Erfaringerne peger på, at logistik og håndteringsstrategien skal samtænkes med montageprocessen – eksempelvis ved produktion af præfabrikerede moduler, der kan løftes direkte fra palle til væg.

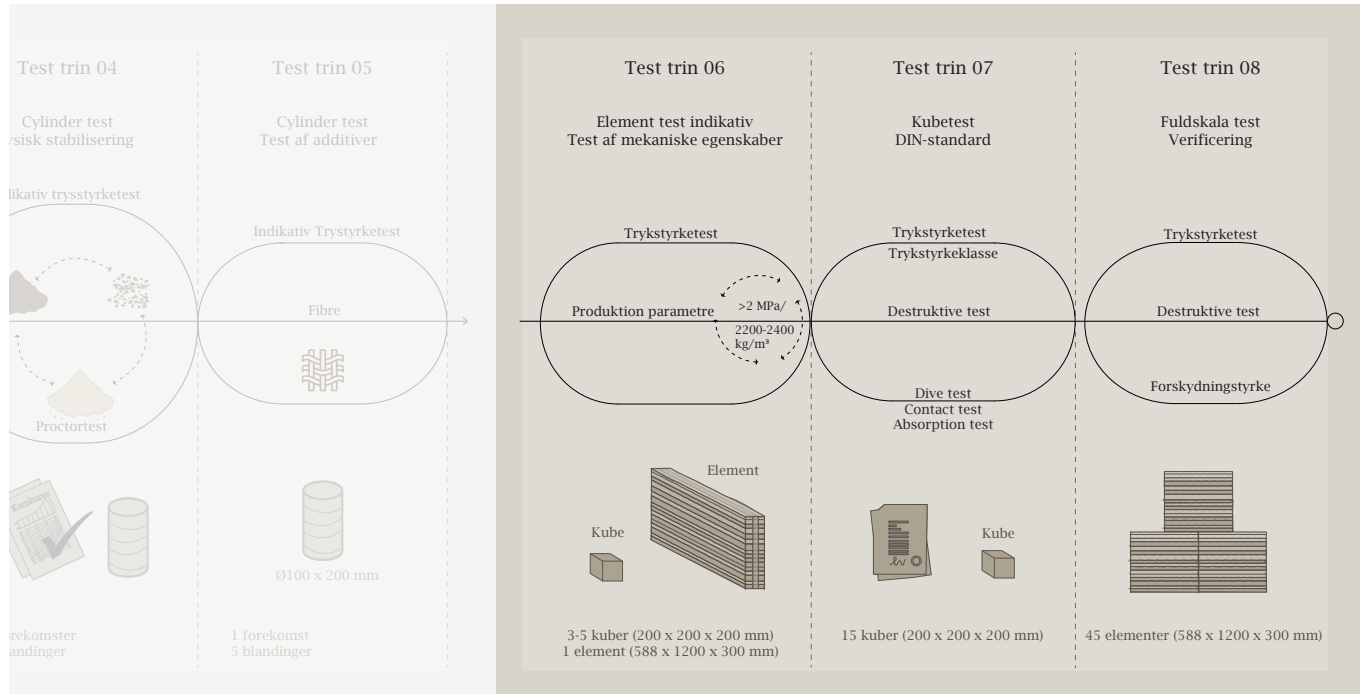
Elementer klar til transport

DOKU MEN TATION



Fra kuber til element til væg

Sidste tre trin af det samlede testforløbe omfatter kuber, elementer og fuldskalatest på opmurede vægge.



Testparadigme, trin 06-08

Oversættelse af standarder

I fraværet af nationale normer og godkendelsesgrundlag for ubrændt lerjord i Danmark, har vi i udviklingsprojektet arbejdet med at oversætte og tilpasse udenlandske standarder til en dansk byggeteknisk kontekst.

Vores tilgang baserer sig på de tyske Lehmbaugeltn og DIN-standarder, som udgør nogle af de mest gennemarbejdede retningslinjer for byggeri med ubrændt ler i Europa. Dertil inddrager vi Eurocode 6 for murværk som statistisk reference, og anvender principper herfra til at udlede et testparadigme for trykstyrke og stabilitet for vores lerjordsvægge.

Denne kombination gør det muligt at opstille teknisk dokumentation og strukturelle beregninger, som potentielt kan danne grundlag for en 'Teknisk Godkendelse til Anvendelse' af ETA-Danmark. Særligt vigtigt er det, at BR18 giver mulighed for at afvige fra normkrav, så længe der kan dokumenteres tilstrækkelig sikkerhed – noget vi her søger at opnå gennem materialetest, reference til anerkendte udenlandske standarder og verificeret ingeniørberegning.

Testtrin 06-07

Mekaniske egenskaber – fra kuber til element

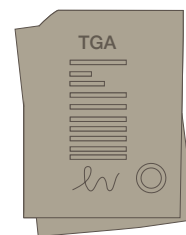
Med udgangspunkt i testtrin 01-05 blev der gennemført en række analyser og materialeforsøg, som dannede grundlag for sammensætning og komposition af råmaterialet til brug i både prøve- og byggeelementer. På baggrund af bl.a. kornkurveanalyse, procter-tests, XRD-analyse og fugt- og densitetsmålinger blev materialets egenskaber systematisk dokumenteret og tilpasset det ønskede anvendelsesformål.



Robotautomatiseret produktion af kuber (200x200x200 mm) til testforløb hos Robot at Work

I testtrin 06-07 rykkede testarbejdet over i mere anvendelsesorienterede og standardbaserede forløb. Her blev der udført mekaniske tests både på kuber (200 × 200 × 200 mm) og på færdige byggeelementer (1200 × 600 × 300 mm), med det formål at dokumentere styrke, deformation, fugt og brudadfærd.

Testene tog udgangspunkt i de tyske standarder for stampet lerjord, særligt DIN 18945, men blev også suppleret og videreudviklet i tæt samarbejde med ingeniører fra DTU og Teknologisk Institut.



TGA (teknisk godkendelse til anvendelse) forholder sig til de krav, der findes i Bygningsreglementet og alment teknisk fælleseje, og dokumenterer, at produktet må anvendes i overensstemmelse med disse.

TGA forholder sig til alle relevante egenskaber for produktet og funderes bredt med involvering af relevante eksperter.

En TGA bruges som sikkerhed for, at byggeproduktet lovligt må anvendes i Danmark.



Styrketest på kuber hos Teknologisk institut



Test af kuber

Der udføres et omfattende testforløb af 15 stampede lerjordskuber ($200 \times 200 \times 200$ mm), fremstillet af Robot at Work i november 2024 og testet af Teknologisk Institut i januar 2025. Formålet var at dokumentere materialets mekaniske egenskaber og dets følsomhed overfor vand, i henhold til standarden DIN 18945.

Trykstyrke og densitet

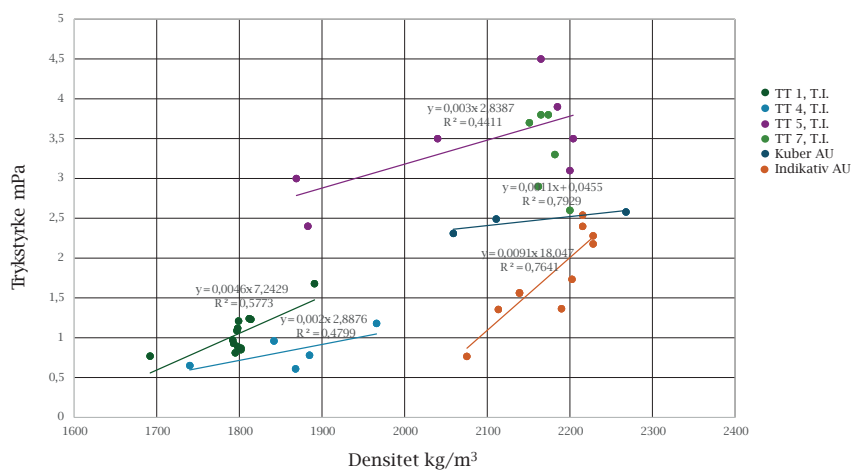
Seks kuber blev testet for dimensioner, densitet og trykstyrke. Resultaterne viser en gennemsnitlig densitet på 2.173 kg/m^3 og en gennemsnitlig trykstyrke på $3,36 \text{ MPa}$, med lav variation. Disse værdier placerer kuberne i:

- **Densitetsklasse 2.2**
- **Trykstyrkeklasse 2**

Kuberne er dermed, iht. DIN 18945 (tabel 6 og 7), egnet til bærende indvendige vægge i kategori II, hvilket er relevant for bygningsdele der ikke bliver direkte udsat for eller eksponeret for vand- eller fugtpåvirkning som f.eks. lejlighedsskel.

Se bilag 8

Trykstyrke- densitet



Sammenhæng mellem trykstyrke og tørtdensitet for lerprøver på tværs af forekomst og testemner. Ifølge (Ávila, Puertas, and Gallego 2021) bør der være en direkte korrelation mellem densitet og trykstyrke.



Dive test



Contact test



Absorption test - billeder af prøver efter 3 timer

Vandfølsomhedstest

For at vurdere materialets følsomhed overfor vand blev der udført tre tests, disse er test nærmere beskrevet i DIN 18945:

Dive test (nedsænkning): viser materialeafsmidning mellem 0,1 % og 9,4 %, med gennemsnit på 3,8 %. En kube havde et lodret adskillelsesbrud ved modtagelse og blev brugt til at vurdere worst-case.

Contact test (våd klud): ingen revner eller hævelser observeret efter 72 timer – kuberne klassificeres i kategori II.

Absorption test (sugning): viser begyndende revnedannelser ved langvarig opfugtning. Ved 24 timer ses fugtoptrængning op til 70 mm ved hjørner og udvikling af små revner langs kanterne.

Samlet set bekræfter resultaterne, at kuberne lever op til kategori II i DIN 18945 for både mekanisk styrke og vandfølsomhed. Det betyder, at materialet er velegnet til bærende indvendige konstruktioner i tørre zoner – og giver dermed et solidt afsæt for teknisk dokumentation, projektering og fremtidig godkendelse.

Se bilag 8

Elementtest

"Spydspidstest" på præfabrikerede M1200-blokke

For at dokumentere den reelle bæreevne af et færdigkomprimeret stampet-lerjord-selement blev to M1200-blokke (1200 × 600 × 300 mm) tryktestet hos Teknologisk Institut.

Hver blok blev afrettet med et 5-20 mm lag M5-mørtel på oversiden. En træfiberplade og en stålplade fordelte trykket, og der blev presset med 100 t hydraulisk ramme. Et kugleleje mellem lastcelle og hydraulikcylinder sikrede, at lasten blev påført helt vinkelret, så excentricitet og kantspændinger blev elimineret.

Element 1

- Fremstillet juli 2024 og testet november 2024
- Fugtindhold ved test 1,8 %
- Bruddet indtraf ved ca. 738 kN, svarende til en brudspænding på ca. 2,0 MPa

Element 2

- Fremstillet januar 2025 og testet marts 2025
- Fugtindhold ved test ca. 1,7 %
- Bruddet indtraf ved ca. 728 kN, ligeledes ca. 2,0 MPa

Begge brud skete som en sprød knusning midt i blokken uden forudgående revner, hvilket viser god homogenitet af råmateriale og indikere god sammenhæng i elementet.

En brudspænding på omkring 2 MPa placerer elementerne i trykstyrkeklasse 2 og kategori II efter DIN 18945 – samme niveau som kuberne, men nu bekræftet i fuld skala.

Se bilag 9 og 16



Spydspidstest - Element 1



Fuldskala opmurede vægge

Styrketest

Som afslutning på testprogrammet blev der i februar opført og trykprøvet tre hele vægfeltet af stampele lerjordsselementer på Teknologisk Institut. Hver væg bestod af syv elementer (3 x 1200 mm og 4 x 600 mm). Alle var fremstillet i december 2024 og muret op af én jord og Jorton med en lermørtel.

Elementerne blev sat på murpap, og væggenes top blev afrettet med 5-20 mm M5-mørtel for at give et plant anlæg til belastningen. Under prøven fordelte en 30 mm stålplade og en HE180B-profil trykket fra en 100 t hydraulisk cylinder, mens et kugleleje sørgede for vinkelret lastpåføring.

Allerede ved den første prøve viste det sig, at væggenes bæreevne lå omkring det halve af spydspidstesten, hvor resultatet var ca. 75 t (ca. 750 kN). Derfor blev lasthastigheden sat ned, hvorefter alle tre vægge brød stabilt ved omtrent samme niveau:

- Brudlast ca. 350 kN pr. væg (svarende til 36 t inkl. egenlast)
- Trykspænding ved brud mellem 0,97–0,99 MPa
- Fugtmålinger i væg 1 viste 2,5–2,6 % i kernen og 1,0–1,6 % i randzoner.

Bruddet fremstod generelt som sprød knusning med let afskalning af kanter, men uden større delaminering.

Se bilag 10





Prøverne efter afretning med murermørtel på toppen



Brud af væg 1



Brud af væg 2



Brud af væg 3

Fuldskala opmurede vægge

Forskydningstest

For at verificere hvordan elementerne opfører sig i en samlet konstruktion blev der i slutningen af april 2025 opført tre vægfelter bestående af i alt 18 elementer (9 x 1200 mm og 9 x 600 mm). Elementerne var fremstillet januar 2025, opmuret med en lermørtel og afsluttes med en 200 mm høj betonbjælke for at sikre jævn kraftfordeling.

Væggene stod på murpap og blev fastholdt mod glidning med stålvingler og "soldater". På toppen lå først en blød træfiberplade, dernæst et HE180B-stålprofil for at sprede trykket. Lodret last blev påført med en 100 t hydraulikcylinder og lastcelle; en stålkugleled mellem cylinder og lastcelle sikrede vinkelret kompression. Vandret forskydningslast blev påført med en 20 t cylinder og separat lastcelle. Før vandret last blev der lagt et lodret forspændingsstryk på ca. 40 kN (ca. 3,6 t) – svarende til en tiendedel af forventet lodret brudlast.

Lasten blev styret, så brud indtraf mindst ti minutter efter start. Alle tre vægge gik i forskydningsbrud ved nogenlunde samme niveau:

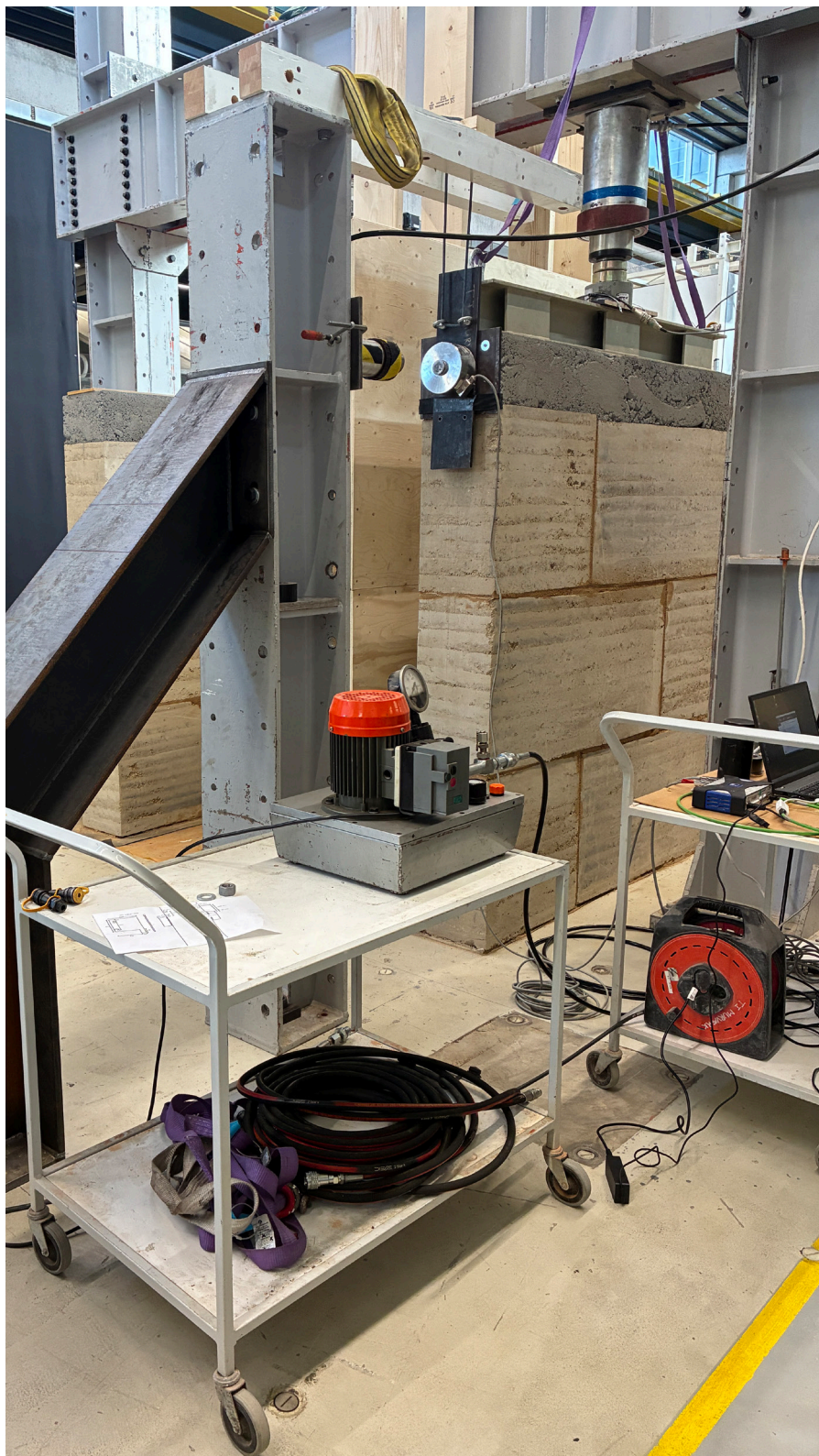
Væg 1: Horisontal last 38 kN (første revne), 37,8 kN ved tydeligt brud

Væg 2: Horisontal last 55,9 kN (første revne/brud)

Væg 3: Horisontal last 39,3 kN (første revne/brud)

Fugtmålinger efter brud i væg 1 viste 1,65 % i kernen og 0,81 % i randzonen.

Se bilag 11





Brud af væg 1



Brud af væg 2



Brud af væg 3

Refleksion

Test af lerjord som byggemateriale

Arash Ehtesham, Teknologisk Institut

Teknologisk Institut er testpartner i udviklingsprojektet og har investeret i maskinel, der gør det muligt at teste lerjord som byggemateriale. Sammen med Werner Sobek og DTU evaluerer og udvikler de løbende et testparadigme – særligt opsætningen af de tests, der udføres heri. Deres resultatrapporter udvider kendskabet til lerjord som byggemateriale og fungerer som bilag til en stor del af konklusionerne i udviklingsprojektet.

Hvad var jeres rolle i Leralliancen?

Vi har fungeret som teknisk partner og gennemført en omfattende testrække – faktisk hele testtrin 02-08 – for at dokumentere egenskaberne ved dansk lerjord og stampe lerjordskonstruktioner. Målet var at skabe et solidt datagrundlag, så vi kan vurdere lerets potentiale som bæredygtigt byggemateriale.



Hvad har I fundet ud af indtil nu?

Overordnet set har vi bekræftet, at dansk lerjord er velegnet til byggeri – hvis man styrer nogle kritiske kvalitetsparametre meget præcist. Det gælder især fugtindholdet ved stampning, kornkurven, densiteten og lerets plasticitet.

Hvordan har I testet det?

Vi startede med materialekarakterisering, hvor vi analyserede råmaterialet fra forskellige danske forekomster. Vi målte blandt andet fugtindhold, kornkurve og plasticitet – de såkaldte Atterbergs grænser. Derefter lavede vi proctorforsøg for at

optimere mixdesigns, og vi undersøgte, hvordan forskellige additiver – for eksempel guar gum og hampefibre – påvirker trykstyrken.

I den næste fase lavede vi element- og fuldskalatest. Vi testede stampe lerkuber efter standarden DIN 18945, hvilket omfattede trykstyrke, densitet og vandbestandighed. Her opnåede vi trykstyrkeklasse 2 og vandbestandighed kategori II – altså en god ydeevne under kontrollerede forhold.

Og hvad viste fuldskalatestene?

Test på de store blokke kalder vi "spydspidstest" og de viste en markant bæreevne. Vi målte for eksempel en brudspænding på 2,0 MPa på en blok på 1200 x 300 x 600 mm. Det indikerer et stort potentiale for bærende konstruktioner.

Vi byggede også fuldskala vægge med stampe lerjordselementer og testede dem for lodret trykbæreevne og forskydningsbæreevne – altså hvordan de klarer vindlast og andre horisontale kræfter. Her opnåede vi lodret brudspænding på cirka 1 MPa, svarende til næsten 300 kN/m for en væg på 300 mm tykkelse.

Hvad betyder resultaterne for fremtidigt byggeri i lerjord?

Testresultater indikerer, at dansk lerjord er velegnet til stampe lerjordskonstruktioner, når kritiske parametre som fugtindhold ved stampning, optimal kornkurve for høj densitet og materialets vandbestandighed styres nøje. Især fuldskalatest bekræfter materialets potentiale for bærende anvendelser.

Arbejdet leverer en essentiel, veldokumenteret vidensbase, der understøtter Leralliancens mål om at udvikle pålidelige og bæredygtige bygge-løsninger med ler, og bidrager til et solidt teknisk grundlag for fremtidig anvendelse og innovation inden for lerbyggeri i Danmark.

Tryktest viser gode resultater – fra kube til fuldskala

Tests på kuber viser, at materialet lever op til kategori II i DIN 18945, som gør det egnet til brug i bærende indvendige vægge. Dernæst blev der gennemført fuldskalaforsøg på hele byggelementer, for at vurdere materialets adfærd under både vertikale og horisontale laster – med resultater, der møder de krav og ønsker, vi har oplevet konstruktionsingeniører efterspørger i konkrete byggeprojekter.

De tre trin i testprogrammet viser en tydelig, konsistent udvikling af materialets præstation:

Kuberne (200 × 200 × 200 mm) dokumenterer det grundlæggende styrkeniveau.

En middeldensitet på godt 2173 kg/m³ og en middel trykstyrke omkring 3,4 MPa placerer materialet solidt i trykklasse 2 og kategori II efter DIN 18945.

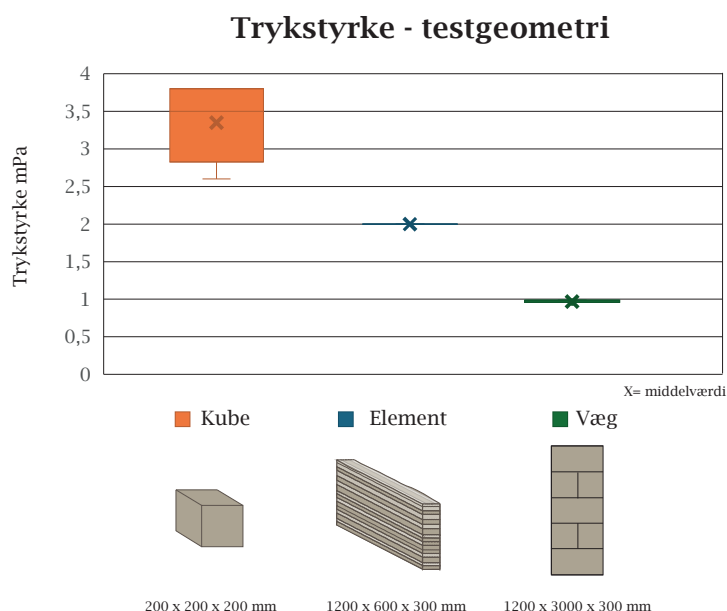
Vandprøverne (dive, contact og absorption) bekræfter samme klassifikation: materialet kan anvendes i bærende, indvendige vægge med begrænset fugtvirkning.

Spydspidstesten på hele M 1200-elementer bekræfter, at styrken fra kuberne kan skaleres op til fuld blok.

Begge testede elementer brød ved ca. 730 kN ≈ 2,0 MPa, igen svarende til trykklasse 2 / kategori II. Bruddet var sprødt og centralt uden forudgående revner – et tegn på homogen komprimering.

Fuldskalaforsøget på opmurede vægge viser, hvordan elementerne opfører sig som murværkssystem.

Lodret bæreevne endte på knap 1 MPa, dvs. omtrent det halve af bloktesten.



Horisontale forskydningsforsøg gav brud omkring 40–55 kN pr. felt. Væggene forblev i kategori II og demonstrerede en stabil, sprød knusning uden ukontrolleret delaminering. Kritiske parametre var planhed, mørtelfuger og korrekt lastindføring.

Testforløbet bekræfter, at stampepele lerjordselementer kan løfte rollen som bærende indvendigt vægmateriale, og lever op til kategori II i DIN 18945 forudsat tørre forhold, præcis montage og omhyggelig kvalitetssikring i produktionen.

De første analyser af resultaterne iht. beregningsmetoden i DIN 18940 indikerer at det vil være muligt at bygge tre etager med et spænd på 5 meter.

Refleksion

Når tyske standarder møder dansk byggeri

Simon Steffen, Werner Sobek

Werner Sobek har været en vigtig samarbejdspartner i Leralliancen og har bidraget med udviklingen af et testparadigme baseret på de tyske standarder. Derudover har de deltaget i testforløbet hos Teknologisk Institut – både i opsætningen, krav og evalueringen af test.

Hvorfor har I brugt tyske standarder i projektet?

I Danmark findes der endnu ingen officielle standarder for lerbord – hverken for selve byggematerialet eller for, hvordan man projekterer med det. Derfor har vi taget udgangspunkt i de tyske DIN-standarder, som er blandt de mest omfattende og veldokumenterede i verden. De bygger ovenikøbet på Eurocode 6, som også er accepteret i Danmark.

For at supplere DIN-standarderne har vi også anvendt de tyske Lehmbau Regeln og andre europæiske murværksskoder. Det har givet os et solidt regelsæt til at definere testprogrammet og sikre, at vi arbejder på et teknisk grundlag, der er anerkendt internationalt.

Hvad har været fokus i jeres arbejde?

Fordi vi udvikler elementer til bærende inder-vægge, har vi især haft fokus på lerets mekaniske egenskaber – altså trykstyrke, styrkeklasser og produktionskrav. Bygningsfysiske egenskaber som lyd- og varmeisolering og brandmodstand er også vigtige, men dem kan vi i højere grad udlede fra eksisterende standarder, når vi kender blandingen, tilsætningsstofferne og densiteten.

Hvorfor er trykstyrken så afgørende?

Trykstyrkeklassen er helt central for projektering af bærende vægge. Produktionsprocessen skal sikre, at de værdier, vi har defineret – for eksempel i henhold til DIN 18945 – bliver opnået hver gang. Vi arbejder efter det semi- probabilistiske sikkerhedskoncept fra Eurocoden, med tilpassede partialkoefficienter, der tager højde for materialets særlige egenskaber.

Hvordan spiller fugt ind på konstruktionernes styrke?

Det er her, lerbord adskiller sig mest fra traditionelle mursten. En vis mængde fugt er nødvendig for at bevare materialets integritet – ellers kan vi ikke forme og bearbejde det. Men for meget fugt reducerer styrken markant. Selv om indervægge er beskyttet mod direkte vej, kan høj luftfugtighed stadig påvirke bæreevnen. Derfor arbejder vi med to trin:

1. Applikationsklasser, der beskriver, hvor forskellige elementerne er over for fugt, baseret på standardiserede tests.
2. Anvendelsesklasser, der beskriver det forventede fugtniveau i de rum, konstruktionen står i – lidt ligesom for træ i EC5.

De to klassifikationer afgør så de partielle sikkerhedsfaktorer, vi bruger i projekteringen.

Er der andre særlige hensyn?

Ja, detaljeringen er vigtig. Ifølge DIN 18945 skal bærende ler-elementer beskyttes mod vandsprøjt og opstigende fugt – præcis som man gør med trækonstruktioner i soklen.

Hvad er næste skridt mod officielle standarder i Danmark?

Resultaterne fra første fase af Leralliancen giver et stærkt fundament. Nu handler det om at optimere elementerne, samle erfaringer fra produktion, projektering, opbygning og drift – og derefter omsætte alt det til materiale-, produkt- og projekteringsstandarder.

Det første skridt bør være at opnå TGA- eller ETA-godkendelser, forankret i accepterede koder som Eurocode 6. På den måde kan vi bygge prototype-bygninger, teste elementerne i praksis, identificere eventuelle udfordringer og få den erfaring, der skal til for at gøre lerjord til et officielt anerkendt byggemateriale i Danmark.

Kan du give indblik i konkrete optimeringspunkter der skal arbejdes på fremadrettet?

- Forøgelse af trykstyrken ved optimering af blandingen inkl. tilsætningsstoffer - uden reduktion og tab af cirkularitet
- Optimering og kvalitetssikring af produktionsprocessen
- Udvikling af detaljer og samlinger mellem væg-dæk, åbninger som døre og vinduer
- Øge produktionens præcision, især ift. højden
- Detaljering af geometri – fer/not-forbindelse på siderne, top og bund, evt. runde eller skæve overflader, tilpasset top til ringanker, præfab åbninger
- Teknisk Godkendelse til Anvendelse af ETA Danmark
- Udvikle lerjords-standarder og en del af Eurocode 6
- Konkrete erfaringer, dvs. modige bygherrer, som vil føre an i den grønne omstilling



Opmurede vægge hos Teknologisk Institut før forskydningstest

AN VEND ELSE

Materialets potentiale og begrænsninger

Stampet lerjord rummer et betydeligt bæredygtigt potentiale, men har samtidig iboende begrænsninger, der skal håndteres, før materialet kan integreres fuldt ud i moderne byggeri. Projektet har derfor både kortlagt lerjordens naturlige egenskaber og gennemført et omfattende testforløb for at bekræfte dens anvendelighed som bærende bygningsdel.

Vejrbestandighed, håndtering og transport

På byggepladsen er logistikken kritisk: vægt, løftegrej og montageforhold stiller særlige krav til håndtering. De udviklede elementer er nu designet til at kunne løftes med standardudstyr og transporteres på paller, hvilket effektiviserer processen.

Stampet lerjord er følsom over for vejr-påvirkninger og sårbar over for hårde stød under transport, hvilket kan føre til revner og delaminering ved uhensigtsmæssig håndtering. Dette har projektet haft særlig fokus på i et tæt samarbejde med Énjord for at optimere elementernes robusthed og sikre mere modstandsdygtig logistik i kommende byggerier.

Normer, standarder og dokumentationspraksis

En gennemgående udfordring har været, at stampet lerjord ikke er dækket af gældende byggestandarder. Der findes i dag ingen fastlagte testnormer eller referenceværdier for styrke, holdbarhed eller brandmodstand i dansk sammenhæng.

Projektet har derfor bidraget med forslag til nye testforløb og dokumentationspraksis, som på sigt kan danne grundlag for godkendelse og regulering. Det står klart, at arbejdet med råmaterialer som lerjord nødvendigvis må rumme en vis tolerance: vi tror ikke på én fast værdi, men på et spænd af værdier, der tillader materialet at agere med sin naturlige variation.

Der er i projektet arbejdet systematisk for at skabe viden på området – herunder et testforløb hvor der på fuldskala-niveau er foretaget styrketest og forskydningstest til at bidrage til en proces af verificering og mod tredjepartsgodkendelse.

Resultaterne danner fundamentet for den videre udvikling, hvor målet er at forene materialets bæredygtige fordele med de krav, moderne byggeri stiller til sikkerhed, holdbarhed og logistik.

Refleksion

Byggeri og anvendelse

Michael Plesner, CPH Village
Christian Nørgaard, KIRKBI
Jens Breinholt, PensionDanmark

I Leralliancen deler tre bygherrer og tre arkitekter ambitionen om at bygge med stampede lerjord-selementer. Hver bygherre repræsenterer et unikt casebyggeri, og projektets fælles mål har været at omsætte idéerne til konkrete byggerier. Som medlemmer af styregruppen har bygherrerne været med til at holde projektet på sporet og træffe de afgørende valg, når retning og prioriteringer skulle fastlægges.

Hvordan ser I som bygherrer på brugen af lerjord som byggemateriale?

Michael: Vores mission er at lave betalbare boliger med et lavt forbrug af ressourcer. Vi prøver os frem med forskellige løsninger og lige nu bruger vi træ som primær ressource. Men vi erkender også, at træ har sin egen iboende værdi i skoven. Vi bør derfor være beherskede i vores brug af træ og undersøge alternativer, der kan supplere eller erstatte træ, hvor det giver mening. Her ser vi lerjord som en mulighed.

Christian: I vores optik har en kombination af lerjord og træ et stort potentiale. Paradoksalt nok minder det meget om de bindingsværkshuse vi kan se tilbage på før industrialiseringen. Vores nysgerrighed går i retning af hvordan vi kan optimere materialebrugen og processerne, således de to materialer sammen kan udvikles ind i et kommercielt marked.

Jens: Vi ser et stort potentiale i lerjord, og har et specifikt projekt i pipeline hvor vi forventer at gøre brug af lerjord. Dog er der stadig barrierer, der skal overkommes. Især brandklassificering er et tema, der ikke er løst endnu. Det skal på plads, før vi kan anvende materialet i større skala.

Hvad har I lært af de første erfaringer med lerbyggeri?

Michael: Det er nu dokumenteret at det er muligt at bruge lerjord til bærende, indvendige vægge. Selv uden tilsætning af kalk eller andre bindingsmidler. Samtidigt kan vi se, at der er længere vej til at bruge lerjord udvendigt. At gøre det vandresistent er formentligt afgørende i forhold til at få det rullet ud på byggepladserne i skala.

Christian: Stampet lerjord som byggemateriale har i vores optik et meget stort potentiale. Vores engagement i Leralliancen såvel som vores egne erfaringer med at bygge med stampede lerjords elementer, har vist os, at vi stadig er i en eksperimentel fase og med nogle mil foran os inden det kan kommercialiseres fuldt ud, men dog ikke længere væk, end at potentialet er inden for rækkevidde.

Jens: Vi har endnu ikke gjort os vores egne direkte erfaringer, men har fulgt nøje med i vores kollegers eksperimenterende arbejder i f.eks Travbyen i Billund. Vi har opnået meget viden men også fået understreget at alt nyt kan være svært og at timing og rettidighed er afgørende for at nye metoder/materialer implementeres.

Hvordan kan bygherrer bidrage til udviklingen af nye materialer som lerjord?

Michael: Vi er glade for at tage del i alliance, hvor forskning, produktion og efterspørgsel hånd i hånd går i dén retning. Som bygherre repræsenterer vi efterspørgslen, og vi ser det som vores ansvar at støtte opstarten af en ny produktion ved at aftage de første elementer. Vores mål er at skabe en måske lille, men stabil efterspørgsel over de næste år, for dermed at skabe et grundlag for, at en reel produktion kan blive etableret og udviklet på. Leralliancens første fase har givet os et godt grundlag til at vi som bygherre kan komme i gang.

Christian: Vi deltager meget gerne i vidensprojekter som Leralliancen også fremadrettet. En læring fra projektet er at erfaringsdannelsen sker bedst ved at kombinere praksis og akademia.

Jens: Vi ser positivt på samarbejder på tværs mellem forskning, produktion og bygherrer, men som ansvarlig bygherre og pensionskasse, har vi brug for, at der er en vis modenhed i produktet. Vi arbejder hele tiden for at nedbringe klimaaftrykket i vores projekter, men ønsker ikke at tage for store risici med uafprøvede materialer. Vi bidrager gerne til udviklingen af både teknologier og materialer, og - når de er klar til skalering, indarbejder dem i vores projekter.

Afslutningsvis – hvad skal der til, for at lerjord for alvor kan blive en del af fremtidens byggeri?

Michael: For at lykkes skal vi tænke industriel produktion på nye måder. Robotter og kunstig intelligens er på global fremmarch, og det skal vi udnytte til at opbygge en forsyning af materialer der er lokal, ressourceeffektiv og som resulterer i produkter som gør mennesker glade. Leralliancen har taget et første skridt i den retning. Det næste årti vil byde på mange muligheder for iværksættere, der interesserer sig for AI, robotter og materialer. Allerede nu er der - udover Danmark - eksempler på robotorienterede, lerjord startups i Schweiz og i Japan.

Christian: Vi skal være realistiske. Før lerjord kan blive en fast del af markedet, skal vi have løsninger, der kan fungere uden særlige vilkår. Først da giver det mening at tale om markedsgennembrud.

Jens: Først og fremmest skal vi have de tekniske barrierer nedbrudt – især ift. brand og dokumentation. Jeg er overbevist om at det nok skal lykkes og at der nok skal komme styr på de pt uafklarede forhold. Når det sker, kan vi begynde at tænke i skalering og jeg glæder mig meget til at arbejde med stampet lerjord i fremtiden.



Fælleshuset i Travbyen af KIRKBI og Reværk

PER SPEK TIVER

Et ambitiøst udviklingsprojekt

Projektet har vist, at når forskning, rådgivning og industri arbejder tæt sammen, kan et nyt råmateriale gå fra idé til byggekomponent på få år – selv uden eksisterende normer og praksis.

I dette afsnit sætter vi fokus på, hvad udviklingsprojektet har affødt af viden, metoder og teknologier, som rummer potentiale for yderligere udvikling. Vi peger på områder, der kræver yderligere undersøgelser og afklaringer, før stampet lerjord kan blive et realistisk og konkurrencedygtigt valg for byggebranchen.

Ensartethed i råmateriale

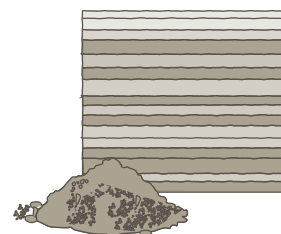
Naturlige variationer i jordens sammensætning gør det nødvendigt at arbejde systematisk med et testparadigme, der verificerer råmaterialets egenskaber, før der fremstilles byggeelementer. Skalering – og dermed håndtering af større råmateriemængder – bliver en afgørende faktor for homogenisering og for at undgå udsving i materialets karakteristika, som kan give afvigende egenskaber.

Materialets sammensætning og kornfordeling har stor betydning for dets mekaniske egenskaber.

I projektets testtrin 04 udviklede Teknologisk Institut et værktøj til simulering af kornfordeling ved fysisk stabilisering. Selvom den såkaldte "kornkurve-generator" endnu ikke har givet de ønskede resultater, er det et oplagt udviklingsområde. Et mere præcist kendskab til den ideelle "opskrift" vil styrke værdikædens robusthed og skabe større sikkerhed omkring produktets egenskaber.

En central fremtidig overvejelse er, hvor omfattende testparadigmet skal være for at sikre det endelige produkts kvalitet. Hvilke parametre kan fungere som pålidelige indikatorer for anvendelse af stampet lerjord i byggeri – og hvordan fastlægges kravene til udfaldet.

Fremadrettet vil det være afgørende at definere metoder til kontroltest på det endelige produkt, fremfor at teste alle produktets bestanddele på råmateriale-niveau.



Additiver og bindere

Selvom vi ikke gik videre med additiver og bindere i indeværende projekt, ser vi det som en nødvendighed at arbejde videre med at bestyrkelse materialet for at leve op til de krav der stilles på byggepladsen, som erfaret fra Travbyen i Billund. Tre centrale parametre er her materialets trækstyrke, robusthed og vandmodstand.

Stampet lerjord har naturligt lav trækstyrke og begrænset robusthed, og parallelt med projektet er der derfor eksperimenteret med forskellige tilsætninger for at forbedre materialets egenskaber. Indikative tests med tilsætning af organiske fibre har bl.a. vist en tydelig forbedring af trækstyrken og materialets brudstyrke og robusthed.

Flere andre additiver har givet lovende resultater:

- Vulkansk aske - der kan øge materialets hårdhed.
- Oxara – der bidrager til et produkt, der fremstår mere hårdført.
- Kalk - der, ifølge studier fra DTU, desuden forbedrer vandmodstanden markant.

Vandmodstand har været en af de største udfordringer – særligt i byggepladssituationer, hvor materialet er sårbart over for vand og kræver omhyggelig håndtering. Dette stiller krav til både planlægning, beskyttelse og logistik i udførelsesfasen.

Produktionsoptimering

Vi har oplevet stor virkning ved robotautomatisering af stampeprocessen ift. traditionelle manuelle forarbejdninger. Samtidig ser vi udvalgte steder i produktionen, hvor det fortsat er oplagt at optimere – med konstant fokus på, rationelt, at balancere mellem manuelle og automatiserede processer.

Robottens høje præcision i stampeprocessen giver en så glat overflade i de enkelte lag i de producerede elementer, at der desværre opleves en tendens til delaminering grundet manglende friktion imellem lagene.



Her vil det være af afgørende betydning, at gentænke eks. stampehovedets udformning så "ujævnheder" i lagene kan øge sammenhængen på tværs af disse.

Cylindretest med additiver hos Teknologisk Institut

I produktionen har især afforskallingen vist sig at være en tidskrævende manuel proces. Der er derfor lavet indledende simuleringer af en automatiseret afforskallingsmetode, som udviser stort potentiale til at nedbringe den manuelle proces, omend dette kræver videreudvikling for at fungere i praksis.

Derudover giver systemets store arbejdsområde og funktionsfleksibilitet ligeledes mulighed for, at automatisere tilførsel af råmateriale, hvilket vil kunne optimere den ellers manuelle produktionsled betragteligt og desuden muliggøre strategiske variationer eller stabilisering i den påfyldte råmateriale.

Generelt er der fortsat behov for at definere de rette kvalitetssikringsmetoder og implementere disse i produktionen.

Fra prototype til byggesystem

Det nuværende byggeelement er udviklet som et basismodul til anvendelse i tests og casebyggerier. Elementet er tilpasset murmål og indpasser sig således i dansk byggeteknik.

En mulighed kan være, at udvide produktionslinjen til at kunne levere projektilpassede geometrier, størrelser og -egenskaber – noget der vil give arkitektonisk og projekteringsmæssig større frihed. Ambitionen kan således være at udvikle et sortiment af elementer, der kan indgå og samvirke med andre byggesystemer og dermed give mulighed for opskalering.

Et sådant byggesystem med stampede lerjordselementer kan bl.a. omfatte indvendige skillevægge, bagmure og lejlighedsskel.

Det forventes ligeledes, at fremtidens brug af lerjordsblokke kan være som en del af hybridkonstruktioner – som det opleves i Fælleshuset i Travbyen. Her kan lerjordselementerne og trækonstruktioner fungere godt i samspil, hvor lerjorden bidrager som høj-densitet komponent der supplerer det lette byggeri og tilføjer termisk masse og tyngde.

Høj cirkularitet og off-site biodiversitet

Stampet lerjord er potentielt set et fuldt cirkulært materiale, der, ustabiliseret, kan genbruges direkte i nye elementer eller knuses og returneres til jorden uden negativ påvirkning. Derudover udgør anvendelsen af overskudsjord fra byggepladser et stort ressourcemæssigt potentiale. Denne tilgang giver dog også en betydelig udfordring, når det kommer til kvalitetssikring ved varierende råmaterialeforekomster - udfordringer der især kommer til udtryk ved håndtering af små råmateriale-mængder.

En del af løsningen på denne problematik vil bl.a. kunne findes i skalering af blandingsfaciliteter, hvor en forøgelse af råmateriale-volumen, i sig selv, vil gøre det lettere at karakterisere og homogenisere det samlede materiale og dermed lette inddragelsen af varierende overskudsjord fra byggepladser effektivt.

Som udgangspunkt er de lerjordsforekomster der kan bruges til stampet lerjord naturligt forekomne, mineralogisk bredspektrede og findes de fleste steder tværs af landet.



Råmaterialet spredes i produktionshallen til tørring grundet for høj fugtighed, inden det stemples. I baggrunden står de første elementer til tørring i 6-8 uger, før de testes.



På denne vis er de stampele lerjord-selementers råmateriale ikke en rovdraft på snævre ressourcepoter. Omend der kan være udfordringer med lokale forskelle i lerjorden, stiller det således relativt lave krav til de arealer hvor den tages fra og der kan derfor anvendes jord fra både råstofgrave, byggepladser eller infrastrukturprojekter, hvor udtagning ikke selvstændigt medfører nye indgreb i naturområder.

Ved særligt fokus på anvendelsen af overskudsjord kan lav off-site biodiversitetspåvirkning sikres, sammenlignet med en række andre materialer - herunder træ hvor der ofte anvendes skovningsmetoder der påvirker naturområder direkte og omfattende.

Livscyklusanalyse (LCA)

De foreløbige analyser viser, at stampet lerjord har et markant lavere CO₂-aftryk end fx armeret beton – i nogle tilfælde op mod 90 % reduktion. Derudover kan materialet genanvendes uden komplekse processer, hvilket styrker både klimaregnskabet og cirkulariteten. (Henriksen, E.)

Ved brug af rent råjordsmateriale kan genbrug ske 1:1, hvilket gør produktionen mindre CO₂-tung, da processen primært omhandler transport fra grusgrav til produktionshal, efterfulgt af komprimeringen, der kræver energi. Elementerne kan herefter opbevares i en uopvarmet, men overdækket hal.

Transporten fra produktion til byggeplads udgør det næste CO₂-udslip i værdikæden.

Fremadrettet bør det derfor være ambitionen, så vidt muligt, at nedbringe transport ved dels at indhente jord og blande denne tæt ved produktionsstedet og, måske på sigt, også tænke produktionssteder placeret decentralt – på samme måde som de danske teglværker traditionelt lå spredt rundt i landet – eventuelt placeret nær udvalgte grusgrave.

Økonomi

Økonomi har fra starten været en central faktor i projektet. Gennem hele forløbet har vi haft løbende branchedialog og fokus på, hvordan materialet kan gøres markedsmodent. Havde projektet været rent forskningsbaseret, uden hensyn til kommerciel anvendelse, kunne vi have prioriteret anderledes – men her har økonomiske overvejelser været afgørende, fordi målet i sidste ende er et salgbart produkt. Bygherre har fungeret som vigtig sparringspartner om vilkår for den økonomiske rammesætning.

Beslutningstagningen har især været præget af økonomiske hensyn i forhold til valg af råmateriale og muligheder for produktionsoptimering. Det har blandt andet haft betydning for evalueringen af potentielle additiver, bindere og metoder til fysisk stabilisering, idet vi ikke ønsker at fordyre produktet unødigt.



Partnerskaber med grusgrave skaber et stærkt, tillidsfuldt samarbejde – med stabil adgang til overjord som den eneste kontinuerligt tilgængelige ressource over måneder og år.

I den eksperimentelle fase ligger materialeprisen stadig over konventionelle alternativer. De højere omkostninger skyldes blandt andet lav automationsgrad, manuel håndtering og afforskalling. Erfaringer fra projekter som i TU Braunschweig viser dog, at optimering af produktionstiden, robotteknologi og effektiv logistik kan effektivisere processen og dermed reducere prisen.

Vi har igennem projektet haft et ønske om at benchmarke materialet op imod beton, let-beton og mursten – men en vigtig betragtning også medtage de fordele materialet rummer ift. De mange Indeklimafordele. Som potentielt set kan udgøre en fordel som erstatning for, brugt rigtigt, kan være med til at nedbringe behov for mekanisk indeklima styring og regulering af fugt og temperatur.

Test og dokumentation

I projektet er der, gennem et ambitiøst testforløb og en dokumentationspraksis, skabt et fundament for, hvordan brugen af stampet lerjord kan verificeres i dansk byggeri.

Undervejs har testparter og ingeniør skabt erfaringer med materialet og testpraksis, som er grundlaget for, at man på sigt kan udvikle danske lerjordsstandarder. Projektet har påvist stampet lerjords potentiale som bærende bygningskomponent gennem resultater, som belyser, at lerjordsselementerne kan benyttes i op til tre etager.

På trods af lerjordens naturligt brandhæmmende egenskaber findes der i dag ikke den fornødne dokumentation for brandmodstandsevnen som bærende materiale i dansk sammenhæng. Derfor vil det fremadrettet være nødvendigt at verificere brandegenskaber gennem brandtest. Ligeledes vil udarbejdelsen af en TGA (Teknisk Godkendelse til Anvendelse) fra ETA Danmark, på baggrund af de, i indeværende projekt, udførte tests, muliggøre en bredere og nemmere anvendelse.

Næste skridt

Udviklingen af stampet lerjord som byggemateriale i Danmark har fra starten været båret af et tæt samspil mellem tværfagligt samarbejde og målrettet vidensdeling.

Projektet har trukket på et stærkt netværk af aktører – fra internationale vidensmiljøer i Grenoble, Zürich og Braunschweig til danske initiativer som det årlige "Ler-symposium", der siden 2022 har styrket kendskab og netværk i den danske byggebranche.

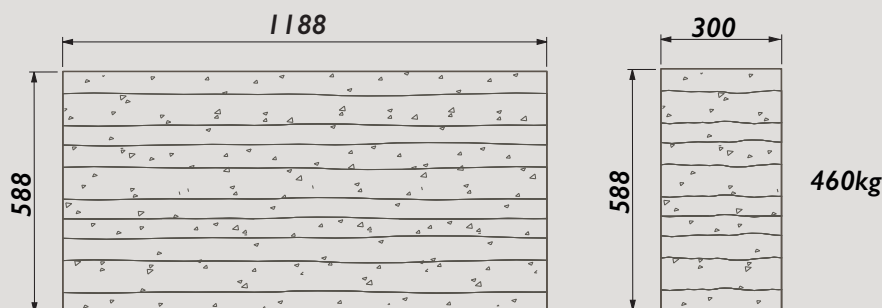
Samarbejdet i Leralliancen har ikke blot dokumenteret materialets egenskaber, men også udviklet nye testmetoder, måleprincipper og arbejdsgange, som er nødvendige i fraværet af etablerede normer. Resultaterne viser, at materialet kan erstatte beton i visse anvendelser, selvom enkelte parametre stadig kræver endelig verificering. Parterne er stærkt motiverede for at fortsætte udviklingsarbejdet, og det solide fundament giver mulighed for næste skridt: brandtest, udarbejdelse af EPD, etablering af en produktionslinje samt yderligere modning af teknologien gennem test i nye skalaer og anvendelser. Den fortsatte udbredelse i Danmark vil bygge videre på det etablerede samarbejde, de positive erfaringer og strategiske partnerskaber på tværs af branchen.



Vejledende

DATA-ARK

Præfabrikeret stampet lerjordselement



Præfabrikerede byggelementer i stampet lerjord til indvendige brug.

Kan anvendes som både bærende og ikke-bærende element i konstruktioner med krav til fugtbeskyttelse og lav miljøpåvirkning.

Producent

Robot At Work

Geometri

M1200 (1188 × 588 × 300 mm)

Tolerancer: ca. 2 mm (længde/bredde/højde)

Udarbejdet i samarbejde med Werner Sobek - **værdier er vejledende.**

Egenskab

Reference værdi

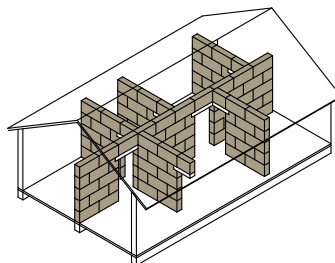
Standard reference

Densitet	2000-2200 kg/m ³	DIN 18945
Densitetsklasse	Klasse 2	DIN 18945
Trykstyrke	min. 2-2,5 MPa	DIN 18945
Trykstyrkeklasse	Klasse 2	DIN 18945
E-modul	min. 750 N/mm ²	DIN 18945 (12-2018)
Applikationsklasse	Klasse II	DIN 18945
Brandadfærd	A1 (ubrændbart)	DIN 18945 / EN 13501-1
Brandmodstandsevne	-	-
Lydisolering	Rw ca. 45-50 dB (afh. af tykkelse)	EN ISO 10140-1, -2, -5
Skadelige salte	Under grænseværdier	DIN 18945
Miljøpåvirkning (LCA)	-	-

Anvendelsesmuligheder

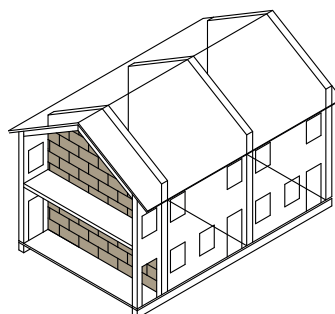
Indvendigt (Ikke bærende)

Lerjordselementer som selvbærende konstruktion i en etage - med udnyttelse af brand og indeklimategenskaber.



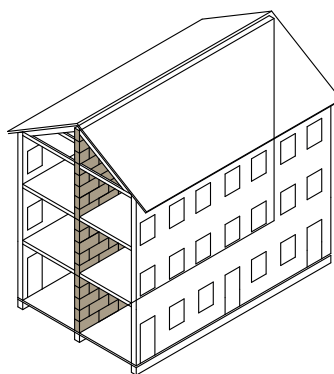
Lejlighedsskel

Lerjordselementer som selv- og medbærende konstruktion mellem lejligheder i op til tre etager - med udnyttelse af brand og indeklimategenskaber.



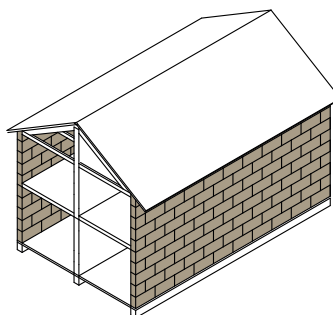
Indvendigt bærende 2-3 etager

Resultater indikere at lerjordselementerne kan benyttes i op til tre etager, med et maks. spænd på 5 m. idealt set suppleret af TGA samt endeligt udført brandtest.



Facade

Anvendelse af stampe lerjordselementer som facade stiller højere krav til bl.a. frost, div, absorption og contact test iht. DIN-standard hvorfor dette kræver et nyt testforløb.



Vidensgrundlag

Denne publikation bygger på mange års arbejde med byggeri i lerjord. Nedenfor præsenteres den litteratur, der er anvendt som grundlag, samt de referencer og bilag, der underbygger publikationen.

Litteratur

Bertelsen, I., Goltermann, P. & Kirkelund, G.M., 2022. Udvikling og test af støjskærme ved anvendelse af stampet lerjord – Etape 1. Kongens Lyngby: DTU Civil Engineering.

Bertelsen, I., Goltermann, P. & Kirkelund, G.M., [u.å.]. Anvendelse af overskudsjord til produktion af stampe lerkonstruktioner. Kongens Lyngby: DTU Civil Engineering.

Holmboe, T. 2001. Teglværksler i Danmark Sammensætningen af dansk teglværksler, GEUS. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport Bind 2001

Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.), 2019. Lehm-bau Regeln: Begriffe – Baustoffe – Bauteile. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Henriksen, E., 2025. LCA Analyses of Clay Structures: Preparation of Environmental Product Declarations and calculation of load-bearing capacity for two types of unfired clay walls [Bachelorprojekt]. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark.

Houben, and Guillaud. 1994. Earth Construction: A Comprehensive Guide. ed. ITDG Publishing.

Kapfinger, O. & Sauer, M., 2015. Martin Rauch – Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm. München: DETAIL – Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co.

Minke, G., 2006. Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Basel: Birkhäuser.

Minke, G. & Ziegert, C., 2020. Lehm-bau-Praxis: Planung und Ausführung. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Beuth Verlag.

Pelé-Peltier, A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Hamard, E. & Lhenry, M., 2021. A similitude relation to assessing the compressive strength of rammed earth from scale-down samples. Coventry: Faculty of Engineering, Environment & Computing, Coventry University.

Ávila, Puertas, & Gallego, 2021. Characterization of the mechanical and physical properties of stabilized rammed earth: A review. Department of Structural Mechanics and Hydraulic Engineering, University of Granada.

Richter, Matthias & Horn, Wolfgang & Juritsch, Elevtheria & Klinge, Andrea & Radeljic, Leon & Jann, Oliver. (2021). Natural Building Materials for Interior Fitting and Refurbishment—What about Indoor Emissions. Materials and Air Pollutants Division, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Stigt, J. van, 2022. Raw Earth as a Construction Material. NL: Flyerzone, LEVS Architecten.

Thøgersen, F., 1993. Byggematerialet lerjord. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

Referencer

BCMaterials, 2025, <https://bcmaterials.org>

ERDEN, 2025, <https://www.erden.at>

FETDETERRA, 2025, <https://www.fetdeterra.com>

CYCLE TERRE, 2025, <https://www.cycle-terre.eu>

Bilag

Bilag 1. Énjord, 2024. Resultatrapport – Testtrin 1.

Bilag 2. Teknologisk Institut, 2024. 224307 - Skadelige salte, CEC og XRD-analyse, testtrin 03.

Bilag 3. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 224307-2-01 - 13 stk. lercylindre Ø100, h = 100mm.

Bilag 4. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 224307-2-02 - Tørret lerjord.

Bilag 5. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 224307-2-03 - Ca. 200 g lerjord.

Bilag 6. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 224307-2-04 - Tørret lerjord.

Bilag 7. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 224307-4-01 - 10 stk. lercylindre Ø100, h = 207–213mm.

Bilag 8. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 224307-7-01 - 15 stk. stampet lerkuber (ca. 200×200×200mm), fremstillet 09-11-2024.

Bilag 9. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 224307-8-01 - 1 stk. stampet lerblok (1200×600×300mm).

Bilag 10. Teknologisk Institut, 2025. Prøvningsrapport 224307-8-02 - 3 fuldskala vægge af stampet lerjord.

Bilag 11. Teknologisk Institut, 2025. Prøvningsrapport 224307-8-03 - 3 fuldskala vægge af stampet lerjord.

Bilag 12. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 264215-1.1 - Modifieret proctor.

Bilag 13. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 264215-2.1 - Modifieret proctor.

Bilag 14. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 264215-3.1 - Modifieret proctor.

Bilag 15. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 264215-4.1 - Modifieret proctor.

Bilag 16. Teknologisk Institut, 2024. Prøvningsrapport 311667 - 1 stk. stampet lerblok (1200×600×300mm).

Bilag 17. Werner Sobek, 2023. 230927 LA Summary Clay in Germany WSCP

Bilag 18. Werner Sobek, 2023. 231116 LA Requirements Elements WSCP

Bilag 19. Werner Sobek, 2023. 231128 Overview tests WSCP

Bilag 20. Werner Sobek, 2024. 240111 LA Requirements Clay WSCP

Bilag 21. Werner Sobek, 2024. 240301 Element size and geometry WSCP

Bilag 22. Werner Sobek, 2024. 241112 Conformity assessment acc. to DIN 18942-100 WSCP

Foto kreditering

Alle fotos: Forfattere, medmindre andet er angivet.

S. 1, 8, 9, 30, 31, 33, 46, 47, 61, 62, 65, 66, 70, 71: Something Found af Oskar Uhrskov Mikkelsen og Leonardo Dal bo.

