TEKNISK RAPPORT • TECHNICAL REPORT 291 • 1993

ISSN 0908–3871

Byggematerialet lerjord

Finn Thøgersen

LABORATORIET FOR BYGNINGSMATERIALER
Danmarks Tekniske Højskole

BUILDING MATERIALS LABORATORY
Technical University of Denmark



TEKNISK RAPPORT • TECHNICAL REPORT 291 • 1993

ISSN 0908-3871

Byggematerialet lerjord

Finn Thøgersen

Juni 1993

Byggematerialet lerjord
Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole
Teknisk Rapport • Technical Report 291 • 1993
ISSN 0908-3871
I alt 24 sider + 2 bilag

Keywords

Clay, earth, strength, moisture, construction.

Summary

The report summarizes the present knowledge of the mechanical, moisture mechanical and durability properties of clay earth and unburned clay used as a building material. Proposals for further research is given.

Indhold

side

1. Indledning 1

2. Baggrund 2

3. Lerjordsbyggeri 4
   3.1 Lerjords egenskaber 4
   3.2 Konstruktionsmetoder 7
   3.3 Blanding og stabilisering 8

4. Problemstillinger omkring lerjordsbyggeri 10
   4.1 Holdningsmæssige og økonomiske aspekter 10
   4.2 Tekniske problemstillinger 11

5. Konstruktionsudformninger 14
   5.1 Saltoftevænge 14
   5.2 Halmlersprojekter 15
   5.3 Andelssamfundet i Århus 15

6. Materialeegenskaber 16

7. Oplæg til videre arbejde 21
   7.1 Holdningsmæssige og økonomiske undersøgelser 21
   7.2 Tekniske undersøgelser 22

8. Referencer 24

Bilag 1: Materialedata fra ref. [2].

Bilag 2: Sorptionskurve.

1. Indledning

Byggeri med lerjord som dominerende råmateriale er i løbet af de senere år blevet genoptaget på forsøgsplan her i landet. Byggeriets Udviklingsråd har fornylig udsendt rapporten "Lerjord som byggemateriale" forfattet af arkitekterne Steen og Flemming Østergård fra tegnestuen Vindrosen [1]. Denne rapport, der er baseret på flere års grundige studier og praktiske erfaringer, er udformet som en vejledning for lerjordsbyggeri, og er tænkt som inspirationskilde for videre brug af materialet.

Nærværende rapport skal ses som et supplement til den omtalte vejledning. Hensigten er at give en objektiv oversigt over de problemstillinger, der ud fra en bygningsmaterialeteknisk synsvinkel er interessante i forbindelse med lerjordsbyggeri her i landet. Endvidere redegøres for kendte materialeværdier og forslag til den nødvendige videre forskning opstilles.

Rapporten er udarbejdet på Laboratoriet for Bygningsmaterialer som et led i Danmarks Tekniske Højskoles indsatsområde "Renere teknologi og byøkologi".

2. Baggrund

Sammen med træ og natursten har ubrændt lerjord igennem tiderne været de altdominerende byggematerialer overalt i verden. Jorden er primært blevet brugt til stampede vægge eller soltørrede sten. Dette forhold er dog ændret i løbet af de seneste hundrede år, hvor den industrielle udvikling har muliggjort en bred anvendelse af mere forarbejdede materialer som stål, cement og brændt tegl. På lerjordsområdet findes altså et stort erfaringsmateriale, der dog i nogen grad er gået tabt, idet materialet stort set ikke er blevet brugt i dette århundrede her i Danmark. I andre dele af verden (fortrinsvis u-lande) har lerjord hele tiden været meget anvendt, idet det disse steder har været det billigste og lettest tilgængelige byggemateriale.

I årene op mod 1950 var der en vis interesse for lerjordsbyggeri her i landet, begrundet i forsyningsknapheden i efterkrigsårene. Civ.ing. H. Ewaldsen, der havde erfaring med lerjordsbyggeri fra et ophold i USA, arbejdede med huse i geobeton, dvs. cementstabiliseret lerjord. Samtidig opførtes enkelte lerjordshuse under ledelse af arkitekt Sven Risom, som over en lang årrække skrev en del bøger med praktiske vejledninger og historiske data for lerjordsbyggeri. Disse to pionerers arbejde førte dog ikke til en bred anvendelse af lerjord, og interessen for materialet ebbede ud efterhånden som følgerne af krigen blev overvundet [1].

De senere års stigende økologiske bevidsthed har genvakt interessen for lerjordsbyggeri her i landet, idet materialet kræver meget lidt forarbejdning og energi til produktion og ideelt set kan føres tilbage til naturen igen efter brug. Der mangler dog i udpræget grad dokumenteret viden om det færdige materiales konstruktive opførsel, især i relation til aktuelle nutidige krav og forventninger til styrke, varmeisolering, tæthed og holdbarhed. Denne viden findes ikke her i landet, da materialet som nævnt stort set ikke har været brugt, efter at man er begyndt at stille konkrete krav til byggematerialernes egenskaber.

I udlandet findes specielle forskningscentre, der udelukkende beskæftiger sig med lerjordsbyggeri. I Frankrig, hvor man har en lang ubrudt tradition for lerjordsbyggeri, findes en specialuddannelse på arkitektskolen i Grenoble, hvor lerjordsbyggere får en 2-årig uddannelse. Her findes endvidere en statsstøttet organisation CRATerre (Centre de Recherche et d'Application de Terre), som arbejder med forskning og undervisning specielt med henblik på byggeri i ulandene. Organisationen er repræsenteret i adskillige lande over hele verden. I Tyskland findes på universitetet i Kassel et speciallaboratorium der arbejder med eksperimentalbyggeri, herunder lerjordsbyggeri (Forschunglabor für Experimentelles Bauen). Forskning og udvikling af lerjordsbyggeri specielt rettet mod udviklingslande styres af United Nations Center for Human Settlements (UNCHS - Habitat) i Nairobi, Kenya.

I Danmark er der i de seneste år gennemført et par forsøgsprojekter med lerjordsbyggeri. I forbindelse med produktionsskolen Saltoftevænge ved Svebølle i Vestsjælland har en række unge selvbyggere 1987 - 89 opført deres egne boliger i stampet lerjord i samarbejde med tegnestuen Vindrosen. I Århus har andelssamfundet Hjortshøj opført et økologisk hus i stampet lerjord som pilotprojekt for en planlagt økologisk bydel. I den forbindelse har man oprettet firmaet Økotech, som på forretningsmæssige vilkår bygger og rådgiver om økologiske huse. Endelig arbejder en kreds med bl.a. arkitekt Kirsten Birch fra arkitektskolen i Århus med projekter med let-ler, dvs. ler med iblandet halm.

Såfremt man fra samfundets side ønsker at fremme en mere udbredt brug af materialet, er det nødvendigt at have mere konkret viden om lerjordens egenskaber i den færdige konstruktion. Dette gælder især, hvis byggeriet skal financieres af realkreditinstitutter eller offentlige instanser, der er nødt til at have sikkerhed for at byggeriets kvalitet er tilfredsstillende i forhold til prisen og de egenskaber man kunne have opnået ved traditionelt byggeri.

3. Lerjordsbyggeri

3.1 Lerjords egenskaber

I det følgende gives en kortfattet oversigt over byggematerialet lerjords sammensætning og vigtigste egenskaber. For en mere detaljeret gennemgang henvises til [1] og [2].

Sammensætning: Lerjord består af fraktionerne ler, silt, sand, grus og sten. Grænserne mellem de enkelte fraktioner defineres i denne sammenhæng således:

Fraktion	Kornstørrelse [mm]
Sten	> 20
Grus	2 - 20
Sand	0.06 - 2
Silt	0.002 - 0.06
Ler	< 0.002

En konkret jordtypes egenskaber er meget afhængig af indholdet af de enkelte fraktioner. I forbindelse med anvendelighed som byggemateriale er det især lerindholdet, der er af interesse, idet det er denne fraktion, der virker som det sammenkittende element.

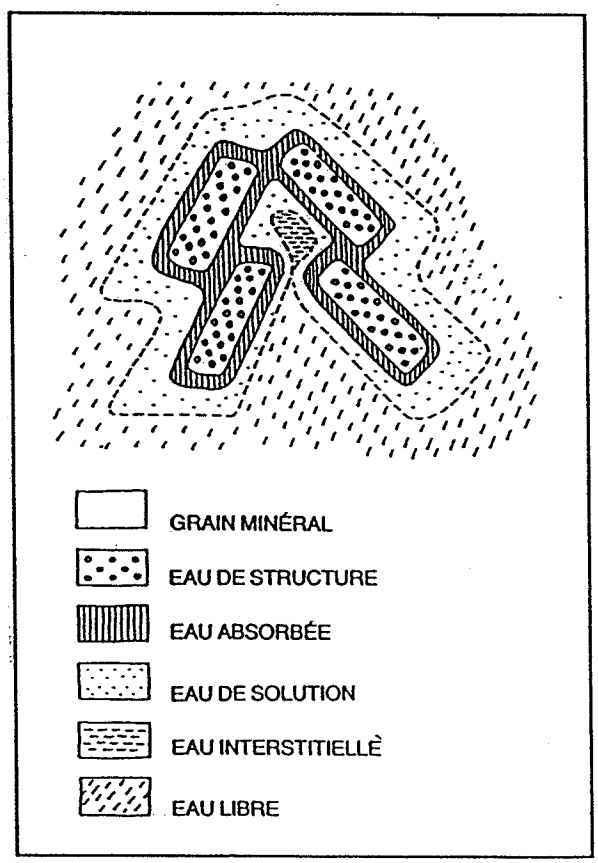
Lerpartiklerne dannes ved fysisk og kemisk forvitring af forskellige bjergarter. De vigtigste lermineraler er illit, kaolinit, smectit, klorit og vermiculit. Af disse er specielt kaolinit og illit velegnede til lerjordsbyggeri, mens lermineraler fra smectitgruppen er uegnede, idet de giver anledning til meget store fugtbevægelser med tilhørende stort svind. Lerpartiklerne har langt den største samlede overflade i lerjorden og er således den dominerende fraktion m.h.t. overfladekræfter (kohæsion) og absorption af vand.

De grove fraktioner (sand og grus) virker som et bærende skelet i lerjorden. Der er ingen sammenhængskraft mellem kornene og vandabsorptionen er minimal.

Siltfraktionen har egenskaber der naturligt nok er en kombination af lerpartiklernes sammenkittende funktion og de grove partiklers bærende funktion. Den til bygningsformål mest velegnede lerjord har en jævn fordeling af alle fraktioner, dvs. en flad kornkurve.

I Danmark består overfladelagene (lige under mulden) i Østjylland og på øerne primært af moræneler, der netop er et velfordelt materiale med en flad kornkurve. I den vestlige del af Jylland findes hovedsagelig smeltevandsaflejringer, der er betydeligt mere ensartede, dvs. bestående af f.eks. udelukkende sand eller udelukkende ler.

Vandindhold: Lerjordens indhold af vand har indvirkning på alle de egenskaber, som behandles i det følgende. Indledningsvis vil de forskellige former for vand der kan optræde i jorden derfor blive omtalt. På figur 1 ses en oversigt taget fra CRATerres rapport [2].

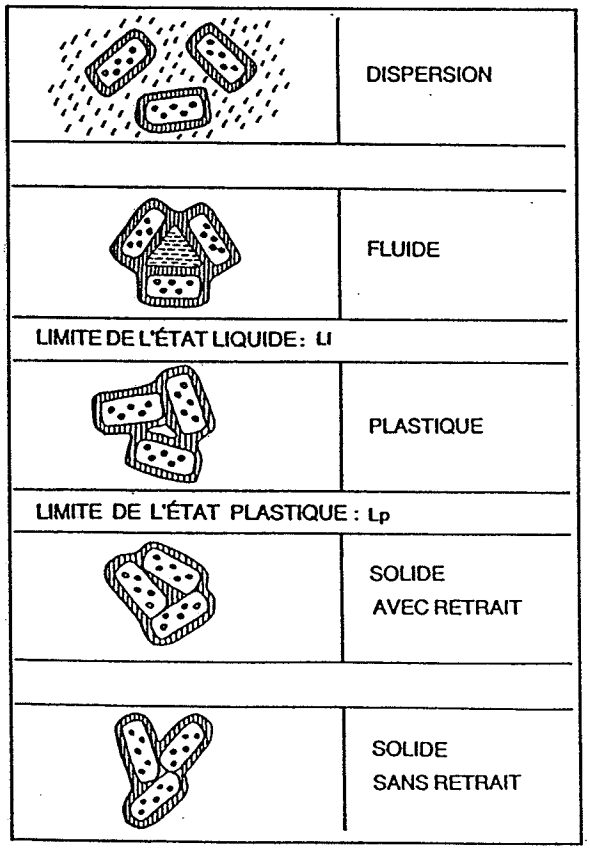


Figur 1: Forskellige former for bundet vand i og omkring lerpartikler.

Inde i de enkelte lerpartikler findes kemisk bundet vand (strukturvand eller krystalvand), som kun kan uddrives ved temperaturer over 250 - 600 °C. På overfladen af lerpartiklerne sidder et ganske tyndt lag vand, der er bundet så fast, at det først forsvinder ved temperaturer mellem 100 og 200 °C. Omkring partiklerne findes et større lag adsorberet vand (eau de solution) der fastholdes af polære og elektrostatiske kræfter. Dette kan forsvinde ved normale brugstemperaturer. Endelig findes der uden for de enkelte partiklers vandbindingszone forskellige former for porevand og frit vand (eau interstitielle og eau libre), som fastholdes af kapillarkræfter. Også dette vand vekselvirker med omgivelserne ved normale brugstemperaturer.

Plasticitet: Lerjordens plasticitet defineres som evnen til at deformeres blivende (ikke-elastisk). En plastisk lerjord er altså formbar. Jordens plasticitet bestemmes af vandindholdet. Ved højt vandindhold er lerjorden dispergeret i vand eller flydende. Flydegrænsen defineres ved overgangen mellem flydende og plastisk tilstand. Plasticitetsgrænsen betegner overgangen mellem plastisk og fast tilstand. I den plastiske tilstand er der stadig vand mellem de enkelte lerpartikler, som ikke er i direkte kontakt. Plasticitetsindekset udtrykker udstrækningen af det plastiske område, dvs. forskellen i vandindhold mellem flydegrænse og plasticitetsgrænse.

I fast tilstand er der direkte kontakt mellem lerpartiklerne. Ved udtørring i fast tilstand vil lerjorden svinde indtil et vist punkt, hvor en videre udtørring ikke medfører yderligere svind. Dette vandindhold benævnes svindgrænsen. De forskellige begreber er illustreret på figur 2 som også taget fra CRATerre [2].



Figur 2: Lerjordens forskellige tilstande.

Retrait = svind.

Komprimeringsevne og optimalt vandindhold: Lerjordens evne til at sammenpresses ved et givet tryk og vandindhold betegnes komprimeringsevnen. Komprimeringsevnen udtrykkes ved den opnåede densitet. For en given jordtype findes et bestemt vandindhold, hvor jorden kan komprimeres maksimalt. Dette vandindhold betegnes det optimale vandindhold.

Trykstyrke: Den opnåede densitet er af afgørende betydning for trykstyrken, idet en tæt lejring af partiklerne medfører at trykstyrken bliver høj. For en given kompressionskraft fås således også den største trykstyrke ved det optimale vandindhold.

Kohæsion: De enkelte lerkorns overfladekræfter er som før nævnt afgørende for sammenhængningsevnen af jorden. Trækstyrken er således afhængig af både lerindholdet og vandindholdet i jorden.

Der findes standardiserede målemetoder til bestemmelse af alle de relevante materialeværdier for lerjorden. Sammensætningen bestemmes ved mikroskopi. Kornstørrelsesfordeling bestemmes ved sigteanalyse og sedimentation. Plasticitets- og flydegrænser findes ved Atterberg forsøg, komprimeringsevne ved Proctor forsøg, trykstyrke ved trykprøvning af sten, terninger eller udborede cylindre og endelig kohæsion ved trækforsøg efter den tyske DIN-norm.

3.2 Konstruktionsmetoder

Ved bygning af huse, hvor lerjord anvendes som det primære konstruktionsmateriale findes der mange forskellige konstruktionsmetoder. Her vil de vigtigste blive kort omtalt:

Pisé: Dette er betegnelsen for den byggemetode, hvor lerjorden stampes i en forskalling. Stampningen kan foregå enten med håndkraft eller ved brug af stampemaskine. De færdige vægge får et udpræget lagdelt udseende. Lerjorden stampes op i relativ tør tilstand (vandindhold højst omkring det optimale dvs. 10 - 15 vægt-%) og det vil således normalt være muligt at bruge jorden direkte som den opgraves. Den anvendte jord skal være sammensat med en jævn fordeling af alle fraktioner, og lerindholdet skal helst ligge mellem 8 og 25 vægt-%. Hvis det er muligt at holde vandindholdet nede i nærheden af svindgrænsen fås kun et minimalt svind. Tørdensiteten af det færdigstampede materiale vil ligge omkring 2000 kg/m^3.

Adobe: Plastisk lerjord klaskes med håndkraft ned i en form og tørrer efterfølgende i solen. Lerjorden må ikke indeholde sten og den skal have et lerindhold på 15 - 25 %. Der kan eventuelt iblandes lidt halm. Med denne metode fås sten med en densitet på omkring 1700 kg/m^3. Da metoden kræver et forholdsvis højt vandindhold, vil det normalt være nødvendigt at tilsætte vand og blande dette ind i jorden, før den puttes i form. Det svind, der nødvendigvis vil ske p.g.a. udtørring, da leret formes i plastisk tilstand, får ikke nogen indflydelse i den færdige konstruktion, idet stenene gerne skal tørres ud til et vandindhold under svindgrænsen, før de bruges til opmuring.

Pressede lersten: Lerjord presses eller stampes i en form, enten manuelt eller ved brug af pressemaskine. Densiteten bliver højere end for adobe-sten, dvs. omkring 2000 kg/m^3. Lerjorden skal have en ligelig fordeling af de enkelte fraktioner (8 - 25 % ler) og et vandindhold omkring det optimale.

Opmuring af adobesten og pressede lersten kan foretages ved simpelthen at gøre stenenes overflader våde og derefter presse dem sammen. Når denne samling tørrer vil der være en rimelig sammenhæng i muren. Normalt vil man dog bruge kalkmørtel eller kalkcementmørtel. Det er muligt at lave en "naturmørtel" af ler blandet med sand, som dog ikke har særligt gode egenskaber.

Der findes en række andre byggemetoder, eksempelvis wellerwände (opklaskning af våd lerjord iblandet halm), lerbrød (store, håndformede byggesten) og bindingsværk (opklining på træ-/risskelet). Disse metoder vil ikke blive nærmere behandlet her, da de må anses for uegnede til moderne danske forhold.

3.3 Blanding og stabilisering

For alle konstruktionsmetoderne gælder, at det muligvis kan være nødvendigt eller i hvert fald fordelagtigt at forbedre den tilstedeværende lerjord, enten ved at ændre jordens sammensætning eller stabilisere jorden ved iblanding af andre tilsætninger.

En meget fed jord med højt lerindhold kan få bedre egenskaber, hvis der iblandes en passende mængde sand og grus. Omvendt kan en mager jord forbedres ved iblanding af en meget lerholdig fraktion. Efter en sådan forbedring kan en jordtype, der ellers var fundet uegnet til den valgte byggemetode bruges med et godt resultat. Blandingen kan foretages med håndkraft eller ved brug af blandemaskine eller fræser.

Ved tilsætning af bindemidler som kalk eller cement kan styrke og holdbarhed af den færdige konstruktion forbedres væsentligt. Cementens virkning er ganske analog til virkningen i almindelig beton, nemlig en afbinding med vand, hvor tilslagskornene fastholdes i et skelet af hydratiseringsprodukter. Cementen går altså ind og erstatter lerets sammenkittende virkning, men reagerer kun ganske lidt med lerpartiklerne. Ved tilsætning af normalt 5 - 10 vægt-% cement kan trykstyrken omtrent fordobles i forhold til styrken af lerjorden uden cement. Herudover vil man efter cementens hærdning have en fugtstabil binding, som ikke kan brydes ved senere vandpåvirkning. Overfladeegenskaberne forbedres altså betydeligt.

Ved tilsætning af kalk sker der en kemisk reaktion mellem lermineralerne og kalken, og sammenbindingen øges hermed. Der opnås også en forbedring af trykstyrke og overfladefasthed, dog virker bindingen knap så stabil som cementbindingen. Lige som for cementen er den nødvendige mængde kalk afhængig af lerjordens sammensætning. Oftest vil det dreje sig om 6 - 12 % kalk.

Andre tilsætningsstoffer som syrer, polymerer og bitumenforbindelser kan bruges for at forbedre sammenbindingen og tætheden af det færdige materiale.

En anden mulighed for at ændre byggematerialets egenskaber er tilsætning af fibre. Den primære virkning af disse er en forbedring af trækstyrken, dvs. resistensen overfor svindpåvirkninger øges. I langt de fleste tilfælde vil det være halmfibre som tilsættes lerjorden. Da halm er et meget let materiale vil det resulterende produkt have en noget lavere densitet end den rene lerjord. Dette betyder dels at trykstyrken for halmiblandet ler er mindre, men også at isoleringsevnen forøges. Mængden af halm vil ofte være omkring 20 - 50 kg/m^3. Da halm er et organisk materiale vil der være fare for råd i den periode, hvor lerjorden er våd. Denne rådudvikling stopper dog normalt når jorden tørrer ud i den færdige konstruktion.

4. Problemstillinger omkring lerjordsbyggeri

I det følgende gennemgås en række af de vigtigste problemstillinger i forbindelse med lerjord som byggemateriale. Det drejer sig om såvel holdningsmæssige og økonomiske som rent tekniske.

4.1 Holdningsmæssige og økonomiske aspekter

Ved genoptagelse af lerjordsbyggeri her i Danmark kan man forestille sig to principielt forskellige indgangsvinkler.

Enten kan man vælge at arbejde med en meget simpel og absolut økologisk korrekt teknologi, dvs. i alle forhold tage hensyn til minimering af ressourceforbrug og sikring af bortskaffelse og genbrug, når bygningen har opfyldt sit formål og ønskes nedrevet. Denne løsning indebærer meget manuelt arbejde (f.eks. pisé-stampning), og samtidig er det afgørende, at de materialer der vælges er rene naturmaterialer, som ikke må blandes og forarbejdes for meget. Principielt set skal det være muligt enten at genbruge alt eller i hvert fald føre materialerne tilbage til naturen uden skadevirkninger. Tilsætning af cement eller andre kunstige tilsætningsstoffer som skaber en blivende forandring vil derfor ikke kunne tillades.

Dette byggeprincip vil sandsynligvis være meget arbejdskraftkrævende og dermed uøkonomisk ved projekter, hvor der skal betales arbejdsløn, som jo i vores samfund udgør en stor del af byggeudgifterne. For selvbyggere, som f.eks. den tidligere omtalte produktionsskole Saltoftevænge, vil økonomien dermod være fornuftig, idet råmaterialerne ved den simple byggemetode er næsten gratis. Et andet aspekt der skal erindres ved vurdering af de meget enkle teknikker er, at nutidens komfortkrav er noget anderledes end de forventninger man havde i tidligere tider. De gamle lerjordshuse, der findes her i landet, er set med vore dages øjne både utætte og kolde. Det vil være nødvendigt at tilpasse byggeteknikken til nutidens krav, også for at sikre et så lavt energiforbrug som muligt.

Den anden indgangsvinkel er at lade materialet indgå direkte i det moderne byggeri på lige fod med andre materialer. Der vil så blive tale om mere maskin- og transportkrævende byggeteknikker, hvor der sker en større grad af forarbejdning. Kvaliteten af det færdige byggemateriale vil følgelig blive højere, og det vil være lettere at opfylde diverse styrke-, holdbarheds- og komfortkrav. Det økologiske aspekt, som udgør hovedmotivationen for at bruge lerjord som byggemateriale, vil dog træde en del i baggrunden. Et eksempel på en sådan "industrialiseret" anvendelse af lerjord kunne være brug af ubrændte lersten til formål, hvor deres egenskaber er tilfredsstillende. Stenene kunne stadig leveres fra teglværkerne, som så blot skulle sørge for blanding og udstøbning, men kunne spare energi til brændingen.

Ved konkrete projekter vil man givetvis oftest vælge en konstruktionsmetode, der er et kompromis mellem det fuldt økologisk korrekte og det mere økonomisk og kvalitetsmæssigt realistiske. Spørgsmålet er så, om lerjorden som produkt er konkurrencedygtigt med hensyn til pris og kvalitet over for traditionelle byggematerialer som beton og tegl. Konkurrenceevnen kan naturligvis reguleres fra myndighedernes side ved at yde tilskud til økologisk korrekt byggeri.

I forbindelse med mere omfattende lerjordsbyggeri vil imageproblemer givetvis udgøre en stor forhindring i starten. De fleste vil opfatte det som et meget primitivt og umoderne byggemateriale, der tillige er vådt, fedtet og vanskeligt håndtérbart. For at øge anseelsen er det nødvendigt at gennemføre konkrete projekter, hvor kvaliteten og holdbarheden af byggeriet kan eftervises, samtidig med at der udvikles byggeteknikker, som letter arbejdet. I den forbindelse må man hele tiden huske på det økologiske aspekt, dvs. sørge for at byggeteknik og materialevalg er enkelt og dermed økologisk bæredygtigt.

4.2 Tekniske problemstillinger

En forudsætning for at satse på lerjordsbyggeri er, at det overhovedet er teknisk muligt at opnå de ønskede egenskaber. Det hjælper ikke noget at viljen og pengene er til stede, hvis det viser sig umuligt at opfylde de krav man stiller til f.eks. styrke og holdbarhed.

Fugtforhold: Ved vurdering af egenskaberne er det vigtigt at gøre sig klart, at selve materialets økologiske fordelagtighed bunder i, at det er nedbrydeligt. En ubeskyttet lerjordskonstruktion "skal" således gå i stykker p.g.a. de fugt- og regnpåvirkninger, som materialet udsættes for ved et typisk dansk klima. I udlandet har man en del erfaringer med ubeskyttede holdbare lerjordshuse. Det skal dog understreges, at disse huse som regel har været placeret under klimaforhold, der er ret forskellige fra de danske (Sydfrankrig o.lign.). Der findes herhjemme enkelte lerjordshuse, som har stået i langt over hundrede år. Dette skal dog ikke tages som bevis for lerjordshuses holdbarhed. Der har givetvis også været en del huse med en meget kort levetid, som vi ikke ser nogen spor efter nu. Erfaringerne fra de bevarede huse bør dog naturligvis udnyttes.

Det er en udbredt erkendelse, at lerjordshuse udsat for fugtigt klima skal beskyttes mod opfugtning ved et passende konstruktionsvalg. Det er vigtigt, at der ikke kan trænge jordfugt op i væggene, d.v.s. de skal være beskyttede med et vandtæt lag (asfaltpap) oven på et godt og højt fundament. Dette kan udføres i beton eller eventuelt hårdt komprimeret cementstabiliseret lerjord. Endvidere bør ydervægge beskyttes med en overfladebehandling eller udvendig isolering. Et pudslag kan yde en rimelig beskyttelse, især hvis det kombineres med et stort udhæng, som beskytter mod slagregn. En anden mulighed er en udvendig træ- eller stålbeklædning som klimaskærm.

For indvendige vægge er det vigtigt at sikre sig, at de indvendige fugtbelastninger ikke er så store, at lerjorden bliver ustabil. Specielt i vådrum må man bruge egnede overfladebehandlinger, eller eventuelt vælge helt andre materialer.

Indvendige lerjordsvægge hævdes desuden at have en meget positiv indflydelse på indeklimaets stabilitet. Denne virkning skyldes lers evne til at optage, binde og afgive fugt. Buffervirkningen afhænger af både sorptionskurver og diffusionsmodstand. Dette forudsætter naturligvis, at der ikke bruges en diffusionstæt overfladebehandling

Styrker: Trykstyrken af en bærende lerjordsvæg skal naturligvis være tilstrækkelig høj til at kunne optage belastningerne både i byggeperioden og i brugsperioden. Da fugtindholdet i lerjorden kan variere (udtørring efter indbygning og evt. opfugtning i brugsperioden) er det nødvendigt at have kendskab til styrkens afhængighed af vandindholdet og alderen. Ligeledes er trækstyrken (kohæsionens) afhængighed af fugtindholdet interessant.

I forhold til andre moderne byggematerialer er lerjord er et meget uensartet materiale, idet der er både rent lokale forskelle (i selve udgravningen) og forskelle hen over landet af lerjordens kvalitet og sammensætning. Man må også påregne uregelmæssigheder i forbindelse med selve konstruktionen, især ved stampning af lervægge. Variationen i de styrker der opnås vil således være ganske betragtelig. En grundig prøvning må foretages for at fastlægge karakteristiske styrker for den valgte byggemetode ved hvert enkelt byggeri.

Svind/krybning: Ved udtørring af våd lerjord sker der et ganske betragteligt svind. Det er vigtigt, at der tages højde for dette, enten ved at sørge for at jorden har et tilstrækkeligt lavt vandindhold ved indbygningen, eller ved rent konstruktivt at minimere eventuelle revners skadelige virkning. Der kan indbygges revneanvisere, således at man på forhånd ved, hvor svindrevnen vil opstå. En reparation med eksempelvis kalkmørtel kan derefter let foretages. Store svindrevner, som opstår under indledende udtørring, vil dog ofte lukkes igen, når hele tværsnittet er udtørret. Lerjordens krybning, d.v.s. tidsafhængige deformationer under langtidsbelastning, er af interesse for konstruktionens funktion i brugsperioden.

Isolering: Materialet lerjord har i sig selv en dårlig varmeisoleringsevne, især når det komprimeres for at opnå høje styrker. Den nødvendige isolering kan etableres enten ved at øge porøsiteten ved iblanding af halm, keramiske letklinker o.lign., eller ved at etablere en udvendig isolering af f.eks. mineraluldsplader eller et mere økologisk korrekt materiale som papirgranulat. Ved opbygning af konstruktionerne må man være opmærksom på at der ikke må være mulighed for fugtophobning inde i væggene. Diffusionstætte membraner skal således helt udelades eller i hvert fald bruges med omtanke.

Frostbestandighed: Som tidligere beskrevet vil man normalt etablere en udvendig isolering for at beskytte lerjorden mod fugt og forøge varmeisoleringsevnen. Ved sådanne konstruktioner vil der ikke optræde frostpåvirkninger af lerjorden. Ved konstruktioner hvor lerjorden udsættes for frost, må man være opmærksom på, om der kan opstå revnedannelser og afskalninger.

Overfladeegenskaber: Ved pudsning af lerjordsvægge skal den anvendte mørtel kunne fungere sammen med lerjorden, dvs. den skal binde fast uden på et senere tidspunkt at skalle af p.g.a. manglende vedhæftning eller forskelle i temperaturbevægelser. Kalkmørtel er ganske velegnet, idet kalken reagerer kemisk med lerpartiklerne og dermed får en god vedhæftning. Cementmørtel binder derimod ikke særlig godt på lerjord.

Ved påføring af andre indvendige overfladebehandlinger er det ligeledes vigtigt at sikre sig, at disse fungerer godt sammen med lerjorden. En tæt plastmaling vil forhindre fugtudveksling mellem væg og indeluft. Herudover er en sådan maling ikke økologisk fordelagtig, idet den er meget svært nedbrydelig. Diffusionsåbne naturbelægninger som kalk eller limfarver vil være at foretrække. Disse overfladebehandlinger har dog den ulempe, at de dårligt tåler slid og vand.

Specielt for indre overflader er der andre egenskaber, som er af interesse. Det skal helst være muligt at bore huller i materialet i forbindelse med ophængning af billeder, hylder o.lign. Endvidere må overfladerne have en vis styrke. Materialet må ikke smuldre og gå i stykker ved lette slagpåvirkninger.

En række andre egenskaber må også overvejes før materialet kan "godkendes". Det gælder lydisolering, brandsikkerhed, varmeakkumuleringsevne m.v.

5. Konstruktionsudformninger

Som omtalt bliver der i Danmark arbejdet med moderne udformninger af lerjordskonstruktioner. I det følgende redegøres kort for de konstruktioner og metoder man har valgt i disse projekter.

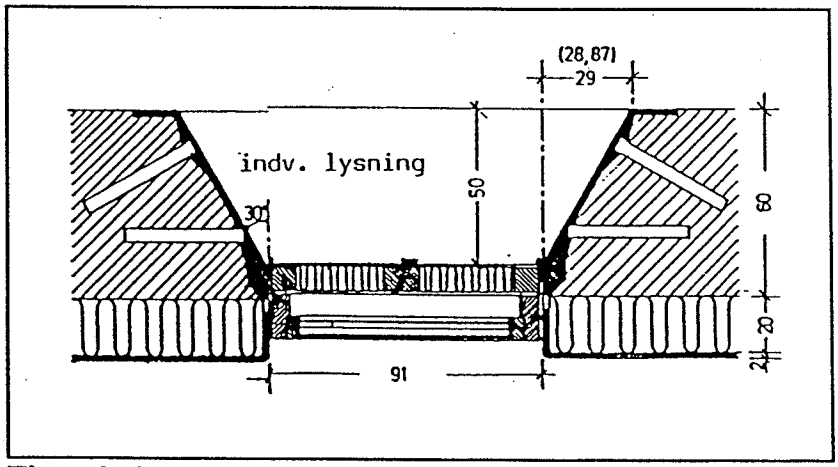
5.1 Saltoftevænge

Dette byggeri blev opført med moræneler blandet med stenmel i forhold 50/50. Væggene blev stampet op i forskalling med trykluftsstampere på en sokkel af lecablokke. Vægtykkelsen for de bærende ydervægge var 60 cm. Det oplyses dog, at senere styrkemålinger har vist, at man kunne have klaret sig med en vægtykkelse på 45 cm eller eventuelt have bygget i 2 etager i stedet for 1 som blev opført.

Tidsforbruget angives til 8 mandtimer pr m^3 for blanding, forskallingsarbejde og stampning, vel at mærke når alt kørte uden problemer. Da der var tale om et projekt, hvor man ikke havde erfaring med byggemetoden, var det reelle tidsforbrug dog 2 - 3 gange større [1].

Lerjordsvæggene isoleredes udvendigt med ca. 20 cm Rockwool pladebatts, som blev klæbet op med en blanding af murcem og stenmel. Yderst blev isoleringen beklædt med et pudslag for at yde beskyttelse mod det fugtige udeklima. Vinduer og døre blev fastholdt i lysninger af fiberbeton, der også virkede som forskalling. På figur 3 ses et snit ved et vindue.

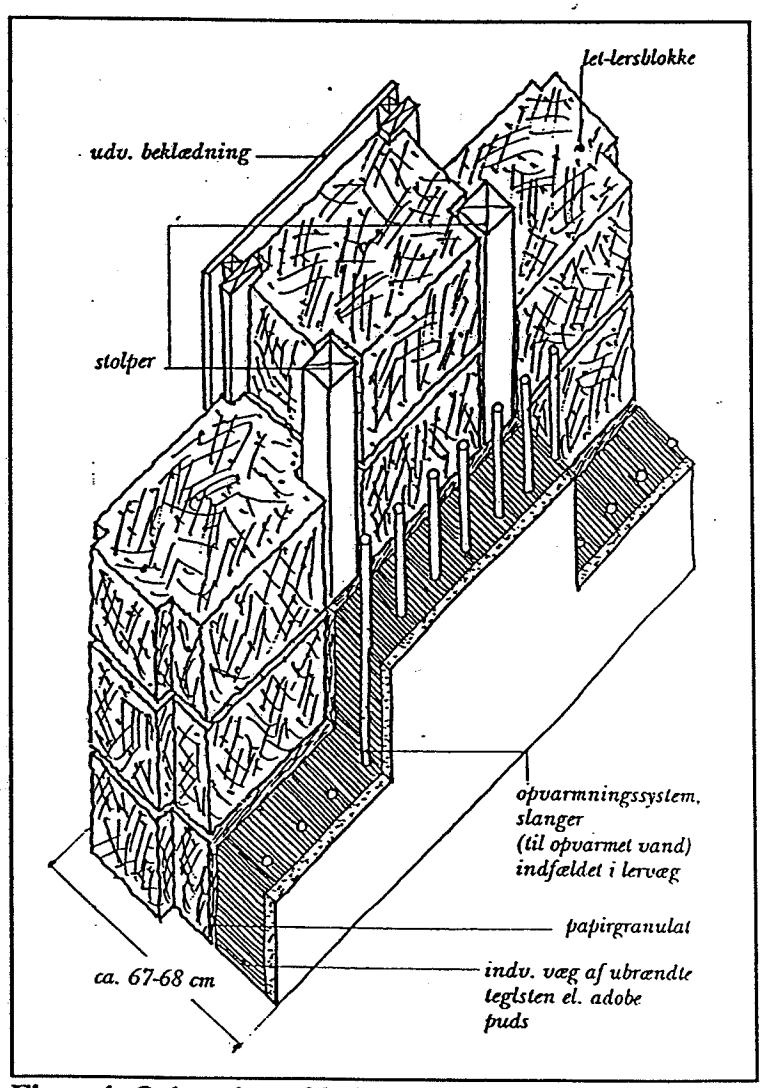
Huset er i øvrigt udført som et lavenergihus, dvs. med indvendige isolerede skodder, passiv og aktiv solvarme og varmegenvinding ved luftskifte.



Figur 3: Snit i stampet væg ved vindue. Endvidere ses lysning, udvendig isolering og puds. Saltoftevænge [1].

5.2 Halmlersprojekter

En gruppe med bl.a. arkitekterne Kirsten Birch, Anna Marie Petersen og professor Sverre Fehn har arbejdet med forskellige projekter med halmlersblokke. Disse blokke, som har gode varmeisoleringsegenskaber, bruges som udfyldning i et bærende træskelet. Udvendigt kan blokkene pudses eller dækkes med en træbeklædning. Indvendigt opføres en tung væg i pisé eller ubrændte teglsten, evt. med et indlagt varmesystem, som udnytter lerjordens gode varmeakkumulerende egenskaber. Et eksempel på en sådan vægopbygning vises på figur 4 [3].



Figur 4: Opbygning af letlersvæg. Fra konkurrenceprojektet "Naturhuset" af Kirsten Birch m.fl. [3].

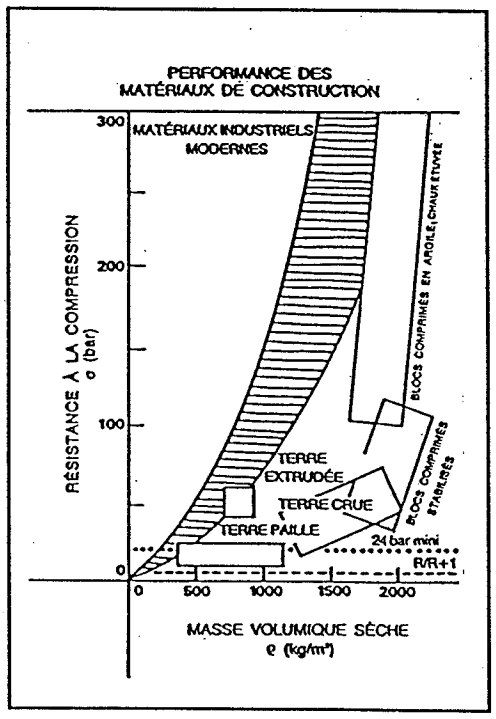
5.3 Andelssamfundet i Århus

Her er der blevet opført et forsøgshus i stampet lerjord. Udvendigt er væggene beklædt med en papirgranulatisolering, vindpap og kalkpuds eller træbeklædning [5].

6. Materialeegenskaber

Hovedparten af den viden man har om lerjordskonstruktioner bygger på erfaringer, dvs. man ved, at med en given lerjord og en gennemprøvet konstruktionsmetode fås et holdbart bygværk. Det meste af den forskning der er udført, bl.a. af CRATerre [2], har drejet sig om materialets egenskaber før indbygningen, samt forskellige byggemetoder og specielle konstruktionsdetaljer. Der er lavet få undersøgelser af det færdige materiales egenskaber i den endelige konstruktion. I det følgende redegøres for de materialegenskaber det har været muligt at finde hos CRATerre (bilag 1) og fra de danske forsøgsprojekter. Materialeværdierne sammenlignes med data for andre traditionelle byggematerialer. Det skal nævnes, at dr. Gernot Minke fra universitetet i Kassel efter en forespørgsel i forbindelse med skrivningen af denne rapport har oplyst, at man herfra udgiver en bog i slutningen af 1993, hvor adskillige materialeværdier, fundet ved en stor forsøgsrække, vil blive offentliggjort.

Styrker: De styrker man kan opnå med lerjord er naturligvis afhængige af den valgte konstruktionsmetode. På figur 5 vises en oversigt over sammenhængen mellem densitet og trykstyrke for forskellige typer lerjord sammenlignet med moderne industrielt fremstillede materialer.



Figur 5: Sammenhæng mellem tørdensitet og trykstyrke (1 bar = 0.1 MPa) for moderne industrielt fremstillede materialer (vandret skraveret) og forskellige former for lerjord. Taget fra [2].

"Ordbog": Terre Paille = Halmler, Terre Crue = Ren lerjord uden tilsætninger, Argile = Ler, Chaux etuvee = Varmehærdnet.

Det fremgår af figuren, at de styrker man kan opnå med lerjord er lavere end de værdier det er muligt at opnå med andre moderne byggematerialer. Samtidig fremgår det dog, at det er muligt at opnå ganske høje styrker ved at komprimere, stabilisere med kalk eller cement og eventuelt opvarme.

I bilag 1 findes bl.a. en oversigt over mekaniske data taget fra CRATerre [2]. Det fremgår, at trykstyrken i tør tilstand efter 28 døgn er omkr. 2 MPa for ren lerjord både som pisé, adobe og komprimerede blokke. Ved stabilisering med bitumen eller cement er det muligt at opnå styrker op mod 5 MPa. I fugtig tilstand (efter nedsænkning i vand i 24 timer) falder styrkerne for den rene lerjord betragteligt til omkring 0 - 0.5 MPa, mens den stabiliserede lerjord holder styrken bedre. Styrken af lerjorden angives til at stige med 40 % efter et år og 50 % efter 2 år p.g.a. den fremskridende udtørring.

Jean Paul Holst, der er konsulent for arkitekt Kirsten Birch, har i Holland bl.a. arbejdet med ubrændte lersten fremstillet på et teglværk [4]. Disse lersten har en trykstyrke på 4 MPa.

I forbindelse med opførelse af et prøvehus for andelsamfundet Hjortshøj i Århus blev der lavet trykprøvninger med forskellige former for lerjord [6]. Ved prøvning af håndstampede cylindre fik man trykstyrker på 2.6 - 3.4 MPa, håndpressede lersten havde styrker på 1.6 - 1.9 MPa, mens maskinpressede lersten opnåede styrker på 2.8 - 4.3 MPa.

Ungdomsboligerne Saltoftevænge i Vestsjælland [1] blev opført med en blanding af moræneler og stenmel med en trykstyrke på omkring 3 MPa. Andre trykprøver, hvor moræneleret var blandet med grus gav trykstyrker på 2.3 og 2.8 MPa.

I 1948 blev der på Danmarks tekniske Højskole lavet en meget omfattende forsøgsrække med stampet lerjord ved civ.ing. H. Ewaldsen [7]. Der blev udført i alt 718 trykforsøg, og man nåede frem til at begyndelsesstyrken (nødvendig for at kunne fjerne forskallingen) lå på 0.07 - 0.25 MPa, mens styrkerne efter udtørring nåede op på mellem 1 og 3 MPa. Der blev også udført forsøg med lerjord stabiliseret med 6 og 10 % cement, og man nåede her frem til styrker på 4.5 - 7.5 MPa.

Som et forsøg på at fremstille et stærkt og stabilt materiale, der egenskabsmæssigt kunne konkurrere med tegl, lavede prof. Torben C. Hansen og dr. Thomas Ringsholt midt i 70'erne forsøg med pressede sten af kalkstabiliseret laterit, en jordart med højt indhold af lermineralet kaolinit, som findes mange steder i u-landene [8]. Stenene blev komprimeret ved højt tryk og hærdnet ved 97 °C, 95 % RF. Der blev opnået styrker op til 30 MPa. Forsøgsresultaterne er refereret som nr. 3 i bilag 1.

Alt i alt kan det konkluderes, at trykstyrken af ren lerjord ikke kan blive højere end 2 - 4 MPa. Ved stabilisering er det muligt at opnå lidt højere styrker, mens der maksimalt kan opnås styrker op imod 30 MPa ved stabilisering, højt tryk og varmepåvirkning.

Trækstyrken for ren lerjord (pisé og komprimerede blokke) er iflg. bilag 1 omkring 0.5 - 1.0 MPa. Andre statiske materialeværdier kan findes i bilag 1.

Ved sammenligning med andre byggematerialer fremgår det ikke overraskende, at lerjorden har noget lavere styrker. Alm. konstruktionsbeton har trykstyrker af størrelsesordenen 15 - 60 MPa og trækstyrker på 1 - 5 MPa. Teglsten har afhængig af brændingsgraden trykstyrker omkring 20 - 50 MPa og trækstyrker på 2 - 8 MPa. Lerjordens styrkeegenskaber minder meget om gasbetons, som har trykstyrker på 1 - 6 MPa og trækstyrker på 0.5 - 2 MPa. Densiteten for gasbeton er dog kun omkring 1/4 af densiten for den komprimerede lerjord.

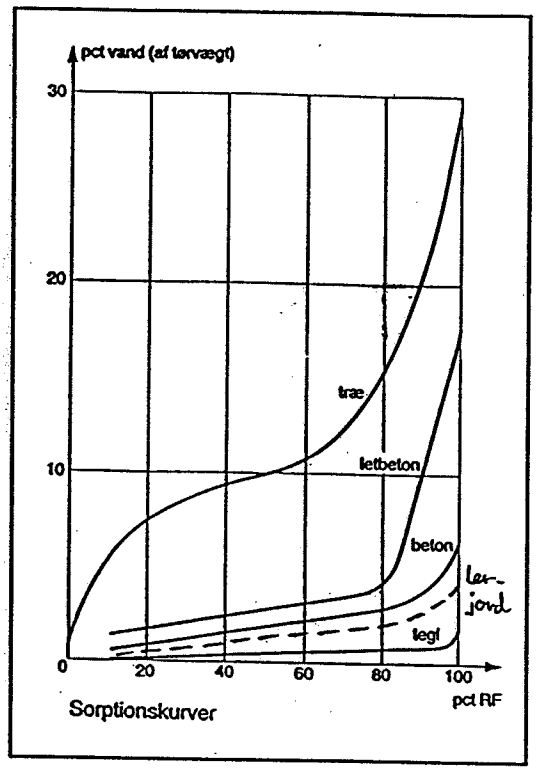
Ved anvendelse af ustabiliseret lerjord til bærende konstruktioner er det p.g.a. den lave styrke ikke tilrådeligt at bygge højere end 1-2 etager. Større højder vil kræve ganske store dimensioner. Endvidere er det vigtigt at være opmærksom på det markante styrketab, som lerjorden undergår ved opfugtning.

Deformationsforhold: Elasticitetsmodulen (stivheden) af den stabiliserede lerjord angives i bilag 1 til 0.7 - 7 GPa. Betons stivhed ligger på 20 - 40 GPa, tegls på 1 - 30 GPa og gasbetons omkring 1 - 3 GPa. Det har ikke været muligt at finde krybningsdata for lerjord.

Fugtforhold: Lerjordens evne til at optage og afgive vand har betydning for både styrke og indeklimaegenskaber. Ved placering i en given konstruktion vil jordens vandindhold tilpasse sig den relative luftfugtighed i det omgivende klima. Størrelsen af vandindholdet bestemmes af lerjordens ligevægtsvandindhold ved den aktuelle RF-værdi, mens den hastighed hvormed jorden optager/afgiver vand afhænger af dampdiffusionsmodstanden for materialet.

På bilag 2 vises en sorptionskurve for opgravet lerjord målt på Laboratoriet for Bygningsmaterialer. Det fremgår, at der ved normalt indeklima, dvs. omkring 50 % RF, bindes 0.9 vægt-% vand i jorden, mens der ved meget fugtigt klima (95 % RF) kan bindes 2.2 %. Det kan supplerende nævnes, at en ubrændt teglsten placeret ved ca. 50 % RF havde et ligevægtsvandindhold på 1.1 % (eget forsøg i forbindelse med skrivningen af denne rapport). I forbindelse med Ewaldsens undersøgelser i 1948 [7], blev der foretaget målinger af vandindhold i prøver udtaget fra gamle lerjordshuse. Der blev konstateret faldende vandindhold med alderen, idet et 9 mdr. gammelt hus havde et vandindhold på 3.5 vol-%, et 25-årigt hus havde 1.3 % mens to 100-årige huse havde vandindhold på 1 %. Omregnet til vægt-% svarer dette til henholdsvis 1.8 %, 0.7 % og 0.5 %, dvs. tal af en størrelsesorden som passer med den viste sorptionskurve. Alle disse tal skal naturligvis kun tages som eksempler, idet sorptionskurven vil være meget afhængig af jordens sammensætning, primært lerindholdet.

Ved sammenligning med sorptionskurver for andre beslægtede materialer viser det sig, at lerjordens sorptionskurve ligger noget lavere end gasbetons med ligevægtsvandindhold, der er omkring 1/4 - 1/10 af gasbetonværdierne. Ved sammenligning med alm. beton fremgår det, at lerjords sorptionskurve også her ligger lavere. Typisk vil ligevægtsvandindholdet være 1/2 til 1/4 af beton-



Figur 6: Sorptionskurver for lerjord og andre byggematerialer.

værdierne. Ved sammenligning med sorptionskurver for brændt ler viser det sig derimod, at lerjorden kan optage betydeligt mere vand. Ligevægtsvandindholdet for tegl ligger på 1/3 til 1/5 af lerjordværdierne. Beliggenheden af sorptionskurverne er illustreret på figur 6.

Det har desværre ikke været muligt at finde anvendelige transportkoefficienter for vanddampdiffusion i lerjord.

Svind (dimensionsformindskelse p.g.a. vandafgivelse): Afhængigt af hvilke lermineraler der er dominerende kan rent ler svinde helt op til 5 - 20 % ved udtørring. Lerjord vil dog svinde betydeligt mindre, idet grus og sand er inaktivt m.h.t svind og tillige virker armerende for lerjorden. Vandindholdet ved opførelsen, som afhænger af hvilken byggemetode der vælges, er af afgørende betydning. Hvis vandindholdet er højere end det vandindhold der svarer til lerjordens svindgrænse, dvs. det punkt hvor de enkelte lerpartikler kommer i direkte overfladekontakt uden vandfilm imellem, vil videre udtørring give anledning til svind og eventuel revnedannelse. Udtørringssvindet for komprimerede blokke og adobe angives i bilag 1 til mellem 0.2 og 1 ‰, mens pisé har et lidt større svind mellem 1 og 2 ‰. De tidligere omtalte kalkstabiliserede pressede lateritsten havde et udtørringssvind mellem 0.3 og 0.7 ‰.

Andelssamfundet i Århus oplyser, at man efter indledende revneproblemer, siden helt har kunnet undgå svindrevner ved at styre vandindholdet ved stampning meget nøje (7 - 7.5 %) [5].

Svindet ved udtørring af våd beton og gasbeton ligger omkring 0.2 - 0.7 ‰, mens tegl har et meget lille svind på under 0.1 ‰. Træ har derimod som bekendt udtørringssvind, der i tværretningen kan være op til flere procent.

Varmeisoleringsevne: Som for alle andre silikatmaterialer gælder det, at varmeisoleringsevnen for lerjord falder når komprimeringen og dermed densiteten øges. For pisé og pressede sten, der begge har densiteter omkring 2000 kg/m^3, er varmeledningstallet typisk 0.8 - 1.0 W/mK, mens adobe med lidt lavere densitet har en ledningsevne på 0.5 - 0.8 W/mK. Med iblanding af halm er det muligt at nå en væsentlig bedre isoleringsevne. For halmler med densitet 300 kg/m^3 opgiver Jean Paul Holst [4] en ledningsevne på 0.1 W/mK, mens der med en densitet på 1200 kg/m^3 fås en ledningsevne på 0.5 W/mK.

Det følger af isoleringsevnens densitetsafhængighed, at beton med densitet 2100 - 2400 kg/m^3 isolerer lidt dårligere end lerjord (1500 - 2000 kg/m^3), som igen er en smule dårligere end tegl (1400 - 1800 kg/m^3). Halmlers isoleringsevne er sammenlignelig med gasbetons. Varmekapaciteten for lerjord svarer til beton og tegls varmekapacitet (akkumuleringsevne).

Frostbestandighed: Rene lersten som adobe eller pressede sten angives i bilag 1 til at være yderst frostfølsomme. Cementstabiliseret lerjord har lidt bedre egenskaber, men er stadig uegnet til at tåle frostpåvirkninger.

Andre egenskaber: I bilag 1 findes vurderinger af enkelte andre egenskaber, bl.a. lyddæmpning og brandmodstand, som begge må siges at være tilfredsstillende.

Sammenfatning: Sammenfattende kan det konkluderes, at lerjord uden tilsætninger mht. styrker har egenskaber der minder om gasbetons, mens der mht. fugtbinding og varmeisolering opnås egenskaber, der er af samme størrelsesorden som betons. Det er muligt at forbedre styrkeegenskaberne ved yderligere komprimering eller tilsætning af stabiliserende stoffer. Varmeisoleringsevnen kan tilsvarende forbedres ved at tilsætte lette tilslagsmaterialer, og dermed sænke densiteten. Som det er tilfældet for alle andre materialer, er en samtidig forbedring af alle egenskaber ikke mulig, men materialet giver mulighed for at finde et optimum af egenskaber.

7. Oplæg til videre arbejde

For at skabe baggrund for en bredere anvendelse og accept af byggematerialet lerjord vil det være nødvendigt at indhente yderligere viden om materialet. I det følgende gives forslag til undersøgelser og forsøg. Her benyttes igen den opdeling i holdningsmæssige/økonomiske og rent tekniske problemstillinger, som blev introduceret i afsnit 4.

7.1 Holdningsmæssige og økonomiske undersøgelser

Beslutningstageres velvilje overfor lerjordsprojekter og materialets økonomiske konkurrenceevne kan belyses via følgende undersøgelser:

- Forespørgsler hos byggemyndigheder om hvordan man vil forholde sig til lerjordsbyggeri. Undersøgelse af eventuelle formelle forhindringer (normer og regler).

- Undersøgelse af bevilgende myndigheder og organisationers velvilje. Er der bred politisk opbakning bag økologisk byggeri, eller er det eksempelvis kun Miljøstyrelsen der er positivt indstillet? Hvordan stiller realkreditinstitutioner sig over for private, der ønsker at låne penge til lerjordsbyggeri?

- De forskellige lerjordsbyggemetoder sammenlignes mht. tidsforbrug, arbejdsløn og materialeudgifter. Endvidere sammenlignes med traditionelt byggeri. Kan materialet konkurrere på egne præmisser, eller er det nødvendigt at give økonomiske tilskud for at fremme lerjordsbyggeri. Her bør anlægges både privatøkonomisk og samfundsøkonomisk synsvinkel.

- Sammenligning af priser for forskellige typer ydervægge opført så de opfylder ganske bestemte krav mht. styrke, isolering, tæthed. Eksempelvis tung traditionel væg (beton, isolering, skalmur), let væg (træ, isolering), stampet lervæg med udvendig isolering, opmurede ubrændte sten med halmlersisolering.

- Miljømæssig sammenligning af ressourceforbrug og emissioner for lerjordsbyggeri og traditionelt byggeri.

7.2 Tekniske undersøgelser

For at få bedre kendskab til de materialeegenskaber, der er omtalt i det foregående afsnit, kan følgende igangsættes:

- Grundigt litteraturstudie, primært i den udenlandske litteratur, hvor der givetvis findes mange oplysninger, som det ikke har været muligt at fremskaffe til dette indledende projekt. Bearbejdning til danske forhold. Opsøgning af internationale kontakter.

- Indsamling af oplysninger om de danske tertiære jordlags indhold af ler. Hvilke lermineraler er dominerende, og hvordan er deres egenskaber som byggemateriale. Lermineralernes vandbindingsevne kan klarlægges ved termogravimetrisk analyse. Geologer og geoteknikere vil givetvis kunne være til stor hjælp.

- Vurdering af forskellige prøvemetoders egnethed for danske forhold.

- Måling af styrke- og deformationsegenskaber for forskellige blandinger fremstillet under laboratorieforhold. Afhængigheden af sammensætning (kornfordeling, lerindhold) og densitet (komprimeringsgrad) belyses. Endvidere undersøges egenskabernes afhængighed af vandindholdet og alderen. Disse tal sammenlignes med prøvninger af kerner udboret fra gamle huse, hvor lerjorden har haft lejlighed til at indstille sig i fugtligevægt med det omgivende klima.

- Undersøgelse af cement, kalk, bitumen og andre stabiliserende tilsætningers betydning for trykstyrken, og dens afhængighed af de faktorer, der er beskrevet i det foregående punkt.

- Afklaring af langtidsegenskaber som krybning, udtørring og svind. Her kan målinger på gamle lerhuse inddrages.

- Måling af fugttransportparametre for lerjord med eller uden stabilisering og eventuelle vandtætnende tilsætningsstoffer. Der foretages kopforsøg og kapillarsugningsforsøg. Endvidere skal materialets fugtbindingsevne undersøges, dvs. sorptionskurver bestemmes. Disse egenskaber er afgørende ved vurdering af en gunstig virkning for indeklimaet.

- Undersøgelse af lerjordens modstandsdygtighed overfor frostpåvirkninger. Ved visse konstruktionsudformninger, hvor lerjorden befinder sig på den kolde side af isoleringen, er det afgørende at materialet er frostbestandigt. Det vil f.eks. være tilfældet ved halmlerskonstruktioner, hvor den yderste del af tværsnittet vil kunne få frost.

- Eventuelt kunne lerjordens modstandsdygtighed overfor skiftende klimapåvirkninger som slagregn med efterfølgende soludtørring undersøges. Dette vil dog ikke være videre relevant, idet det som tidligere nævnt er en udbredt erkendelse, at lerjordskonstruktioner ikke kan tåle direkte påvirkning fra dansk udeklima.

- Undersøgelse af overfladeegenskaber. Hvilke mørteltyper har den bedste vedhæftning? Forskellige malingers tæthed undersøges.

8. Referencer

[1] Østergård, Steen og Flemming: *Lerjord som byggemateriale*, Tegnestuen Vindrosen for Byggeriets Udviklingsråd, 1992.
Heri findes bl.a. en mere omfattende litteraturliste, samt adresser på internationale kontakter.
Tegnestuen Vindrosen: Feldskovvej 5, 4180 Sorø, tlf. 53 63 39 30.

[2] Huoben, Hugo og Guillaud, Hubert: *Traité de Costruction en Terre*, CRATerre, Editions Parantheses, 1989.

[3] Forskelligt materiale om letlersprojekter modtaget fra Kirsten Birch, Borggade 11, 2.th., 8000 Aarhus C. Tlf. 86 12 64 03.

[4] Notat om letler af Jean Paul Holst, medlem af CRATerre. Modtaget fra Kirsten Birch.

[5] Personlig kommunikation med Kaj Hansen fra Andelssamfundet Hjortshøj. Tlf. 86 19 49 99.
Økotech: Lollandsgade 52, 8000 Aarhus C, tlf. 86 19 86 41.

[6] Duncan, James Harvie: *Lerjord*, rapport fra individuelt kursus ved Laboratoriet for Bygningsmaterialer, 1993.

[7] Ewaldsen, H.: *Forsøg med jordstampede mure*, Arkitekten, s. 126, 1949.

[8] Ringsholt T. og Hansen, T.C.: *Lateritic Soil as a Raw Material for Building Blocks*, American Ceramic Society Bulletin, **57** (5), 1978.

Bilag 1:
Materialedata taget fra ref. [2].

702 Caractéristiques mécaniques

CARACTÉRISTIQUES	S	U	CLASSES A	B	C	D
RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SEC À 28 JOURS * (+40% après 1 an, +50% après 2 ans)	σ 28	bar	> 120	50 120	20 50	ENVIR. 20
RÉSISTANCE À LA COMPRESSION HUMIDE À 28 JOURS (24 h dans l'eau)	σ 28	bar	> 20	10 20	5 10	0 5
RÉSISTANCE À LA TRACTION SEC À 28 JOURS (essai brésilien)	τ 28	bar	> 20	10 20	5 10	0 5
RÉSISTANCE À LA TRACTION SEC À 28 JOURS (sur barette)	τ 28	bar	> 20	10 20	5 10	0 5
RÉSISTANCE À LA FLEXION SEC À 28 JOURS	τ 28	bar	> 20	10 20	5 10	ENVIR. 5
RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT SEC À 28 JOURS	τ 28	bar	> 20	10 20	5 10	ENVIR. 5
COEFFICIENT DE POISSON	μ		0 0,15	0,15 0,35	0,35 0,50	> 0,5
MODULE DE YOUNG	E	bar		7.000 70.000		
MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	P	Kg/m³	> 2.200	1.700 2.200	1.200 1.700	< 1.200
UNIFORMITÉ DES DIMENSIONS (produit fini individuel)			EXCEL.	BON	MOYEN	FAIBLE

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière. Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art.

1) Comprimé à 20 bars.
2) Stabilisé à 8 % ciment
   Comprimé à 20-40 bars.
3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux
   Comprimé à 300 bars
   Etuvé à 95 % H.R. sous pression à 90° C.
4) Coup de sable.
5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume.
6) Comprimé à 90-95 % Proctor Standard.
7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment.
8) Produits creux de 1 100 kg/m³
   Stabilisé au ciment 15 % min.
9) Double face sur clale de branches.
10) 600 à 800 kg/m³.
11) Indiquer valeurs dans votre région.
12) Indiquer valeurs dans votre région.

I BLOCS COMPRIMÉS			II ADOBE		III PISÉ		IV BRIQUES EXTRUDÉES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
D *	C *	A *	D	C	D *	C *	B				
D	A	A	D		D	A	A				
	B					B					
C					C						
C					C						
D					D						
	B					B					
	B			B		B					
B	B	A	C	C	B	B	D				
B	B	A	C	C	D	D	A				

703 Caractéristiques statiques

CARACTÉRISTIQUES	S	U	CLASSES A	B	C	D
RÉSISTANCE À L'IMPACT TANGENTIEL D'UN CORPS MOU (hauteur de départ d'un sac de sable de 27 kg suspendu à la verticale du mur)		m	> 3	2 3	1 2	< 1
RÉSISTANCE À L'ÉCRASEMENT PAR CHARGE EXCENTRIQUE (coefficient de réduction pour murs avec élancement de 7 à 8 - épaisseur de 30 cm)	R		> 0,50	0,40 0,50	0,30 0,40	0,20 0,30
RÉSISTANCE À LA FLEXION (pression horizontale uniforme - vent)		bar	5.10^{-3} 6.10^{-3}	4.10^{-3} 5.10^{-3}	3.10^{-3} 4.10^{-3}	2.10^{-3} 3.10^{-3}
RÉSISTANCE À UNE POUSSÉE HORIZONTALE LOCALISÉE (pression par un disque de 2,5 cm de diamètre - murs h = 2,60 m, L = 1,20 m, l = 30 cm)		N	> 4.500			
COEFFICIENT DE DILATATION THERMIQUE		mm/m°C	< 0,010	0,010 0,015		

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière. Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art.

1) Comprimé à 20 bars.
2) Stabilisé à 8 % ciment
   Comprimé à 20-40 bars.
3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux
   Comprimé à 300 bars
   Etuvé à 95 % H.R. sous pression à 90° C.
4) Coup de sable.
5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume.
6) Comprimé à 90-95 % Proctor Standard.
7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment.
8) Produits creux de 1 100 kg/m³
   Stabilisé au ciment 15 % min.
9) Double face sur clale de branches.
10) 600 à 800 kg/m³.
11) Indiquer valeurs dans votre région.
12) Indiquer valeurs dans votre région.

I BLOCS COMPRIMÉS			II ADOBE		III PISÉ		IV BRIQUES EXTRUDÉES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
	B		B	C	B	C					
	A	A	B	D	C	A					
	A		D	C	D	A					
	A		A	A	A	A					
						B					

Caractéristiques hydriques

CARACTÉRISTIQUES	S	U	CLASSES A	B	C	D
GONFLEMENT (Immersion jusqu'à saturation)		mm/m	0 0,5	0,5 1	1 2	> 2
RETRAIT (séchage artificiel jusqu'à stabilisation)		mm/m	0 1	1 2	2 5	> 5
RETRAIT DE SÉCHAGE		mm/m	< 0,2	0,2 1	1 2	> 1
PERMÉABILITÉ		mm/sec		1×10^{-6}		
ABSORPTION D'EAU PAR LA FACE À ENDUIRE		% (POIDS)	0 5	5 10	10 20	> 20
ABSORPTION TOTALE		Kg/m²	0 7,5	5 10	10 20	> 20
SUSCEPTIBILITÉ À LA GÉLIVITÉ			PAS	PEU	SENSI-BLE	TRÈS SENS.
SUSCEPTIBILITÉ AUX EFFLORESCENCES			TRÈS PEU	PEU	SENSI-BLE	TRÈS SENS.
DURABILITÉ SOUS EXPOSITION AUX INTEMPÉRIES (simple mur sans protection)			EXCEL-LENT	BON	MOYEN	FAIBLE

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière. Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art.

1) Comprimé à 20 bars.
2) Stabilisé à 8 % ciment
   Comprimé à 20-40 bars.
3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux
   Comprimé à 300 bars
   Etuvé à 95 % H.R. sous pression à 90° C.
4) Coup de sable.
5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume.
6) Comprimé à 90-95 % Proctor Standard.
7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment.
8) Produits creux de 1 100 kg/m³
   Stabilisé au ciment 15 % min.
9) Double face sur claie de branches.
10) 600 à 800 kg/m³.
11) Indiquer valeurs dans votre région.
12) Indiquer valeurs dans votre région.

I BLOCS COMPRIMÉS			II ADOBE		III PISÉ		IV BRIQUES EXTRUDÉES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
							C/D				
							C				
B	B		B	B	C	C					
	B					B					
				A			A				
	C	A				C	C				
D	B	A	D	B	C	B	A/B				
B	B	A			B	B					
D	B	A	D	B	C	A	B				

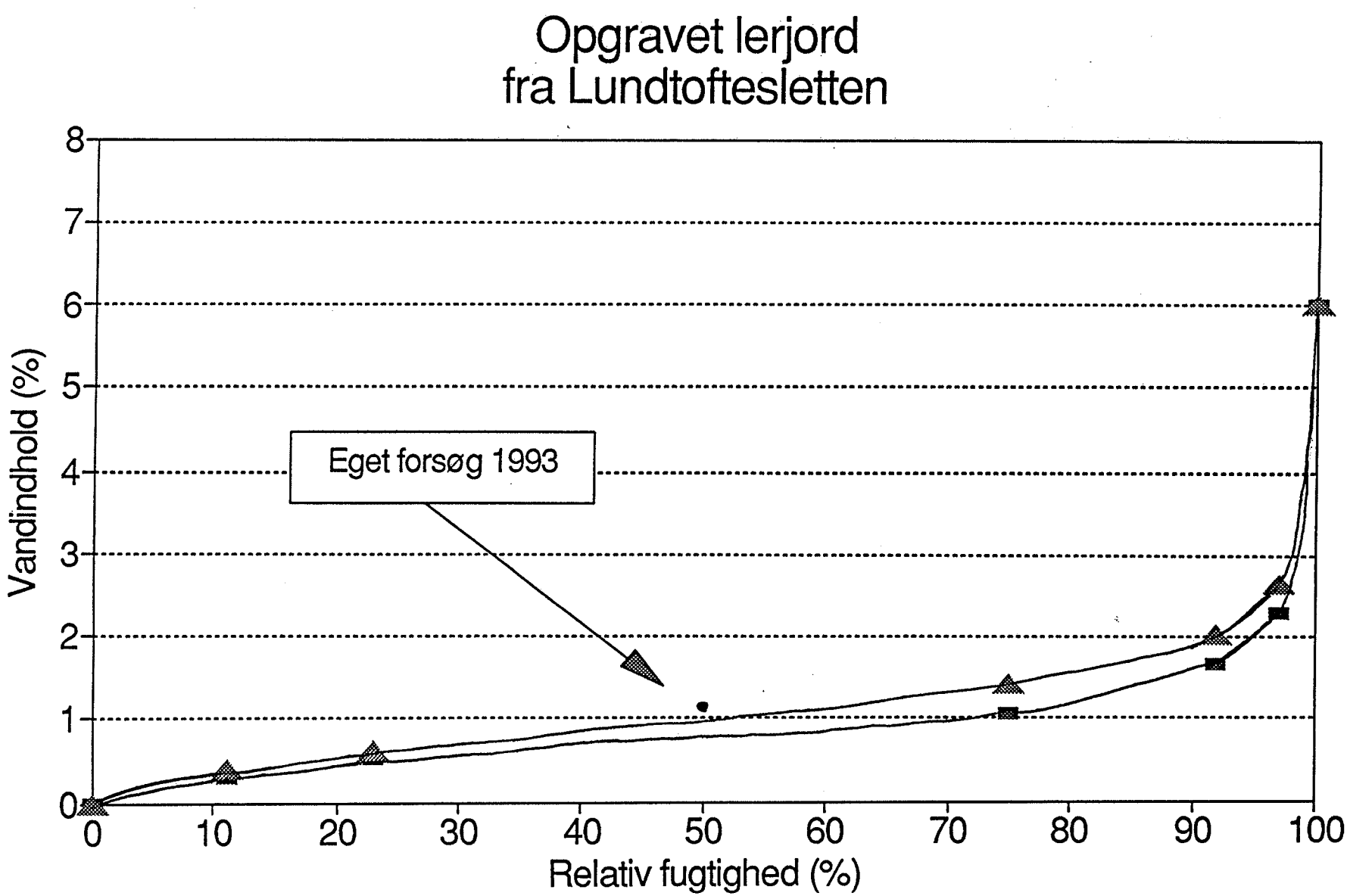
705 Caractéristiques physiques

CARACTÉRISTIQUES	S	U	CLASSES A	B	C	D
CHALEUR SPÉCIFIQUE (dépend fortement de la densité apparente - se référer à cette rubrique)	c	KJ/Kg	1,00 0,85	ENVIR. 0,85	0,85 0,85	< 0,85
COEFFICIENT DE CONDUCTION (dépend fortement de la densité apparente - se référer à cette rubrique)	λ	W/m°C	0,23 0,46	0,46 0,81	0,81 0,93	0,93 1,04
COEFFICIENT D'AMORTISSEMENT (mur de 40 cm)	m	%	< 5	5 10	10 30	> 30
COEFFICIENT DE DÉPHASAGE (mur de 40 cm)	d	h	> 12	10 12	5 10	< 5
COEFFICIENT D'AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE (mur de 40 cm à 500 Hz)		dB	> 60	50	40	30
COEFFICIENT D'AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE (mur de 20 cm à 500 Hz)		dB		60	50	40
RÉSISTANCE AU FEU			EXCEL.	BON	MOYEN	FAIBLE
INFLAMMABILITÉ			TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT
VITESSE DE PROPAGATION DES FLAMMES			TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière. Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art.

1) Comprimé à 20 bars.
2) Stabilisé à 8 % ciment
   Comprimé à 20-40 bars.
3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux
   Comprimé à 300 bars
   Etuvé à 95 % H.R. sous pression à 90° C.
4) Coup de sable.
5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume.
6) Comprimé à 90-95 % Proctor Standard.
7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment.
8) Produits creux de 1 100 kg/m³
   Stabilisé au ciment 15 % min.
9) Double face sur claie de branches.
10) 600 à 800 kg/m³.
11) Indiquer valeurs dans votre région.
12) Indiquer valeurs dans votre région.

I BLOCS COMPRIMÉS			II ADOBE		III PISÉ		IV BRIQUES EXTRUDÉES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
B	C		B	B	B	C					
C	C	D	B	B	C	C					
B	B	B			B	B					
B	B	B			B	B					
B	B	B			B	B					
C	C	C			C	C					
B	B	B	B		B	B					



Bilag 2: Sorptionskurve for lerjord