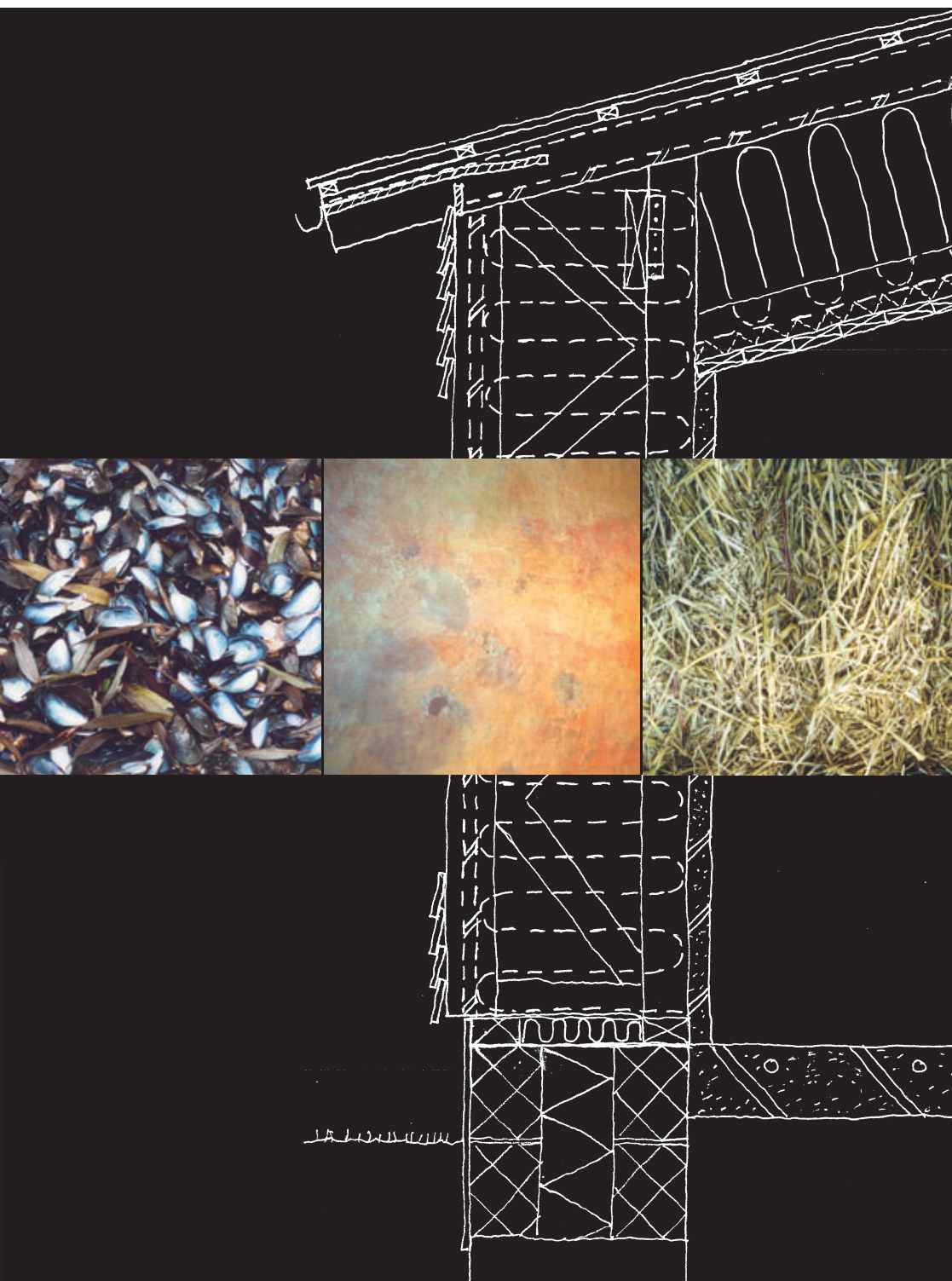


Halmhuse

Udformning og materialeegenskaber



Statens Byggeforskningsinstitut
Danish Building and Urban Research

Halmhuse

Udformning og materialeegenskaber

Jørgen Munch-Andersen
Birte Møller Andersen

Titel	Halmhuse
Undertitel	Udformning og materialeegenskaber
Serietitel	By og Byg Resultater 033
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2004
Forfattere	Jørgen Munch-Andersen, Birte Møller Andersen
Sprog	Dansk
Sidetæl	68
Litteratur-henvisninger	Side 66-68
Emneord	Halmhuse, konstruktionseksempler, dagslysforhold, materialeegenskaber, blåmuslinger, alternative isoleringsmaterialer, lerpuds
ISBN	87-563-1196-6
ISSN	1600-8049
Pris	Kr. 160,00 incl. 25 pct. moms
Tekstbehandling	Solveig Johansen
Tegninger	Birte Møller Andersen
Fotos	Birte Møller Andersen hvor intet andet er anført
Omslag	Birte Møller Andersen
Tryk	BookPartner, Nørhaven digital A/S
Udgiver	By og Byg Statens Byggeforskningsinstitut, P.O. Box 119, DK-2970 Hørsholm E-post by-og-byg@by-og-byg.dk www.by-og-byg.dk

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen: *By og Byg Resultater 033: Halmhuse. Udformning og materialeegenskaber. (2004)*

Indhold

Forord	5
Indledning	6
Behov for dispensationer fra Bygningsreglement for småhuse	6
Del 1: Udformning	7
Byggeteknik for halmhuse	8
Laster	13
Vandrette vindpåvirkninger	13
Konstruktioner	14
Længderetning	16
Tværretning	16
Dagslys og arkitektur	16
Halmhuse og dagslys	17
Varmeakkumulering	20
Fugtakumulering	20
Lufttæthed og dampspærre	21
Forebyggelse af svampeangreb	21
Bygningsdele	22
Tage	22
Varmeisolering	22
Brand	23
Tagdækning	24
Skivevirkning	24
Terrændæk	24
Vinduer	26
Fundamenter	27
Ydervægge	28
Varmeisolering	28
Brand	28
Fugt	29
Trækonstruktion	30
Konstruktionseksempler	31
Rundtømmerløsning	31
Skjult konstruktion	33
Rammekonstruktion	34
Del 2: Materialeegenskaber	37
Materialer	38
Ressourcer	38
Halm	38
Lerpuds	39
Muslingeskaller	40
Varmeisolering for halmvægge	41
Dansk resumé	41
Thermal properties of straw bale walls	42
Thermal conductivity	42
U-values from direct measurements and λ -values	43
Moisture content	44
Conclusion	44
Fugt og kondens i halmvægge	45
Dansk resumé	45
Moisture and condensation in straw bale walls	46
Stucco	46
Straw	48

Warm-cold box test	48
Water absorption	50
Praktiske erfaringer	51
Sætninger i halmvægge	52
Brandmæssige egenskaber af lerpudset halm	54
Brandbeskyttelsesevne	55
Brandmodstandsevne	55
Sammenfatning af danske forsøg	55
Østrigske forsøg	56
Brand i halmhuse	57
Lydisolering for halmvægge	58
Arbejdsmiljø ved byggeri med halmballer	59
Varmeledningsevne for muslingeskaller	61
Kapillær stighøjde for muslingeskaller	62
Bilag 1: Specifikation vedr. testemner	63
Fremgangsmåde ved opbygning af halmvægge	63
Halmballer (almindelige)	63
Bigballe (hestonballe)	64
Lerpuds	64
Blåmuslingeskaller	65
Litteratur	66

Forord

Interessen for at bygge med halmballer og muslingeskaller som isoleringsmaterialer suppleret med lerjord og træ som de øvrige primære byggematerialer har været stigende blandt især selvbyggere, men også blandt bygherrer der får bygget med professionel assistance. For at sikre at kvalitet, sundhed og sikkerhed i sådanne huse er tilfredsstillende, har det daværende Energiministerium via 'Det faglige udvalg vedrørende miljø- og arbejdsmiljøvenlig isolering' støttet et projekt med titlen 'Halmballer og muslingeskaller som isoleringsmaterialer'. Projektet er ledet af Statens Byggeforskningsinstitut.

En række institutter har bidraget til projektet med målinger og prøvninger. Det drejer sig om:

- Teknologisk Institut (varmeisolering)
- Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut (brandmæssige egenskaber)
- DELTA Lyd og Akustik (lydisolering)
- Arbejdsmiljøinstituttet (arbejdsmiljø)
- GEO (kapillarsugning)
- Statens Byggeforskningsinstitut (fugtmæssige egenskaber).

Målings- og prøvningsrapporterne fra de respektive institutter er tilgængelige på www.by-og-byg.dk. Se også litteratur.

Planlægningen af projektet er sket i samarbejde med en følgegruppe, der har haft følgende sammensætning:

Lars Keller
Arne Birkø
Tommy von Pein
Carsten Højer Pedersen
Poul H. Madsen
Anders Møller.

Arbejdet er løbende diskuteret med Landsforeningen for Økologisk Byggeri (LØB), Faggruppen for Ler og Halm, med henblik på at sikre bedst mulig overensstemmelse med den praktiske viden. Medlemmer herfra har også stået for opbygning af de fleste forsøgsemner.

Alle medvirkende takkes for velvillig medvirken til arbejdet.

By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut
Afdelingen for Byggeteknik og Design
Januar 2004

Jørgen Munch-Andersen
Konst. forskningschef

Indledning

Der er en stigende interesse for at anvende halm, blåmuslingeskaller og lerjord i byggeriet. I del 1 af denne rapport beskrives, hvordan huse opført med halmballer og lerjord som de primære byggematerialer kan udføres, så de lever op til kravene i Bygningsreglement for småhuse 1998 (By og boligministeriet, 1998) med senere tillæg. For at kunne opføre et halmhus er der dog fortsat behov for dispensationer, men de kan nu gives på et veldokumenteret grundlag.

Der er lagt vægt på, at de viste løsninger er byggeteknisk sunde, således at husene kan forventes at fungere uden speciel risiko for fx skimmelsvampedannelse og andre helbredsrisici forårsaget af fugt. Også de brandmæssige forhold er tillagt stor vægt.

I del 2 beskrives egenskaberne ved materialer og komponenter på baggrund af en række forsøgsresultater.

Pudsede halmvægges egenskaber er undersøgt med henblik på at skaffe viden om:

- Varmerisolering
- Fugttransport
- Brand
- Lydisolering
- Arbejdsmiljø.

For blåmuslingeskaller er følgende egenskaber undersøgt:

- Varmerisolering
- Kapillær stighøjde.

Behov for dispensationer fra Bygningsreglement for småhuse

U -værdier for konstruktioner isoleret med halmballer og muslingeskaller kan ikke bestemmes på basis af design λ -værdier i henhold til de gældende varmetabsregler, DS 418, 6. udgave (Dansk Standard, 2002). Målingerne, der er udført i projektet, er foretaget efter de samme standarder, som bruges til at bestemme designværdier med (λ_{10}), men da der ikke er en producent, der kan deklarere værdien, kræver isolering med disse materialer principielt dispensation. Statens Byggeforskningsinstitut vurderer, at konstruktionerne vist i det følgende opfylder bygningsreglementernes krav til U -værdier for vægge og paralleltag. For væggenes vedkommende opfyldes også kravet til lette vægge, selvom vægten normalt er over 100 kg/m^2 , og de derfor principielt kun skal opfylde kravet til tunge vægge.

Vedrørende brand er det ved forsøg vist, at kravene til konstruktioner i småhuse med isoleringsmaterialer, der ikke er mindst klasse A materialer, er opfyldt for de i viste løsninger for ydervægge figur 33 samt for tagkonstruktionen vist i figur 26c, først og fremmest fordi det er vist, at lerpuds på halm opfylder kravene til klasse 1 beklædning. Tagkonstruktionerne i figur 26 a og b opfylder kravene jf. Bygningsdele med celluloseuld og hørudl (Danø, Tofte & Ditlev, 2000).

Halmisolering kan derfor normalt anvendes i småhuse uden dispensationer i brandmæssig henseende.

De nødvendige dispensationer bør søges i forbindelse med ansøgning om byggetilladelse.

Del 1: Udformning

Byggeteknik for halmhuse

I dette kapitel beskrives en række forhold for huse bygget af primært halm-baller, lerpuds og muslingeskaller, der kræver særlig opmærksomhed for at sikre en god kvalitet af det færdige hus. For sædvanlige byggetekniske forhold, hvor halmhuse ikke adskiller sig fra sædvanligt byggeri, henvises til gældende regler og anvisninger, herunder SBI-anvisning 189, Småhuse (Statens Byggeforskningsinstitut, 1999) og tillæg til denne (Munch-Andersen, Aggerholm, Brandt, Buhelt & Valdbjørn, 2002).

Efterfølgende er et udpluk af indtryk fra ekskursioner til halmhuse i foråret 2000 og efteråret 2001. Ekskursionerne blev foretaget sammen med LØBs Faggruppe for Ler og Halm.



Figur 1. Halmhus i Herskind ved Århus. Huset er opført i 2001 af professionelle håndværkere. Udenpå de lerpudsede halmvægge er opsat en regnskærm af brædder på klink. Stålblader er anvendt som tagdækning, og hensigten er, at der skal græs på taget. (Foto: Jettie Nielsen).



Figur 2. Halmhus i Herskind ved Århus under opbygning. Her ses det bærende træskelet udfyldt med halmballer. Afstivning af gavle er midlertidig. (Foto: Lars Keller).



Figur 3. Halmhus i Torup, Nordsjælland. Halmhuset er brutto 152 m² og opført af professionelle håndværkere for ca. kr. 1,2 mio. i 2000. Halmhuset er siden videresolgt med fortjeneste.



Figur 4. Halmhus i Torup. Bagmuren er opbygget som en bindingsværkskonstruktion udfyldt med lersten. Udvendig er efterfølgende isoleret med halmballer. Indvendig lerpudset og udvendig pudset med kalkcementmørtel.



Figur 5. Interiør fra halmhus i Torup.



Figur 6. Munksøgårdbebyggelsens fælleshus Trekroner ved Roskilde er opført i 2000. Halmhuset er brutto 260 m². Huset er projekteret af professionel rådgiver og primært opført af beboere i bebyggelsen. Huset er pudset med kalkpuds og har blåmuslingeskaller på taget. (Foto: Ernst de Place Hansen).



Figur 7. Munksøgårdbebyggelsens fælleshus under opførelsen i 2000. Huset er opbygget som et langskib med bærende konstruktioner i afbarket fuldtømmer. Ovenlyset og de trekantede gavlvinduer understreger konstruktionens opbygning.



Figur 8. Halmhus i Pandrup i Vendsyssel opført i 1999. Det vinkelformede halmhus er brutto 356 m², hvoraf 160 m² er beboelse (billedet). De resterende 96 m² er garage og fyrrum. Halmhuset er opført af selvbyggere. Bygningen har et bærende skelet af rundtømmer og stålstoelper. Den udvendige puds er en blanding af kalk og lerjord.



Figur 9. Halmhuset i Pandrup ligner udefra et traditionelt parcelhus. Indvendig er huset til gengæld mere utraditionelt, vekslede mellem rumhøjde til kip og indskudte etagedæk som hemse. Overalt, sågar i badeværelset, er der lerpudsede vægge og lergulve tilsat linolie.



Figur 10. Halmhus og keramikværksted i Vester Skerninge på Sydfyn opført i 2000 af selvbyggere som et led i undervisning og byggeworkshop i, hvordan man bygger halmhuse. Halmhuset er ét stort ottekantet rum på knap 50 m² med bærende konstruktioner i rundtømmer. Væggene er pudset med lermørtel såvel ude som inde. Kalken er indfarvet med jordpigmentet okker.



Figur 11. Halmhus i Vester Skerninge på Sydfyn har gode dagslysforhold, da tagudhænget ikke skygger for lysindfald.



Figur 12. Halmhus i Vester Skerninge på Sydfyn. Centralt placeret i halmhuset kan en masseovn forsyne hele rummet med varme og bænken med.



Figur 13. Halmhus i Agerup ved Næstved opført i 2002 af selvbyggere. Byggeriet er inspireret af tyske ler- og halmbyggeteknikker. Der er fx fremstillet lerhalmplader på stedet til indervægge, og i etageadskillelsen er der anvendt lyddæpende viklere (ler snoet omkring lægter).



Figur 14. Halmhus i Agerup. Her er halmballerne placeret på højkant og sat i system af lodrette stolper.

Laster

Det overordnede konstruktionsprincip skal sikre, at alle de forekommende laster kan føres ned til jorden. De primære laster er:

- Egenvægt
- Nyttelast (møbler og personer)
- Snelast
- Vindlast.

De tre første laster er alle nedadrettede laster, som kan optages blot ved at anvende passende bjælker og stolper. Vindlasten er væsentlig mere kompliceret, idet den også giver vandrette og opadrettede påvirkninger.

De opadrettede vindkræfter kan betyde, at taget må forankres for ikke at blive revet af i stormvejr. Dette er som regel muligt at gøre på en simpel måde. Tagkonstruktionen i halmhuse er dog ofte så tung, at forankring kun er nødvendig i hjørnerne.

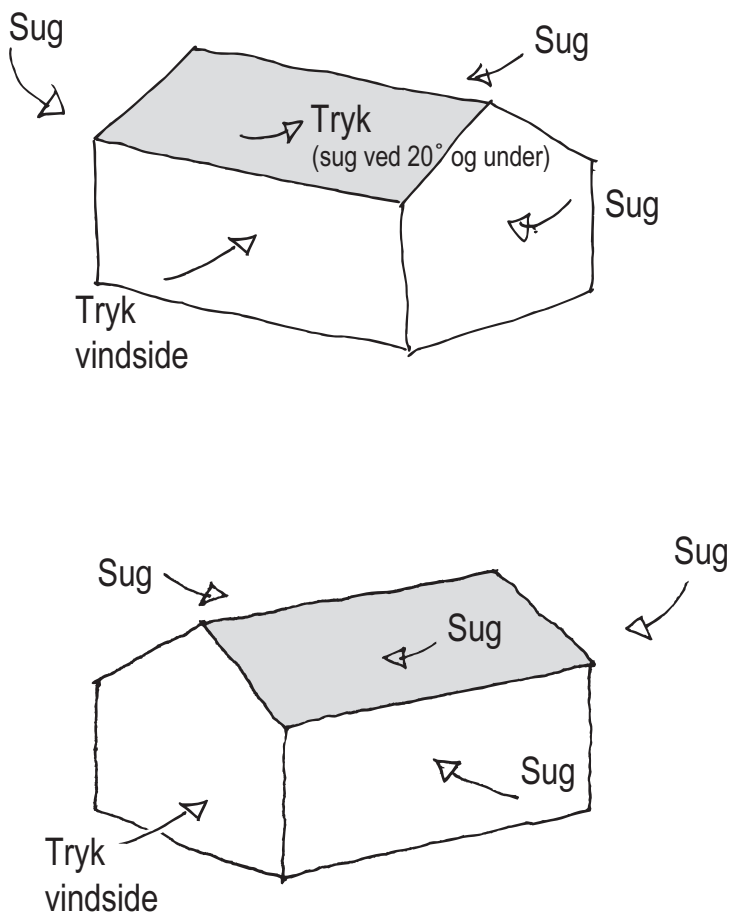
Vandrette vindpåvirkninger

Optagelsen af den vandrette vindlast er mere kompliceret.

Når vindretningen er på tværs af huset, se figur 15 øverst, bliver der tryk på facaden mod vinden og normalt også tagfladen i vindsiden. På gavlene og på læsiden af huset vil der i stedet optræde sug. Ved små taghældninger, op til 20 grader, kan der også optræde sug på tagfladen i vindsiden.

Når vindretningen er på langs af huset, bliver der tryk på gavlen mod vinden og sug på facaderne og den anden gavl. Der bliver også sug på begge tagflader.

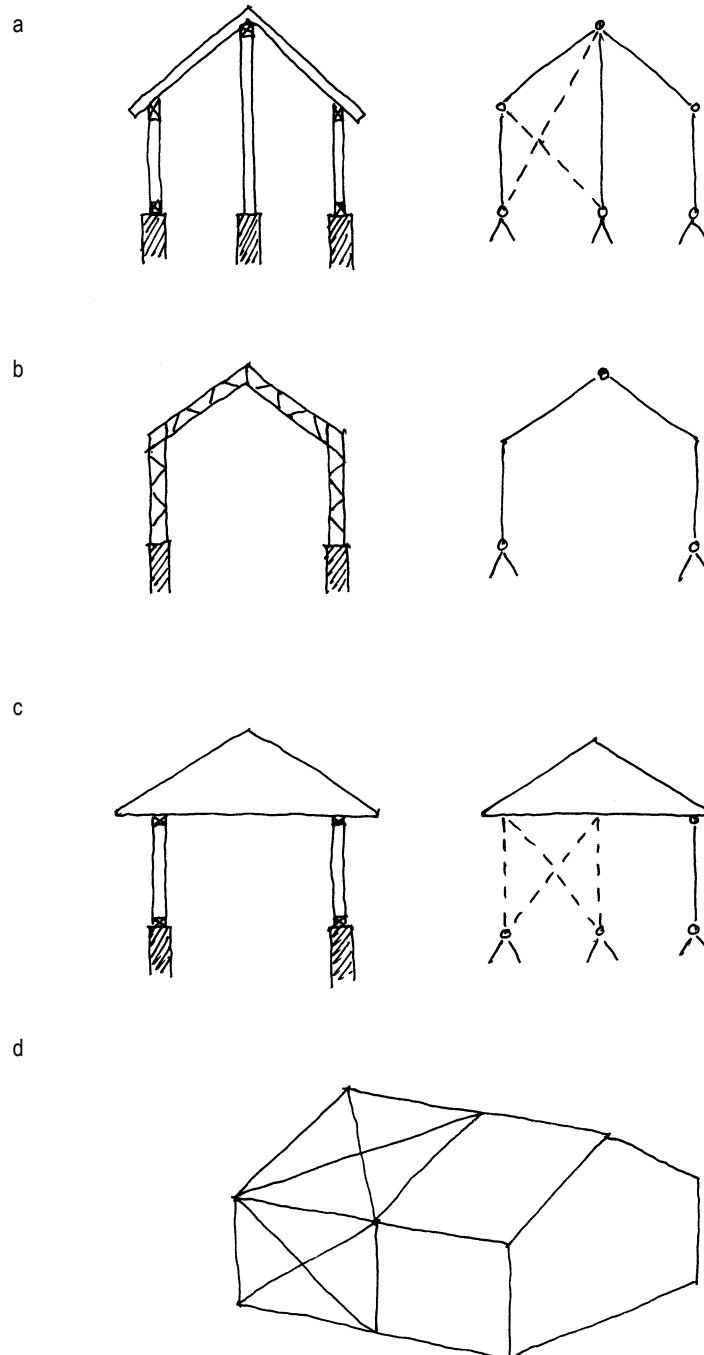
Inde i huset vil der desuden være et vist over- eller undertryk, afhængigt af hvordan husets utætheder er fordelt. Dette giver også vandrette påvirkninger på tværs af indvendige vægge.



Figur 15. Tryk og sug ved vind på tværs og på langs af huset.

Konstruktioner

Ved valg af konstruktionsprincip skal man være særligt opmærksom på, at de vandrette kræfter skal kunne optages og føres ned til jorden af nogle afstivende elementer. Mulige konstruktionsprincipper er illustreret på figur 16. Mange andre udformninger, og kombinationer af de viste principper, kan også anvendes.



Figur 16. Konstruktionsprincipper og deres 'statiske modeller'. Boller i modellerne markerer charnierforbindelser (hængsler), der ikke kan overføre bøjende momenter.

a. Hus opbygget med vægstolper forbundet med remme i toppen og bjælkespær mellem remmene. For at optage den vandrette vindlast i det viste plan, er der behov for afstivende systemer, fx vindkryds som vist eller tværvægge, der kan virke afstivende.

b. Hus opbygget af rammer er her vist som gitterkonstruktion. Hver ramme består af to halvdele, der samles i toppen på stedet. Hjørnet mellem lodret og skrå del er stift, således at rammen er stiv i det viste plan.

c. Hus opbygget som i A, men med bjælker mellem remmene. Trekkanterne af spær og bjælkelag er stive i deres plan, men der er behov for afstivning mellem bjælkelag og terræn.

d. Huset skal også afstives i længderetningen for fx vind på langs af huset. Dette kræver, at der i såvel vægge som tag indlægges stabiliserende elementer som fx vindkryds som vist. Der er behov for afstivning af mindst ét felt i hver facade og tagflade. Pladebeklædninger kan også bruges til afstivning.



Figur 17. Halmhus i Herskind ved Århus under opbygning. Afstivning af gavl og tagkonstruktion. (Foto: Lars Keller).



Figur 18. Halmhus i Agerup ved Næstved. Træskelet afstives med skrâbånd af stål. I praksis vil halmudfyldningen optage kræfterne.



Figur 19. Halmhus ved Præstø. Afstivning med skrâbånd af tømmer.

Længderetning

Figur 16 viser et eksempel på afstivning over for vind på langs af huset. En del af vindlasten på gavlene skal optages af tagfladen, da den understøtter gavlen. Lasten føres via fx taglægter (ikke vist) til et afstivende element i tagfladen. Dette afstivende element kan etableres ved hjælp af et vindkryds som antydnet, eller man kan udnytte skivevirkningen i de krydsfinerplader, der ofte benyttes som tagunderlag i forbindelse med fx tagpap. I andre tilfælde kan man benytte loftbeklædningen som skive.

Lasten bliver herved ført ned til facadevæggene, som derfor også skal indeholde afstivende elementer. Via remmen kan lasten flyttes i væggens plan, således at man kan bruge alle de dele af facaden, der ikke har vindueshuller og lignende som afstivende elementer.

En del af vindlasten på gavlen vil blive ført direkte til facaderne og skal derfor også optages ved skivevirkning i facaderne. Indvendige vægge, der støder op mod gavlen, kan også medvirke til lastoptagelsen.

Tværretning

Halmhuse er ofte opbygget med stolper, remme og bjælkespær som på figur 16a, eventuelt suppleret med tværgående bjælker som i figur 16c. Stabilitet over for vind på tværs kræver, at der indlægges nogle afstivende elementer på tværs. Behovet for tværafstivning ses klart ved at betragte skitserne til højre i figuren, der viser den 'statiske model' af konstruktionerne. Et stabiliserende element kan være et vindkryds som skitseret, men man vil oftest benytte tværvægge og gavle, der kan virke som skiver.

For at lasten kan føres hen til tværafstivningerne, må stolperne fastholdes foroven, så de ikke kan forskydes i forhold til hinanden i tværretningen. Dette kan sikres ved skivevirkning i tagkonstruktionen (figur 16a) eller i bjælkelaget (figur 16c) mellem de afstivende elementer. Skiverne skal i så fald spænde mellem hvert par af tværafstivende elementer.

Når der benyttes rundtømmer til remmene, vil de ofte være så stærke og stive, at de alene ved bjælkevirkning i vandret retning kan føre den vandrette vindlast hen til de tværafstivende elementer. Der er således ikke altid behov for skivevirkning i tag eller bjælkelag for at optage vindlasten på tværs. Man skal være opmærksom på, at udbøjningen af remmen kan blive stor, hvis styrken udnyttes fuldt ud. Udbøjningen bør ikke være større end mellem 1/500 og 1/300 af spændvidden afhængigt af, hvor store deformationer konstruktionerne kan tåle uden revnedannelser.

I en højremskonstruktion som vist på figur 16a kan vindlasten på gavlen ofte tilsvarende optages af bjælkespær af rundtømmer, blot der indlægges afstivende elementer i længderetningen under højremmen.

I princippet kan en konstruktion også stabiliseres ved at indspænde stolperne forneden, fx ved at indstøbe dem i betonklodser. Ud over problemer med råd i stolpeenderne, der kunne løses med nogle stålbeslag, bliver stivheden ret lille, hvilket giver risiko for revnedannelser i stormvejr.

Hvis der anvendes rammer som skitseret på figur 16b er konstruktionen stabil i sit plan, således at der ikke er behov for yderligere afstivning i husets tværretning.

Hvis der anvendes almindelige gitterspær er spærene i sig selv stabile i deres plan, men der er fortsat behov for at afstive mellem spær og terræn. Det gælder også, hvis der anvendes bjælkespær med ensidigt fald.

Dagslys og arkitektur

Lys er en vigtig faktor i alt byggeri. Skiftende lys hen over døgnet, årstider og klima er med til at skabe varierede rumoplevelser. Gennem lys opleves volumener, dybder og overfladestrukturer. Lyset er med til at skabe en bygnings karakter og skønhed. Lys opfattes varmt, koldt, kontrastrigt, flimrende



Figur 20. Et eksempel på gode dagslysforhold i halmhus i Torup, Nordsjælland.

eller mørkt. Fremspringende dele i flader og rum afsløres som skygger. Mange forhold påvirker således oplevelsen af lyset.

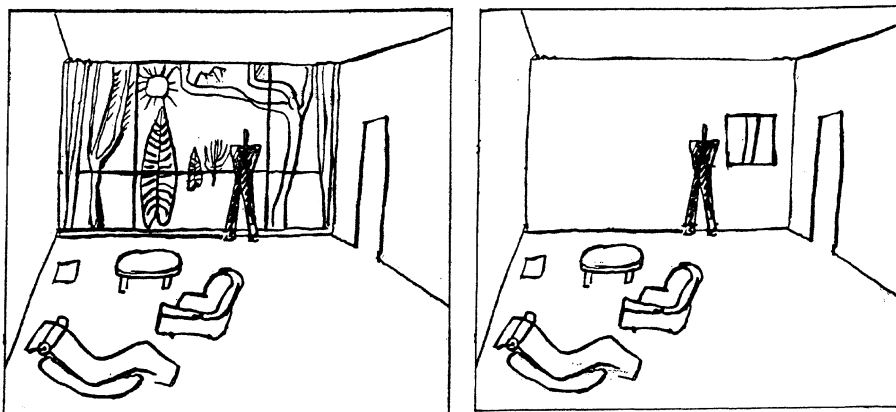
Halmhuse og dagslys

De fleste halmhuse er relativt dybe, har et stort tagudhæng, og desuden er ydervæggene tykke. Der er derfor grund til at tænke på, hvordan man får dagslys langt nok ind i huset.

Vinduets primære funktion er at give dagslys til og udsyn fra huset. Vinduernes placering og udformning er derfor vigtig for den brugsmæssige kvalitet.

Der skal i forbindelse med designprocessen tages stilling til:

- husets orientering
- gennemlys
- rumorganisering
- facadens udformning
- vinduesplacering
- vinduesstørrelse
- vindueslysningers udformning
- overfladevalg og -struktur på vægge.



Figur 21. Skitse af Le Courbusier. Godt dagslys og udsyn betyder meget for rumopfattelsen og kontrasterne i et rum. Størrelse på vinduespartier bør afstemmes med orientering mod verdenshjørner og afskærmning mod indkig.

Husets orientering, gennemlys og rumorganisering

Det vil være hensigtsmæssigt at orientere huset, så de rum der har behov for mest direkte solindfald og dagslys fortrinsvis placeres mod sydlige retninger. Belysningsstyrken vil altid være størst nær facaden og aftage gradvist ind i rummet. Ved en normal rumhøjde omkring 2,5 m vil en rumdybde på omkring 4 m være rimelig ved ensidigt belyste rum.

Større rum kan med stor fordel udformes som gennemlyste rum. Ved at placere vinduer, vinduespartier og/eller glasdøre over for hinanden eller vinkelret på hinanden, omkring et hjørne opnås gennemlyste rum og indfaldende lys fra to forskellige verdenshjørner. Gennemlys er medvirkende til en kontrastfyldt rumopfattelse.

Ovenlys kan være en fordel, når huset er meget dybt, og det kan medvirke til at skabe et kontrastrigt lys.

Facadens udformning, vinduesplacering og -størrelse

Facadernes udformning, vinduesplacering og rytme bør stemme overens med de bagvedliggende rums placering, funktioner og brugerbehov.

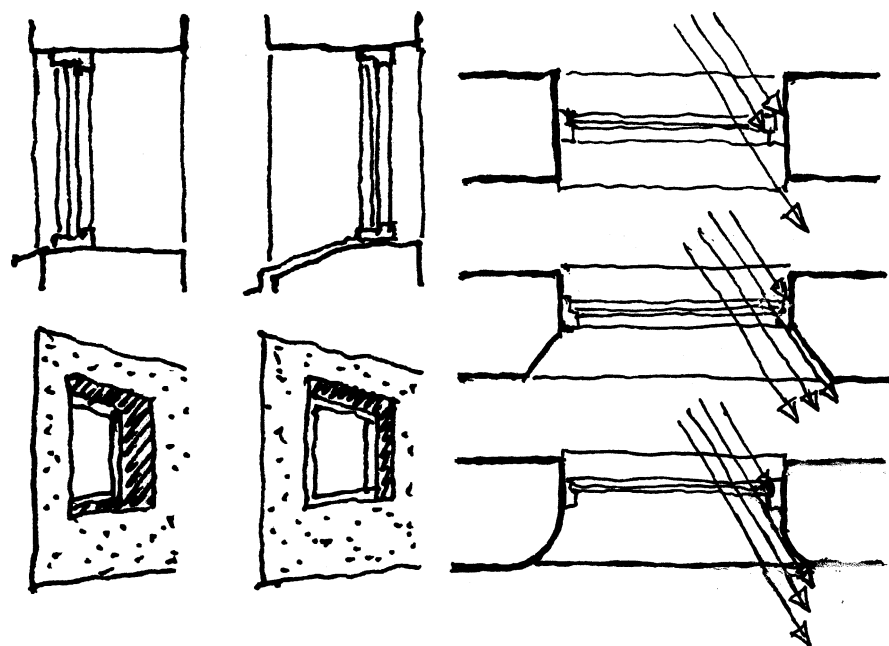
I dag bygges en del parcelhuse, herunder halmhuse, med store tagudhæng, dvs. tagudhænget skygger for udsynet og for det direkte sollys, især midt på dagen, hvor solen står højest.

Et stort tagudhæng bør være placeret højt i forhold til vinduernes overkant. Hermed opnås beskyttelse af facaden mod slagregn uden at begrænse udsyn og lysindfald. Dette opnås bedst ved at øge væghøjden, men forholdene kan også forbedres ved at placere underkanten af vinduerne længere nede.

Glaspartier, glastilbygninger og glaskarnapper, hvor lyset kommer ind fra flere sider, medvirker til et oplevelsesrigt og kontrastfyldt rum og medvirker til gode dagslysforhold. Ved større glaspartier kan man desuden opnå en vis varmeakkumulering afhængig af type gulvmateriale (se under afsnittet varmeakkumulering). Glastilbygninger og glaskarnapper kan dog blive meget varme at opholde sig i om sommeren og meget kolde om vinteren.

Vindueslysninger

Ved at affase de lodrette vindueslysninger og placere vinduet forholdsvis langt ude i vindueshullet, se fx figur 22, kan man få mere direkte lys og reflekteret lys fra vindueslysninger ind i rummet. Der henvises desuden til figurer og beskrivelse under afsnittet Vinduesdetaljer.



Figur 22. Generelle principper for lysindtag, udformning af vindueslysninger og vinduesplacering.



Figur 23. Afrundet vindueslysning hvor halmen er fastholdt med kyllingenet. Halmhus i Agerup ved Næstved.

Overfladevalg og -struktur

Med det rette lysindfald opleves pudsede, ubehandlede lervægge som stoflige og smukke. Det er hensigtsmæssigt at afstemme det indfaldende dagslys med de valgte overfladekarakterer og farver på vægge, lofter og gulve. For indvendige ubehandlede, lerpudsede halmvægge gælder det at evnen til at tilbagekaste lyset, refleksionsværdien, er målt til 0,33 på testemner brugt til forsøg på By og Byg. Det svarer nogenlunde til refleksionsværdien for ubehandlet, ren og tør beton. Man vil naturligvis opnå øget lysrefleksion ved at behandle væggene med fx hvid maling. Her opnås en refleksionsværdi på 0,7-0,8. Vælges mørkeblå maling får man tilsvarende en meget begrænset refleksionsværdi på 0,1-0,3.



Figur 24. Det ses, at tagudhænget tager en del lys, og at det er nødvendigt at afstemme vinduesoverkanten med tagudhængets placering og omvendt for at få bedst mulig lysindfald. Vindueslysningerne er til gengæld udformet, så der kommer mest mulig lys ind i rummet. Lerpudsen er tilsat blåt pigment. Interiør fra halmhus i Sdr. Felding.

Varmeakkumulering

Tunge konstruktioner kan bedre end lette akkumulere varme og dermed udjævne temperaturen over døgnet. Betydningen for varmekonsumet er dog forsvindende, hvis der benyttes fx gas til opvarmningen, men effekten kan være lidt større, hvis opvarmningen sker med en ovn, hvori der fyres en eller to gange daglig. Hvis man har store glasarealer, er evnen til at udjævne temperaturen over døgnet også en fordel om sommeren, idet maksimaltemperaturen kan reduceres nogle grader.

Det er kun de yderste få cm, der reelt bidrager til udjævning af døgnvariationer i temperaturen, idet varmen ikke kan nå at trænge længere ind, når den skal afgives igen samme døgn. Det gør derfor ingen forskel, hvis man øger tykkelsen af fx lerpuds på halm ud over de ca. 4 cm, der normalt anvendes. Effekten af tunge materialer er størst der, hvor sollyset rammer dem direkte. Tykkere lerlag kan give en vis langtidsakkumulering, der kan udjævne temperaturen over måske en uges tid.

Et tykt lergulv med gulvvarme er velegnet til at holde en stabil temperatur, men det betyder, at det er svært at reducere varmekonsumet, når solen skinner om vinteren, da varmetilførslen ikke kan stoppes kortvarigt.

Man skal også være opmærksom på, at trægulve og tæpper reducerer varmeakkumuleringseffekten af tunge gulve betydeligt. Den bedste varmeakkumulering fås med materialer med ringe varmeisolerende (høj varmeledning) og høj varmekapacitet. Tegl og især beton har meget høj varmeledningsevne og er derfor bedre end lerpuds, der har en vis isolerende evne.

Fugtakkumulering

Ubrændt ler er et af de få materialer, der kan akkumulere fugt af betydning. Det betyder, at ubrændt ler kan reducere udsving i luftfugtigheden.

Et andet godt materiale til fugtakkumulering er endetræ. Halm kan også medvirke, men effekten er minimal på grund af pudslagets tykkelse. Materialer som tegl og beton kan ikke akkumulere fugt af betydning.

Det er væsentligt at bemærke, at fugtakkumulering kun kan udjævne svingninger i indelufts fugtindhold. Der er behov for ventilation, som i alle andre huse, for at fjerne fugt og forurening.



Figur 25. Væg fra halmhus i Sdr. Felding. Ubrændt ler og endetræ er gode til at akkumulere fugt af betydning og dermed reducere udsving i luftfugtigheden. Svind af både træ og ler betyder, at der nemt opstår sprækker omkring træet.

Lufttæthed og dampspærre

En dampspærre placeret i konstruktionens indre del sikrer dels at fugt ikke trænger ud i halmen ved diffusion, dels - og vigtigst - at konstruktionen er lufttæt, således at fugtig luft ikke ved konvektion trænger ud i den. Dette giver langt større fugtpåvirkninger end diffusion.

Ved lerpuds direkte på halm er det ikke muligt at indlægge en dampspærre. Det er normalt heller ikke nødvendigt, blot lerpudsen er fri for revner og slutter tæt til fx træ der gennembyder pudsen, så konstruktionen bliver lufttæt ved indersiden. Det vil ofte være nødvendigt at udfylde sprækker mellem lerpuds og træ, når pudsen er helt udtørret.

Konstruktionen bør også være lufttæt ved ydersiden, for at kold luft ikke skal blæse ind i isoleringen. Det er imidlertid vigtigt, at væggen er diffusionsåben ved ydersiden, idet fugtig indeluft der måtte være trængt ud i konstruktionen, skal kunne passere gennem den udvendige beklædning. Kan den ikke det, vil der ophobes fugt bag denne. Når vanddampdiffusionsmodstanden (Z-værdien) er væsentligt mindre for den udvendige beklædning end for den indre forebygges kondensation også uden dampspærre.

Når der puds med ler- eller kalkpuds på begge sider af halm er Z-værdien indvendig og udvendig omtrent ens. Forsøg med ret ekstreme fugtpåvirkninger, beskrevet i del 2, viser imidlertid, at dette tilsyneladende ikke giver problemer. En del af forklaringen er, at pudsen bliver mere diffusionsåben, når den er fugtig, således at væggen bliver lidt mere åben på ydersiden end på indersiden. Halmens evne til at optage fugt er desuden så stor, at det kan forsvares at anvende pudskombinationer, der giver en vis fugtophobning om vinteren, blot fugtindholdet ikke overstiger 15-18 % og konstruktionen kan tørre ud om sommeren.

Hvis fugtindholdet i halmen bliver for højt, vil dette føre til råd og svamp, der kan give alvorlige indeklimaproblemer.

Det fremgår af ovenstående, at der ikke kan transporteres fugt af betydning gennem en korrekt udført konstruktion, uanset om den indeholder dampspærre eller ej. Fugtproduktionen i huset fra personer, madlavning og badning skal derfor fjernes ved ventilation.

Forebyggelse af svampeangreb

Ud over at udføre konstruktionen fugtteknisk korrekt, som beskrevet ovenfor, er det overordentligt vigtigt at anvende velbjerget halm og holde det tørt under hele byggeprocessen. Det er især vigtigt at beskytte halmen mod vand fra oven, hvor vandet vil sive ned gennem væggen. Vandpåvirkning af væggens overflader er langt mindre kritiske, fordi de vil tørre ud væsentlig hurtigere.

Hvis halmen blot én gang har været fugtig, kan indholdet af svampesporer være øget voldsomt. Dette øger risikoen for senere dannelser af svamp ud over risikoen for indånding under selve byggeprocessen under håndtering og tildannelse af halmballerne.

Bygningsdele

Tage

Tage består af en tagdækning, spær, varmeisolering og en loftbeklædning. Halmhuse bygges ofte med skråt loft til kip, hvorved taget bliver et såkaldt paralleltage. I det følgende behandles paralleltage, der primært isoleres med halmballer. For at få plads til at isolere med halmballer må der anvendes to lag bjælkespær eller eventuelt høje gitterdragere.

De indre spær bærer primært isoleringen og loftbeklædningen og kan være synlige eller ligge i halmisoleringen. De ydre spær bærer tagdækningen og skal optage vind- og snelast. Desuden skal de sikre ventilation mellem isolering og tagdækning. Forskellige mulige opbygninger er vist i figur 26.

I figur 26a er vist en konstruktion med gitterdragere, hvor den indre og ydre bjælke forbindes med gitterstænger og derved fungerer som én høj bjælke. Sådanne gitterdragere kan fremstilles af en spærfabrik. Træforbruget bliver noget større, hvis der anvendes to uafhængige bjælkelag af savet tømmer.

Hvis der, som i figur 26b og c, anvendes rundtømmer pr. ca. 1 m til de indre spær vil de ofte være så stærke, at lasten på de ydre spær også kan optages af de indre. De ydre spær kan da blot lægges oven på halmen, så den nedadrettede last overføres via halmen. De ydre spær skal dog forankres for vindsug til de indre med fx 12 mm gevindjern. De ydre spær kan da udføres af fx 50 x 100 mm planker. Det vil normalt være tilstrækkeligt med tre forankringer langs hvert spær.

Hvis der på gevindstængerne også anbringes møtrik og underlagsskive på undersiden af de ydre spær kan gevindstængerne også fungere som trykforbindelse. Gevindstænger, der skrues i forborede huller, bør på grund af det ret fine gevind ikke tillægges mere end halvdelen af den udtræksstyrke, som trænormen angiver for skruer. En 12 mm gevindstang, der er skruet 100 mm ind i spæret, vil derved få en regningsmæssig udtræksstyrke på 4 kN, hvilket er mere end rigeligt til de her viste konstruktioner.

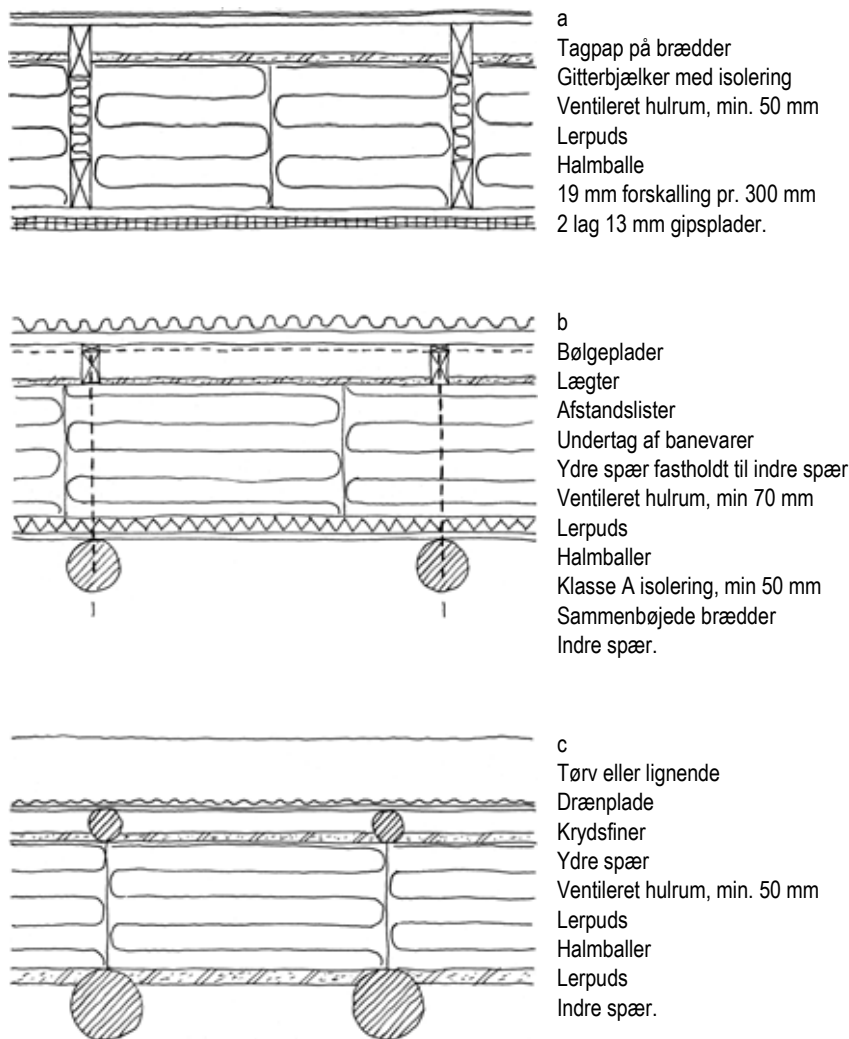
De såkaldte roekuletage hvor en tæt membran udlægges direkte oven på et tykt lag halm bør ikke anvendes, da fugt der stiger op i halmen ikke kan ventileres bort. Halmen vil derfor nedbrydes og der kan dannes svampesporer.

Varmeisolering

I taget anvendes halmballerne normalt liggende på fladen, så varmestrømmen går vinkelret på stråreningen. For 360 mm halm med en densitet på $75-90 \text{ kg/m}^3$ bliver U -værdien for taget inklusive tagdækning og loftbeklædning tæt på $0,20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, som netop opfylder bygningsreglementets krav til paralleltage. Det er vigtigt, at alle fuger mellem halmballerne er omhyggeligt stoppede. Et lerlag på oversiden af halmen vil, foruden den ekstra brandmæssige sikkerhed nævnt nedenfor, også bidrage til at hindre luftstrømninger, der vil nedsætte isoleringsevnen.

I de konstruktioner hvor der indgår 50 mm klasse A isolering reduceres U -værdien til $0,18 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, når der anvendes træbeton og til $0,16 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, hvis der anvendes trykfast mineraluld.

Mod uudnyttet loftrum er U -værdikravet $0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, hvilket fx kan opnås, hvis halmisoleringen suppleres med 100 mm isolering med λ -værdi 55.



Figur 26. Tagudformninger ca. 1:20.

Brand

Brandkravene til småhuse kan opfyldes rimeligt simpelt, når spærafstanden er højst 1 m. Den brændbare halmisolering skal beskyttes nedefra, hvilket kan ske på en af de tre måder vist i figur 26.

I figur 26 opsættes en spredt forskalling af brædder 19 x 100 mm pr. 300 mm, hvorpå der opsættes to lag almindelige 13 mm gipskartonplader. Løsningen er hensigtsmæssig, når spærene ikke er synlige.

Der kan også opsættes 50 mm klasse A isolering (fx træbeton eller mineraluld), som dækkes af en klasse 2 beklædning (fx 15 mm pløjede brædder) som vist i figur 26b. Der kan efter behov opsættes lægter i kl. A-isoleringslaget til at fastholde denne og beklædning. Løsningen kan fx bruges ved synlige spær, hvor der på spæroversiden oplægges fx 22 mm pløjede brædder og 50 mm træbeton.

Konstruktionseksemplerne i figur 26a og b følger sædvanlige principper for tagkonstruktioner med isolering, der ikke mindst er klasse A og opfylder derfor brandkravene. Hvis afstanden mellem spærene bliver større end 1 m, må der for at overholde brandkravene etableres en mellemunderstøtning af loftet, da der højst må være 1 m mellem fastgørelsespunkterne for brædderne i beklædningen.

Endelig kan der pudses med 30 mm lerpuds direkte på halmballerne, der spænder mellem spærene, se figur 26c. Forsøg har dokumenteret, at denne konstruktion opfylder kravene til klasse 1 beklædning. Der bør udspændes 2 mm galvaniseret jertråd pr. 300 mm mellem spærene for at fastholde halmen. Denne løsning anvendes typisk i forbindelse med spær af rundtømmer. Vægten af lerpudsen gør konstruktionen meget dyr for andre spærtyper.

Tagdækning

Der er ikke krav om brandmæssig beskyttelse af halmisoleringens overside, når tagdækningen er klasse T (det er alle sædvanlige tagdækninger, undtagen stråtage og lignende). Man kan som en ekstra sikkerhed mod både brand og skadedyr vælge at beskytte oversiden med lerpuds. Laget bør være tyndt dels for at begrænse vægten, dels for at sikre at diffusionsmodstanden er lille, så der ikke opstår risiko for fugtophobning i halmen. Lerlaget vil også reducere effekten af isoleringsfejl.

Der bør altid være et ventileret hulrum under tagdækningen for at sikre, at fugt der er trængt op gennem loftkonstruktionen kan ventileres bort. Hulrummet skal ventileres ved såvel tagfod som tagrygning. Kravene er de samme som for andre bygningstyper med samme tagdækning.

Tagdækningen kan fx være tagpap på pløjede brædder, krydsfinerplader eller OSB-plader som på figur 26a.

Der kan også anvendes tagplader på lægter som på figur 26b. Tagplader er sjældent helt tætte over for regn og sne i kombination med vind, hvorfor der normalt bør anvendes et undertag. Det samme gælder, hvis der er risiko for kondensdannelse på undersiden af tagdækningen. Dette gælder især ved metalplader. Der kan naturligvis også anvendes tagsten i stedet for bølgeplader.

Undertaget udføres som på alle andre bygninger. Der er her kun vist løsninger med ventilerede undertage, det vil sige undertage, hvor der også er ventilation på undersiden af undertaget.

Forskellige 'grønne' tagdækninger kan etableres ovenpå et krydsfiner- eller bræddeunderlag som antydnet på figur 26c. Det kræver, at træunderlaget beskyttes mod fugt, fx med drænplader. Detaljer kan findes i BygErfa-bladet Græstørvstage på træunderlag (Kloster, 1999).

Skivevirkning

Skivevirkning i tagkonstruktionen kan sikres entydigt ved at anvende krydsfiner eller OSB-plader som tagunderlag. I forhold til sædvanlige vindkryds af stålband giver plader en stivere konstruktion og en mere hensigtsmæssig kraftfordeling, da koncentrerede laster ved båndenes ender undgås.

Tagunderlag af rupløjede brædder vil også give en vis skivevirkning, som man dog normalt ikke regner med. Brædderne kan dog altid ved bjælkevirkning hindre at spærrene forskydes i forhold til hinanden i deres længderetning og dermed virke som skive over for tværlast. Halmballer tilpasset stramt mellem spær vil også bidrage til skivevirkningen i tagkonstruktionen, navnlig over for langsgående last.

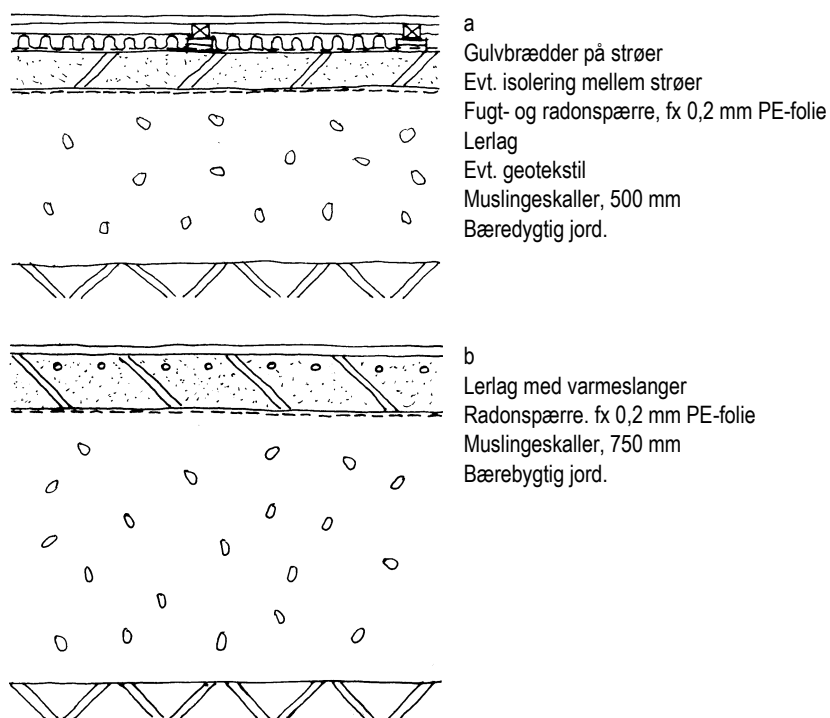
Der er således i praksis ikke særligt brug for vindkryds, men de kan indlægges for at stabiliteten kan eftervises formelt. Når der anvendes gipsplader til loftbeklædning kan disse bruges til entydigt at sikre skivevirkningen.

Uanset hvorledes skivevirkningen sikres skal skivekræfterne i taget kunne føres videre til væggene.

Terrændæk

Et terrændæk består af et kapillarbrydende lag, et varmeisolerende lag, en trykfordelende plade og en gulvbelægning. Her behandles løsninger, hvor det kapillarbrydende og det varmeisolerende lag primært udgøres af blåmuslingeskaller. Den trykfordelende plade udgøres af et lerlag. Eksempler på opbygning er vist i figur 27.

Der må kun være ét dampspærrende lag i konstruktionen. Det skal altid placeres over den primære isolering (muslingeskallerne), da der ellers kan dannes kondens på oversiden af det tætte lag. Det er normalt unødvendigt at anvende dampspærre af fugthensyn, undtagen hvis der lægges trægulv eller anden fugtfølsom gulvbelægning oven på lerlaget. I dette tilfælde er det



Figur 27. Gulvkonstruktioner isoleret med muslingeskaller.

hensigtsmæssigt med en fugtspærre for at beskytte gulvet mod fugt fra udtørring af lerlaget. Fugtspærre kan i princippet undværes, også i dette tilfælde, hvis lerlaget er fuldstændigt udtørret før trægulvet udlægges, men det kan ikke anbefales. En fugtspærre i form af fx 0,2 mm polyethylenfolie kan også medvirke til at sikre mod radonindtrængning.

Hvis man har behov for at hindre fx ler i at synke ned i isoleringen under opbygningen af terrændækket, kan man udlægge en fiberdug (geotekstil), som er diffusionsåben. Hvis der ikke indlægges fugtspærre højere oppe i konstruktionen kan en kraftig plastfolie også anvendes, hvorved der også sikres en tætning mod radon.

Når der som i figur 27a ikke benyttes gulvvarme er bygningsreglementets U -værdikrav $0,20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Ved anvendelse af blåmuslingeskaller med varmeledningsevnen $0,135 \text{ W/mK}$ skal der anvendes en isoleringstykkelse på 500 mm for at opnå denne U -værdi. De nederste 75 mm antages alene at



Figur 28. Gulvoverflade i ler tilsat linolie og hestemøg. Halmhus på Sydøen.

fungere som kapillarbrydende lag, der ikke tillægges nogen varmeisoleringssevne. Knuste skaller isolerer en smule bedre end hele skaller, fordi der bliver flere og mindre hulrum, se rapportens del 2.

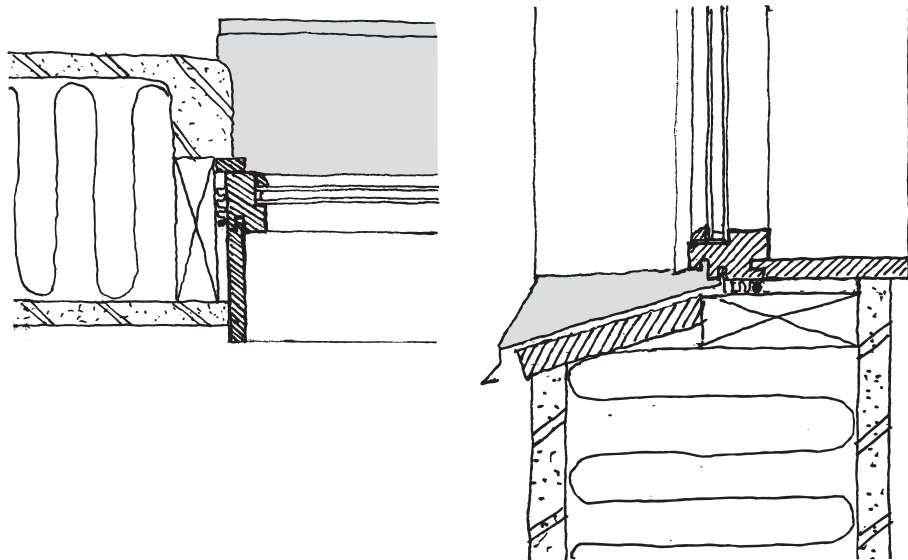
Hvis der benyttes gulvvarme som i figur 27b er U -værdikravet $0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Dette kræver en lagtykkelse på 750 mm.

Organiske isoleringsmaterialer i terrændæk må kun anvendes øverst i en terrændækskonstruktion ovenpå en fugtspærre, fx under et trægulv som vist på figur 27a. Isoleringsværdien af materialet over lerlaget bør ikke være højere end halvdelen af den samlede gulvisolering og aldrig højere end isoleringsværdien af 75 mm mineraluld for at undgå kondens på fugtspærrens verside.

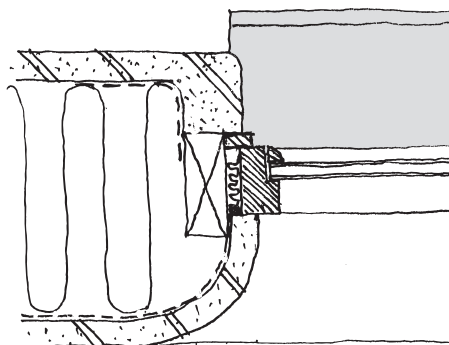
Vinduer

Der er flere forskellige måder at placere vinduet i ydervæggen og løse detaljerne i forhold til halmvægge på.

For det første er det væsentligt, hvor i vægtykkelsen vinduet er placeret samt hvilke karmprofiler, vindueslysninger og vinduesplader, man ønsker. Nedenstående viser forskellige måder at udforme vindueslysninger på, se figur 29 og figur 30. Normalt placeres vinduer i Danmark nær ydersiden af



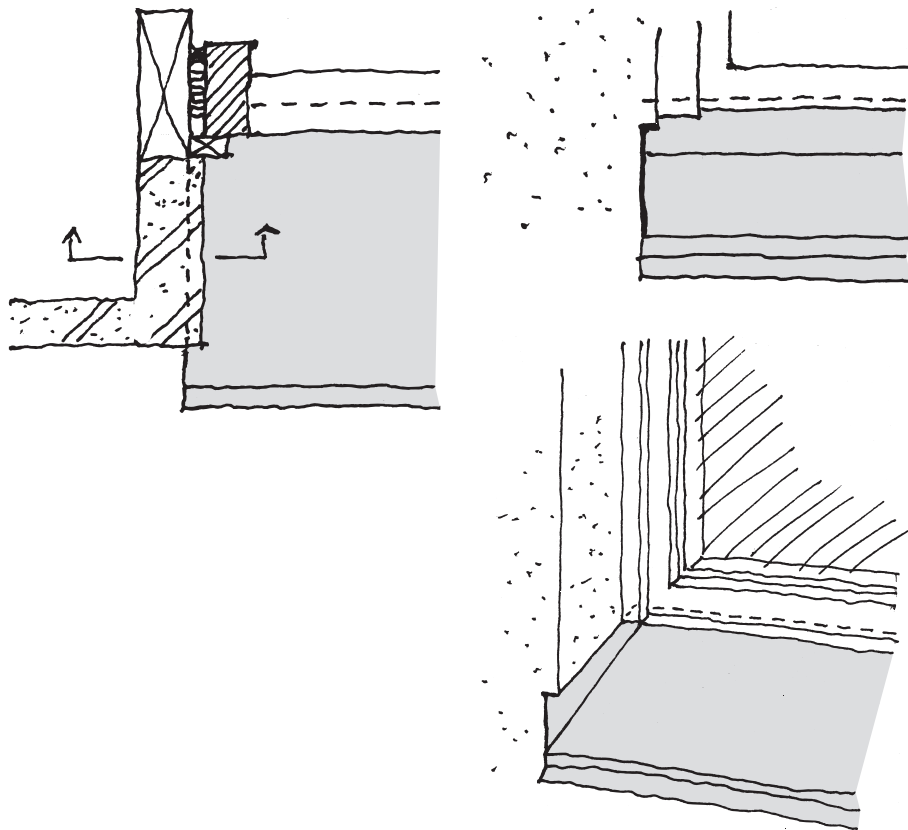
Figur 29. Vinduesdetalje. Vandret snit i sidekarm og lodret snit i bundkarm af vindue placeret i træramme. Der er benyttet tilsætninger af træ i vindueslysningen. Det er væsentligt, at fugen mellem vindue og træramme er lufttæt på den indvendige side. Ved top og sider tættes med en træliste mellem vindue og træramme, som der pudses mod. Det er vigtigt, at de yderste 10-15 mm ved sidekarmen ikke stoppes, så der dannes en drækanal. Ved bunden skal sålbænken slutte inden for drækanalen, så vandet ledes ud.



Figur 30. Vinduesdetalje. Vandret snit i sidekarm af vindue med lysninger i lerpudset halm. Der kan fx bruges kyllingenet som underlag.

væggen. Det giver mindst risiko for vandindtrængning omkring vinduet, samtidigt med at der opnås en lille lys- og energimæssig fordel. Vinduet selv vil være bedre beskyttet ved at være trukket tilbage.

Når vinduet er monteret, er det vigtigt at samlingen mellem vinduesramme og væg gøres lufttæt ved indersiden. Udvendigt er det vigtigt at udforme sålbænken under vinduet, så den beskytter de pudsede halmvægge mod regnvand. Det kan gøres ved at udføre en sålbænk i fx zink med en hældning på ca. 1:6 og 3-4 cm opkant ved enderne, se figur 31.



Figur 31. Princip for udformning af sålbænk. Sålbænkens endebund er forsynet med en ombukning for oven, som pudsen kan stå på. Derved undgås det, at pudsen står på sålbænkens bund, hvor den kan opsuge vand.



Figur 32. Ungdomsboliger i Torup, Nordsjælland. Her er buede udvendige vindueslysninger medvirkende til godt lysindtag. Den støbte betonsålbænk og opkanten langs med den buede vindueslysning beskytter pudsen mod fugt.

Fundamenter

Eksempler på fundamenter er kun vist i forbindelse med konstruktionseksemplerne, idet valget af fundament er stærkt afhængigt af valget af ydervægskonstruktion. Der henvises derfor til figur 34 og figur 35 i afsnittet Konstruktionseksempler.

For at reducere kuldebroen langs fundamentet bør dets øvre del indeholde isolerende materiale og halmens underside bør være hævet 200 mm

over det omgivende terræn. Hvis fundamentet består af beton eller sædvanlige letklinkerblokke, der ikke er kapillarbrydende, skal der indlægges en fugtspærre mellem fundament og halm. For at sikre at vand, der måtte være trængt ind i væggen kan bortdrænes, bør der indlægges et ikke-fugtfølsomt og drænende lag mellem fundamentet og halmen. Denne konstruktion kan ses på figur 35.

De bærende konstruktioner skal funderes i frostfri dybde på enten stribefundamenter eller punktfundamenter. Ikke-bærende halmvægge kan fx hvile på et stabilt underlag af et isolerende og kapillarbrydende materiale, fx gulvblokke på muslingeskaller. Gulvblokke er letklinkerblokke med særligt stort indhold af letklinker, der gør dem både kapillarbrydende og varmeisolerende. Det er derfor ikke nødvendigt med fugtspærre i dette tilfælde. Denne konstruktion vil i praksis sikre tilstrækkeligt mod frosthævninger af vægge, der som fx halmvægge kun er lidt sætningsfølsomme. Konstruktionen er benyttet i figur 34.

Man kan i princippet også opbygge halmvæggen direkte ovenpå muslingeskallerne, forudsat at undersiden af halmen fortsat er hævet mindst 200 mm over det omliggende terræn. Niveauforskellen mellem ude og inde vil dog blive ret stor.

Ydervægge

Ydervægge består principielt af en regnskærm, en bærende konstruktion, isolering og en indvendig beklædning. Desuden skal begge sider af isoleringen beskyttes passende mod brand og luftgennemstrømning af hensyn til såvel varmeisoleringens effektivitet som for at forebygge fugtophobning.

Her behandles vægge med en bærende trækonstruktion isoleret med halmballer. Der vises eksempler, hvor ler- og kalkpuds anvendes til at opfylde en del eller alle de øvrige funktionskrav, se figur 33. I figur 33d er den udvendige puds suppleret med en træbeklædning, hvilket vil reducere dels behovet for vedligeholdelse, dels følsomhed for mangelfuld vedligeholdelse.

Varmeisolering

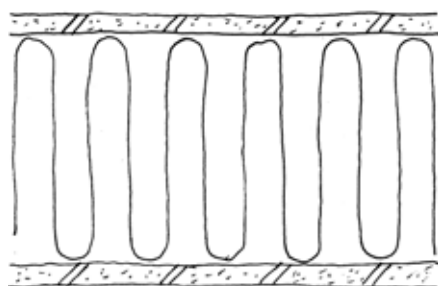
Almindelige halmvægge opbygget af halmballer med en densitet på omkring 75 kg/m^3 , en tykkelse på 450 mm og stråretningen vinkelret på væggenes plan har en U -værdi på omkring $0,20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, når de er pudset med ca. 40 mm lerpuds på begge sider. De overholder derved lige bygningsreglementets standardkrav til lette vægge (vægt under 100 kg/m^2). En pudset halmvæg vejer dog mindst 150 kg/m^2 , således at U -værdikravet kun er $0,30 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Det er meget vigtigt, at alle fuger mellem halmballerne er helt udfyldt med halm eller lignende, da isoleringsevnen ellers kan nedsættes særdeles mærkbart.

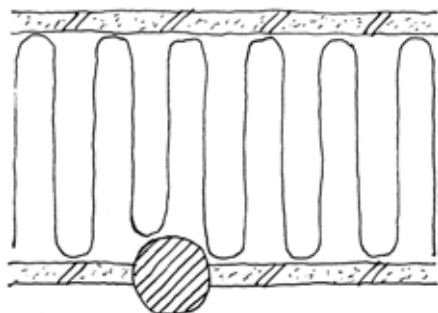
Brand

Halmvægge pudset med 40 mm lerpuds på begge sider er ved prøvning vist at overholde kravene til BD-vægkonstruktion 30, også når træstolper gennembyder lerpudsen. Indbrændingen i træstoplen skete kun fra indersiden, så resttværsnittet enkelt kan beregnes, hvis der er tvivl om bæreevnen i brandsituationen.

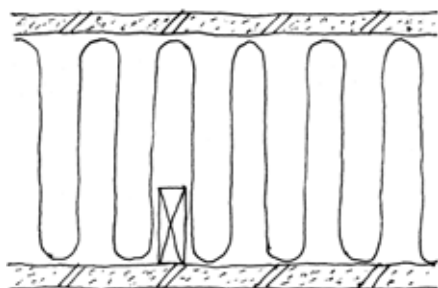
Lerpudsen opfylder som nævnt kravene til klasse 1 beklædning, hvor kravet kun er klasse 2 til bygninger opført efter småhusreglementet. Det betyder, at der uden på en lerpudset halmvæg kan opsættes en regnskærm af klasse B-materiale, fx træ. Der er ikke krav til tykkelse og fastgørelse af regnskærmen, da den ikke er en beklædning i brandteknisk forstand. (En klasse 2 beklædning skal bestå af klasse B-materiale).



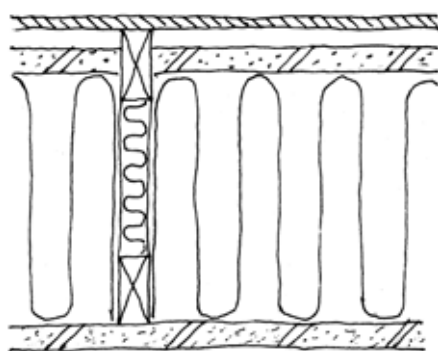
a
Ler- eller kalkpuds
Halmballer
Lerpuds
Træstolper, fritstående.



b
Ler- eller kalkpuds
Halmballer
Lerpuds
Træstolper, delvis i væg.



c
Ler- eller kalkpuds
Halmballer
Træstolper mellem halmballer
Lerpuds.



d
Regnskærm, fx træbeklædning
Gitterstopper med isolering
Ler- eller kalkpuds mellem stolper
Halmballer
Lerpuds.

Figur 33. Vægkonstruktioner.

Fugt

Det er vigtigt, at der ikke forekommer revner i pudslagene. Revner i det udvendige pudslag medfører, at der kan trænge regnvand ind. Revner i det indvendige pudslag betyder, at væggen ikke er lufttæt, og at vanddamp fra indeluften kan trænge ud i væggen.

Vandampdiffusionsmodstanden (Z-værdien) for lerpuds er ret lav og overfladebehandlinger som limfarvning, kalkning og linoliebehandling øger den ikke væsentligt. Kalkpuds er lidt tættere end lerpuds for samme tykkelse, men da det kan påføres i tyndere lag, vil Z-værdien for kalk- og lerpuds i praksis være omtrent den samme. Kalkpuds kan derfor med fordel anvendes udvendigt af hensyn til holdbarheden, idet den bedre end lerpuds kan modstå regnpåvirkninger. Med lerpuds udvendigt bør væggen være beskyttet af

et stort udhæng og kalkes ofte, hvis ikke der ofte skal opstå behov for reparation.

Cementholdig puds kan være noget tættere end lerpuds og ren kalkpuds. Beregninger af fugtforholdene i halmvægge er for usikre til at afgøre, om tætheden i en væg med indvendig lerpuds og udvendig cementholdig puds er så stor, at der er risiko for skadelig fugtophobning. Den større stivhed af cementholdig puds kan også øge risikoen for revnedannelser ved små bevægelser i bygningen.

Man tilstræber normalt at vandampdiffusionsmodstanden (Z -værdien) er væsentligt større på den indvendige side end på den udvendige side, for at undgå at vanddamp fra indeluften skal kondensere i væggen. Med ler- eller kalkpuds på begge sider kan dette ikke opnås uden egentlig dampspærre. Som beskrevet i rapportens del 2 er der dog intet der tyder på, at der i praksis vil ske fugtophobning i halmvægge med ler- og kalkpuds. Det skyldes til dels, at halmen kan akkumulere en del fugt, uden at fugtindholdet bliver kritisk og derved starter en nedbrydning.

Trækonstruktion

Den bærende trækonstruktion skal dels bære taget og snelasten på dette, dels optage den vandrette vindlast og det opadrettede vindsug på taget, hvis egenvægten ikke er tilstrækkelig.

De lodrette laster fra taget optages af en trækonstruktion, der enten kan være fritstående som på figur 33a, eller helt eller delvist indbygget i væggen som på figur 33b, c og d. Den vandrette vindlast i form af tryk eller sug på væggen skal kunne overføres til de øvrige konstruktioner. Det kan derfor være nødvendigt at forankre halmvæggen til trækonstruktionen. Når trækonstruktionen er fritstående som i figur 33, skal væggen forankres for såvel tryk- som sugpåvirkning, mens forankring for sug er tilstrækkeligt, når trækonstruktionen er i kontakt med væggens inderside som i figur 33b og c. Ved stolper i form af gennemgående gitterkonstruktioner, som i figur 33d er forankring normalt unødvendig, fordi stolperne i praksis vil stå ret tæt, og der er friktion mellem væg og stolper.

Konstruktionseksempler

I det følgende vises tre forskellige mulige udformninger af halmhuse, baseret på de forskellige bygningsdele, beskrevet i det foregående. Behandlingen her fokuserer på samlinger og afstivning.

Rundtømmerløsning

Konstruktionen vist i figur 34 er en højremskonstruktion baseret på vægtypen i figur 33b, tagtypen i figur 26c og gulvtypen i figur 27b.

Vægstolper af rundtømmer vil typisk stå med en afstand på 3 m og være funderet på punktfundamenter. Denne afstand giver gode muligheder for at placere døre og vinduer efter ønske.

Halmballerne står på gulvblokke som beskrevet i afsnittet Fundamenter. Der er indlagt en svær plastfolie af fx polyethylen under gulvpladen. Folien er ført op under væggen pudslag og fungerer derved både som radontætning og underlag for lergulvet.

Stolperne forbindes foroven med en rem, hvortil også de indvendige spær (hovedspærerne) fastgøres.

De ydre spær krages ud over facaden og danner dermed underlag for udhænget. De ydre spær skal normalt fastgøres til de indre, fx med 12 mm gevindjern, for at sikre dem mod afsugning. Gevindjernene kan enten indlimes, skrues i de indre spær eller boltes på undersiden. På oversiden af de ydre spær må der skæres et hak for at skabe plads til møtrik og underlags-skive. Når der benyttes rundtømmer som her, er svækkelsen uden praktisk betydning. Med græstørvstag og lignende kan forankringen på grund af egenvægten være overflødig.

De ydre spær kan hvile direkte af på halmoversiden. For at fordele lasten godt bør der indlægges en hjælperem under de ydre spær nær facaden. Dette reducerer risikoen for at de ydre spær slår pudsen af facaden under fx snebelastning. Som tidligere nævnt kan man også montere møtrik og underlagsskive på undersiden af de ydre spær, således at gevindstængerne også kan overføre tryk til de indre spær.

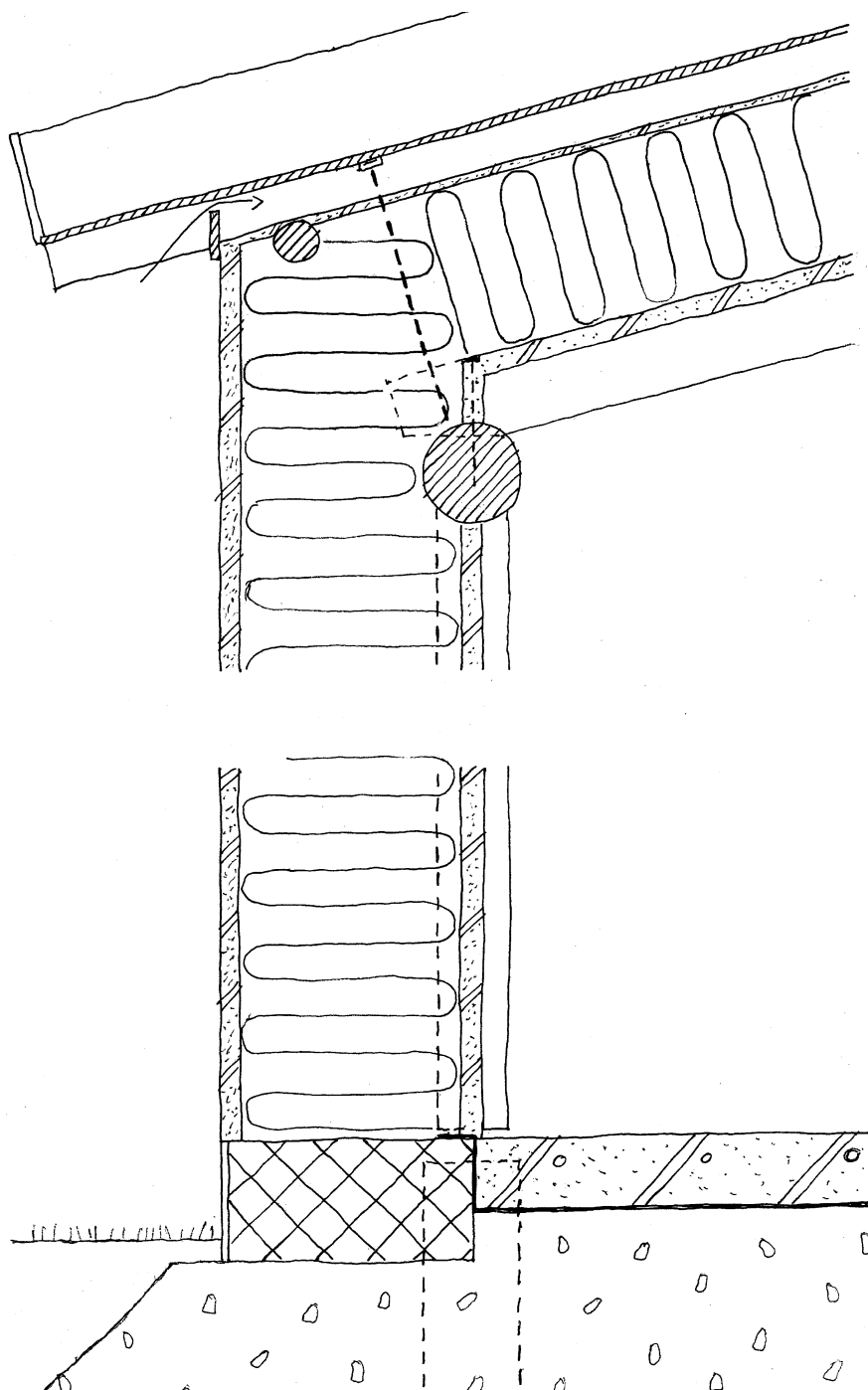
Det er normalt hensigtsmæssigt at spænde halmballerne sammen i lodret retning før de pudses. Det vil dels lukke sprækker mellem ballerne, dels for at forebygge sætninger, der kan skade både puds, isoleringsværdi og vinduer. Sømmenspændingen kan fx ske mellem hjælperemmen og fundamentet. Medmindre halmballerne er egentligt bærende er der kun behov for en beskeden sammenspænding, da det primært er pudsen der optager egenvægten, se rapportens del 2.

Mellem tagunderlaget (brædder) og lerpudsen på oversiden af tagisoleringsringen bør der ved facaden opsættes et vindbræt, der reducerer ventilationsluftmængden til det nødvendige, som er en åbning med en højde på ca. 10 mm. Der bør dog monteres et insektnet i åbningen, hvis højde så bør øges til 20 mm. Insektnettet vil også medvirke til at holde fygesne ude. Mellem lerpuds og tagunderlag skal der være mindst 50 mm ventilationsspalte. Ved kippen skal der i hver tagflade sikres tilsvarende åbninger, evt. ved hjælp af ventilationshætter.

Når stolperne, som her, står delvist inde i væggen, vil der være en del skivevirkning i systemet af stolper, rem og pudset halm. Facaderne kan derfor medvirke til at optage lasten på langs af huset. Den samlede last, der skal overføres fra rem til væg, er 6-10 kN pr. facade, eller ca. 1 kN/m facade,

når man ser bort fra vægstykker med åbninger. En skråafstivning ved hjørnerne vil dog være hensigtsmæssig ikke mindst af hensyn til at undgå revner. Afstivningen bør kunne optage både træk og tryk. Højremmen vil blive påvirket af lidt mere end dobbelt så stor last som hver af facaderne, samtidig med at lasten angriber højere oppe. Der er derfor altid behov for egentlige afstivende elementer under højremmen, bedst en langsgående væg i en del af huset.

Der er dog større påvirkninger af gavlene og de indvendige tværvægge i deres plan. I gavlene er der formentlig altid behov for at indsætte skråafstivninger. Indvendige vægge kan være udført af andre materialer med større styrke og stivhed. Benyttes halmvægge som indvendige afstivende vægge, er der behov for skråafstivning, da de vil modtage last svarende til to halve rumbredder, mens gavlene kun får last fra en halv rumbredde (plus lidt fra udhænget).



Figur 34. Rundtømmerløsning med punktfundamenter ca. 1:20. Væggen står på en gulvblok af letklinkerbeton, der er drænende. Hvis fugtspærren under lergulvet føres ind under den indvendige puds på væggen sikres samtidig tæthed mod radon.

Skjult konstruktion

Konstruktionen vist i figur 35 er en højremskonstruktion baseret på vægtypen i figur 33c, tagtypen i figur 26a og gulvtypen i figur 27a.

Når der benyttes savet tømmer, er det enklere at skjule konstruktionen i isoleringen. Da træet er en del dyrere, vil man i højere grad end ved rundtømmer søge at optimere træudnyttelsen. Det betyder, at taget med fordel kan bæres af gitterdragere, og at vægstolperne vil stå ret tæt, formentlig pr. ca. 1 m for at begrænse kravene til remmen. Det er af stor betydning at reducere vægten af taget mest muligt og derfor ikke hensigtsmæssigt at bruge store mængder lerpuds. For at sikre en tilfredsstillende isolering af rammerne, kan man isolere de trekantede hulrum med fx hørmåtter.

Konstruktionen er vist med en rem skåret ind i stolperne og skruet til disse. Indskæringen reducerer den excentriske belastning af stolperne og dermed deres dimensioner. Gitterdrageren forbindes til remmen med beslag. Herved behøver stolper og gitterdragere ikke at have samme faglængde. Det vil formentlig være hensigtsmæssigt at anvende en rem, der kan spænde over to vægfag, så der kan indsættes store vinduer uden andre ændringer end en mulig forstærkning af stolperne. Det er en betydelig fordel at sikre, at samlinger i remmen ligger mindst ét fag fra en åbning, da remmen herved bliver indspændt og dermed får større styrke og stivhed ved åbningen.

Vægstolperne står på en fodrem, der er opklodset på et sribefundament med midterisolering mellem letklinkerblokke. Midterisoleringen bør være polystyren eller et materiale med tilsvarende isoleringsegenskaber på grund af den begrænsede tykkelse. Anvendes fx muslingeskaller vil kuldebroen langs fundamentet øges betydeligt.

Som en ekstra sikring mod opslugning af fugt i halmvæggen, og for at sikre et plant underlag for halmballerne, er der oven på fugtspærren indlagt et skifte letklinkermursten ved ydersiden. Mellemrummet er udfyldt med trykfast drænende isolering, der helst skal have en isoleringevne, der er lidt bedre end halm.

Der er indlagt en fugtspærre af fx polyethylen over lerlaget for at beskytte trægulvet mod fugt fra lergulvet under udtørringen. Hvis fugtspærren i fundamentet samtidig føres lidt ind over gulvpladen, opnås der en effektiv radontætning.

Oversideplanken i gitterdrageren fortsætter ud over facaden og danner dermed underlag for udhænget.

Udhænget er her beklædt på undersiden med brædder. Ventilationen under taget foregår gennem spalter mellem disse brædder og der bør indlægges insektnet over brædderne. Ventilationsluftmængden styres af den samlede bredde af spalterne, der bør være 30-40 mm, når der benyttes insektnet og halvdelen uden insektnet.

Mellem lerpuds og tagunderlag skal der også være mindst 50 mm ventilationsspalte. Ved kippen skal der i hver tagflade sikres tilsvarende åbninger evt. ved hjælp af ventilationshætter.

Tagfladen kan afstives af loftbeklædningen, der er vist som to lag gipskartonplader. Når pladerne skal virke afstivende, er det væsentligt, at pladekanterne er forbundet til væggen, fx som vist, og at alle pladestød sker på spær eller lasker af fx brædder.

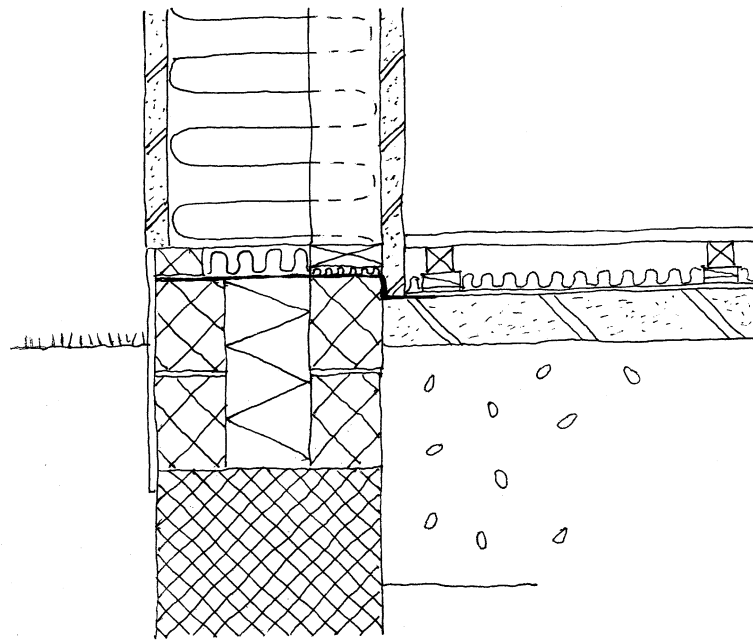
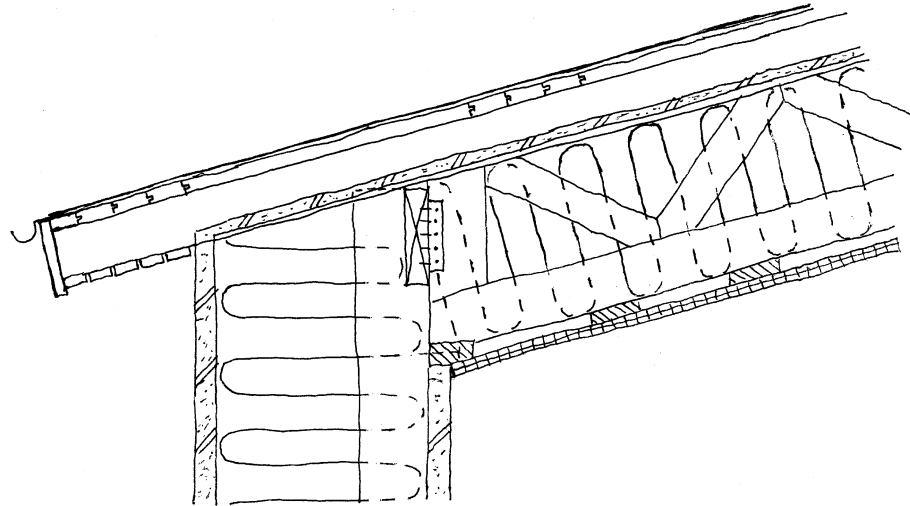
Med en effektiv loftskive som denne er det ikke nødvendigt med afstivende elementer under højremmen, da vindlasten på gavlene kan føres ned til facaderne af loftskiven. Den lodrette last skal fortsat kunne optages af højremmens understøtninger.

Når stolperne som her står inde i væggen og ret tæt, vil der være en betydelig skivevirkning i systemet af stolper, rem og pudset halm. Facaderne kan forventes at kunne optage vindlasten på langs af huset. Den samlede last, der skal overføres fra rem til væg, er, når højremmen ikke er afstivet,

14-25 kN pr. facade eller godt 2 kN/m facade, når man ser bort fra åbninger. En skråafstivning ved hvert hjørne kan dog igen være hensigtsmæssig for at forebygge revner.

Man kan eventuelt samle gitterdragerne i kippen momentstift, så der ikke er behov for en højrem. Dette øger kravene til gitterdrageren betydeligt, og de lodrette laster på facaderne øges til det dobbelte.

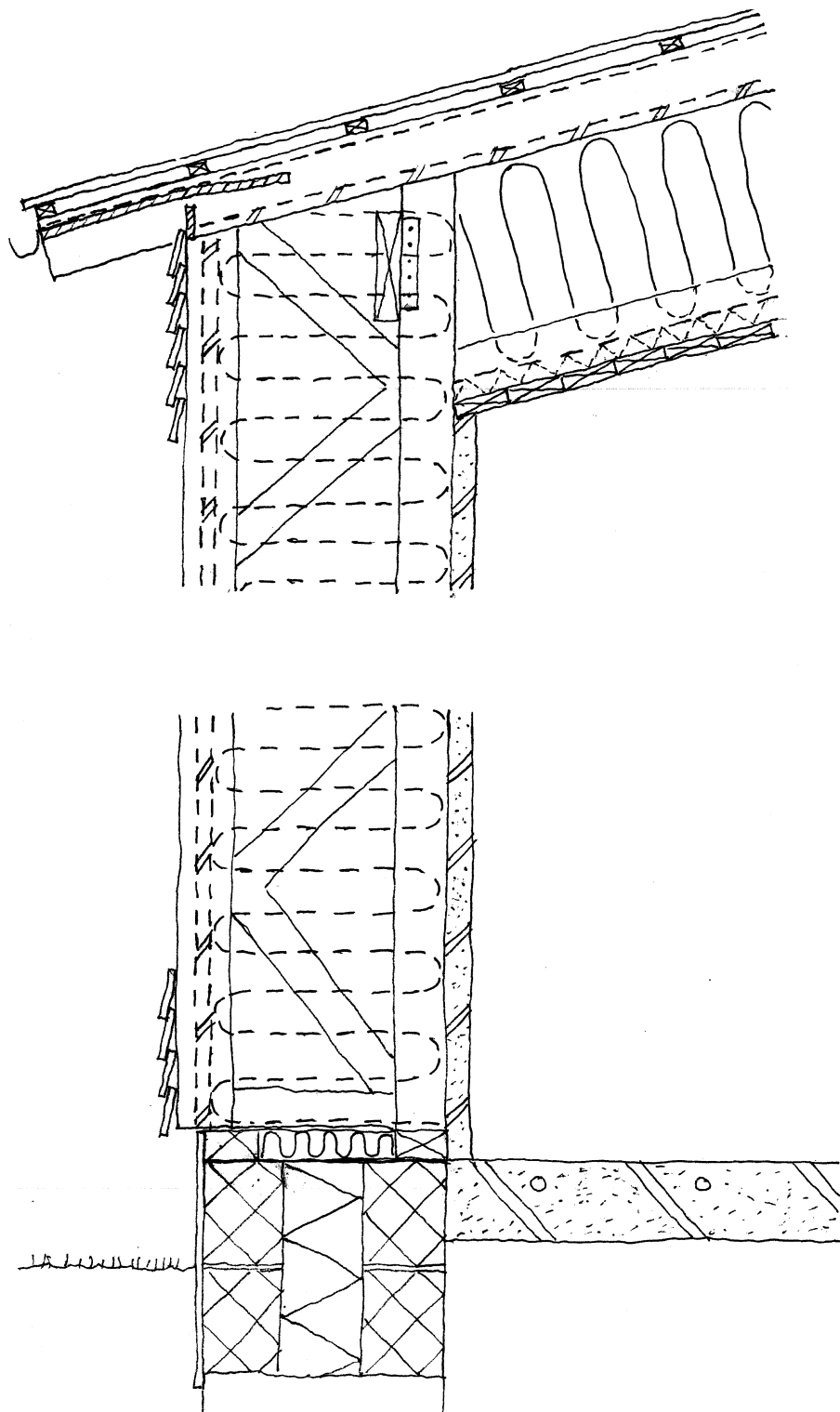
Behovet for afstivende elementer på tværs, fx vægge, er som i foregående eksempel, men her er det loftskiven, der fører lasten hen til de afstivende elementer da remmen ikke har væsentlig stivhed i tværretningen. Loftet skal derfor også forbindes til disse vægge.



Figur 35. Skjult trækonstruktion på sribefundament ca. 1:20. Der indlægges drænende isolering over fugtspærren i fundamentet. Når fugtspærren i fundamentet forbindes til fugtspærren på gulvet sikres samtidig tæthed mod radon.

Rammekonstruktion

Konstruktionen vist i figur 36 er en rammekonstruktion baseret på vægtypen i figur 33d, gulvtypen i figur 27b og en kombination af tagtyperne i figur 26a og b.



Figur 36. Gitterrammekonstruktion med regnskærm af brædder uden på den pudsede halmvæg ca. 1:20. Radontætningen udgøres her alene af lergulvet, som derfor skal være uden sprækker.

Rammekonstruktionen betyder, at der ikke er behov for indvendige langsgående vægge eller understøtning i kippen. Til gengæld er det væsentligt, at holde vægten af taget lav, hvis rammeløsningen skal være realistisk. Hvis rammeafstanden overstiger 1 m, kræver det en helt anden konstruktion for at overholde brandkravene til tagkonstruktionen. Rammerne er vist som en gitterkonstruktion, der fx kan fremstilles af en spærfabrik.

Det vil af hensyn til vinduesplaceringen være hensigtsmæssigt at dimensionere rammerne, så hvert tredje eller fjerde rammeben kan fjernes. Rammen, der forbinder rammerne, skal da kunne spænde over to fag.

Rammebenene står på en fodrem ved fundamentets inderside. Benene må kun være fastgjort i den ene side af fundamentet, da fugt- og tempera-

turbævælgelser ellers vil give store tvangskræfter i rammen. Letklinkermurstenen yderst sikrer samtidig et plant underlag for halmen.

Taget er vist med bølgeplader og undertag af banevare. Da banevare kan hænge mellem spærene, skal der projekteres med mindst 70 mm mellem overside, lerpuds og undertag.

Udhænget er her vist med synlige spærender. Der må skrammes ud i spæroversiden, så oversiden af bræddeunderlaget for undertaget i udhænget flugter med spæroversiden. Undertaget ledes op til brædderne med fx krydsfinerplader mellem spærene, således at undertaget ikke danner sæk ved kanten af bræddeunderlaget.

Rammerne sikrer, at huset er stabilt på tværs. Hvor rammeben er fjernet, kan lasten i taghældningens retning føres til naborammerne af loftbeklædningens brædder, forudsat at stød i disse forløbes.

Rammebenenes bredde betyder, at de i endnu højere grad end i eksemplet i figur 35 vil sikre en betydelig skivevirkning i systemet af rammeben, rem og pudset halm.

Del 2: Materialeegenskaber

Materialer

Der er opbygget et antal testemner, som er anvendt i forbindelse med bestemmelse af varmeisolering, fugtforhold, sætninger og brandmæssige egenskaber for lerpudsede halmvægge.

De fleste testemner er opbygget ved anvendelse af traditionelle halmballer eller dele deraf, og i hovedparten af forsøgene er ballerne lagt ned med stråretningen vinkelret på overfladerne, dvs. ca. 450 mm tyk. Halmvæggene grundes med lervælling, efterpudsas 2 gange med lerpuds tilsat snittet halm og glittes til slut. Den færdigpudsede halmvæg er ca. 520 mm tyk.

Ved sætningsforsøg på By og Byg er desuden anvendt bigballe, der er større og har højere rumvægt.

En beskrivelse af de anvendte materialer (halmballer, lerpuds, muslingeskaller) samt arbejdsgange ved opbygning af testemner findes i bilag 1.



Figur 37. Halmvægge til forsøg opbygges på By og Byg.

Ressourcer

Halm

Halm er et biprodukt i landbrugsproduktionen, der findes i rigelige mængder og er samtidig en fornybar ressource. Af en samlet bjergbar halmhøst på 6 mio. ton anvendtes i 1996 ca. 15 % til energiformål. Derudover anvendes en del halm som strøelse, men store mængder nedpløjes (Nikolaisen et al., 1998). Til et normalt hus medgår omkring 150 m³ halm eller knap 15 ton, så



Figur 38. Med pudsebræt pudses testemner 2. gang med ler tilsat snittet halm.

ressourcen er næsten ubegrænset i forhold til den mulige afsætning til byggeri.

Der er ikke nogen væsentlige miljøbelastninger forbundet med fremstilling af halmvægge, og den eneste miljøbelastning er transporten fra mark til byggeplads. De samlede miljøbelastninger vil derfor være væsentlig mindre end for traditionelle ydervægge.

Lerpuds

Når lerpudsen fremstilles ved brug af lerpulver, medgår der nogen energi til tørring. Dette energiforbrug er dog beskedent, sammenlignet med produkter, der brændes som kalk og cement.



Figur 39. Halm findes i rigelige mængder og er både let at frem- og bortskaffe. Halmballer produceres ved presning og kan afhængig af halmpresse fremstilles i de størrelser, man ønsker sig.

Lerpuds indeholder en del vand og anvendes i forholdsvis store tykkelser. Der må derfor påregnes større ekstra varmekonsum det første år i lerpudsede huse end i konventionelle bygninger for at tørre huset.

Muslingeskaller

Der er rigelige mængder muslingeskaller i Danmark. Der landes ca. 100.000 ton muslinger hvert år og fabrikkerne må i dag betale for at komme af med skallerne (Sand Kristensen & Hoffmann, 2000).

Mængden af muslingeskaller, der skal anvendes til terrændækket i ét hus, kan skønnes til $150 \text{ m}^2 \times 0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ t/m}^3 = 38 \text{ t}$. Det vil sige at ressourcen rækker til nogle tusinde enfamiliehuse pr. år. Ressourcen er altså ikke ubegrænset, men vil formentlig kunne dække efterspørgslen.

Forudsat at muslingefiskeriet ikke øges som følge af efterspørgslen efter skaller, er der ikke nogen miljøbelastninger forbundet med fremstilling af muslingeskaller. Den eneste miljøbelastning er transporten fra fiskekonserverfabrikken til byggepladsen. De samlede miljøbelastninger er derfor væsentligt mindre end miljøbelastningen for traditionelle konstruktionstyper med samme isoleringsevne, som fx polystyrenplader og løse letklinker.



Figur 40. Blåmuslingeskaller bør ligge et par måneder på byggegrunden og afgasse inden brug.

Varmeisolering for halmvægge

Undersøgelserne vedrørende varmeisolering er beskrevet detaljeret på engelsk nedenfor. De væsentligste resultater fremgår af det følgende danske resumé.

Dansk resumé

Der er som en del af projektet udført to typer målinger med henblik på at bestemme U -værdien for halmvægge. Den ene er måling af λ_{10} for 100 mm halm med stråretnings henholdsvis parallelt med og vinkelret på varmestrømmen for to forskellige densiteter. Resultaterne fremgår af table 2. Desuden er U -værdien for lerpudsede halmvægge bestemt direkte ved målinger i en guarded hot box. Dette er også sket for såvel stråretnings parallelt med som for vinkelret på varmestrømmen. Resultaterne fremgår af table 2.

Varmedningsevnen er målt til knap 0,06 W/mK i de udførte forsøg. Disse værdier falder midt i feltet af resultater fra andre målinger af varmedningsevnen. Da der ikke er foretaget tilstrækkelig mange målinger, kan man ikke bestemme en designværdi for λ , der tager hensyn til usikkerheden på bestemmelsen. Der vil være ret store variationer afhængigt af fx halmtypen og den anvendte presse, men såvel de laveste som de højeste værdier i table 1 forekommer helt urealistiske. Specielt overraskende er den meget lave værdi fundet i (Österreichischen Strohballen-Netzwerk, 2002). Værdien er bestemt af et akkrediteret østrigsk institut, og resultater fra samme forsøgs-serie, der ikke er gengivet i table 1, viser tilsvarende lave værdier. På basis af direkte målinger alene af varmedningsevnen vil rimelige designværdier være 0,065 W/mK, når stråretningen er parallel med varmestrømmen og 0,060 W/mK, når varmestrømmen er vinkelret på stråretningen.

De direkte målinger af U -værdien giver imidlertid langt dårligere U -værdi, end den man finder ved brug af ovennævnte varmedningstal. I (Christian et al, 1998) er beskrevet simuleringer af luftstrømninger i halmen. Modstanden mod luftstrømning i halm er så lille, at der på grund af temperaturforskelle vil være en opadgående luftstrøm ved den indvendige side og en nedadgående på den udvendige side. Denne luftstrømning reducerer U -værdien. Hvis der er spalter mellem puds og halm, bliver reduktionen endnu større, og det er derfor vigtigt, at der ikke er spalter mellem puds og halm.

Pudsen vil trænge lidt ind i halmen, specielt ved hjørnerne mellem halm-ballerne vil der være en kuldebro. Den effektive tykkelse af halmisoleringen er derfor mindre end halmballens dimension. En rimelig overensstemmelse mellem målingerne af varmedningstallet λ og U -værdien er opnået ved at reducere halmtykkelsen med 50 mm og reducere isolansen (den reciprokke af U -værdien) med 0,9 m²K/W for at tage hensyn til luftstrømningen. De 0,9 m²K/W er fundet ved de nævnte numeriske simuleringer, mens de 50 mm er en ret høj værdi, der kun er valgt, fordi den skaber overensstemmelse.

Ifølge DS 418 (Dansk Standard, 2002) skal U -værdien øges med 0,1 W/m²K, når der er mulighed for luftspalter på tværs af hele isoleringslaget. Resultatet er, at en lerpudset halmvæg med 450 mm halm med stråretnings parallelt med varmestrømmen med god sikkerhed kan tillægges en U -værdi på 0,18 W/m²K. Med 360 mm halm med stråretningen vinkelret på varmestrømmen bliver den tilsvarende værdi 0,21 W/m²K. Imidlertid anvendes halmballer med varmestrømmen vinkelret på stråretningen normalt i tage. Når hældningen er lille, vil luftstrømningen ikke kunne forekomme såle-

des at U -værdien øges. I praksis kan tagkonstruktioner isoleret med halm-baller, derfor tillægges en U -værdi på $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$, idet tagdækningen også giver et mindre bidrag.

Thermal properties of straw bale walls

Two types of measurements were carried out in order to determine the U -value of building parts where straw bales are used as thermal insulation:

- 1 Measurement of specific thermal conductivity, λ_{10} , for 100 mm of straw according to (ISO 8302:1991)
- 2 Direct measurement by guarded hot box test on stuccoed straw bale walls according to ISO 8990 (Dansk Standard, 1997).

Both test types were applied to specimens with the straw parallel and perpendicular to the heat flow. Further the thermal conductivity was determined for two densities. The values were determined at approximately 0°C on the cold side and 20°C on the warm side. The tests were conducted by an accredited laboratory. The results for λ_{10} are reported in (Teknologisk Institut, 2001c, d, e, f) and for direct measurement in (Teknologisk Institut, 2001a, b). The results are listed in Table 1 and 2 together with results found in the literature.

Table 1. Thermal conductivity for straw bales according to different sources.

Reference	Density, kg/m^3	Thermal conductivity, λ , W/mK	
		Straw parallel to heat flow	Straw perpendicular to heat flow
Present study	75	0.057	0.052
Present study	90	0.060	0.056
Haus der Zukunft ¹	100		0.038
Christian et al. (1998)	62 resp. 81	0.082	0.057
McCabe (1993)	approx. 150	0.060	0.048
Sandia National Lab. (1994)	90	0.05-0.06 ²	0.05-0.06 ²

1. Österreichischen Strohballen-Netzwerk (2000). 2. Unspecified straw direction.

Table 2. U -value for stuccoed straw bale walls.

Straw orientation	Thickness of straw	Surfaces	U -value, $\text{W/m}^2\text{K}$
Present study ¹			
parallel to heat flow	385 mm	34 + 42 mm stucco	0.208
perpendicular to heat flow	365 mm	26 + 26 mm stucco	0.196
Christian et al. (1998) ¹			
parallel, with cavities	470 mm	Stucco + 13 mm board	0.365
parallel, without cavities	480 mm	Stucco + 13 mm board	0.210 ³
Watts et al. (1995) ² , parallel	460 mm	Stucco	0.21

1. Guarded hot box test excluding air film resistance. 2. In situ test. 3. Value determined from data in (Oak Ridge National Laboratory, 1998).

Thermal conductivity

Conductivity was expected to be higher when the straw is parallel to the heat flow than for the other direction. It was also expected that the density slightly influences the conductivity, possibly such that an optimal density might exist within the normal density range for straw bales.

Table 1 shows that the test values for the thermal conductivity were quite scattered. The trend was clearly that the conductivity was higher for the straw parallel to the heat flow than for the perpendicular direction. However, the Danish measurements indicated a smaller dependency than the results found in literature.

The dependence on density was not clear. The Danish measurements indicated that the conductivity increased with density, whereas Austrian measurements by (Wimmer, Hohensinner, Janisch, Gruber & Passauer, 2001) show the opposite trend. In both cases the change is small. The high value for the parallel direction obtained by Christian et al. (1998) is associated with quite a low density which might indicate that a higher density could improve that value. It might also be of importance how perfect the straw is aligned. The values obtained in Austria are surprisingly low.

U-values from direct measurements and λ -values

Measurements on straw bale walls with cladding seem to give quite similar U-values for the walls with stucco cladding. The larger value obtained by Christian et al. (1998) was caused by air gaps between as well the outside stucco as the straw and between the straw and the two gypsum boards that formed the inner cladding. Simulations by computational fluid dynamic (CFD) showed that these gaps might have accounted for the poor U-value in the first test. In a second test great care was taken to avoid gaps and the U-value was almost halved and became similar to the other experiments in Table 2.

If the small contributions from air film, stucco and boards are ignored, a U-value of $0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ for a 450 mm thick layer of straw equals a thermal conductivity of $\lambda = 0.09 \text{ W/mK}$. This backwards estimation gave λ -values about 50 % higher than most of the measured λ -values and also higher than the 'out-layer' value found by Christian et al. (1998). This indicated a significant problem in establishing U-values from λ -values.

Christian et al. (1998) determined by means of their CFD-model a U-value of $0.195 \text{ W/m}^2\text{K}$ when there are no gaps, but including both conductive and convective contributions to the heat transfer. The conductive part was determined with the above mentioned $\lambda = 0.082 \text{ W/mK}$. In order to determine the convective part the airflow permeability was measured. It was found to be about $100 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ (0.2 kPa s/m^2 at 20°C), somewhat more permeable than mineral wool.

A simple calculation using $\lambda = 0.082 \text{ W/mK}$ and $R = 0.2 \text{ m}^2\text{K/W}$ for gypsum board and stucco in accordance with Christian et al. (1998) gives $U = 0.165 \text{ W/m}^2\text{K}$ when ignoring the convective contribution. From these values it can be estimated that convection reduces the thermal resistance by $0.9 \text{ m}^2\text{K/W}$.

The value measured in the second test in the hot box, where gaps were avoided, was $0.210 \text{ W/m}^2\text{K}$. The difference between the measured and the calculated value might be bigger than the numbers indicated, because the CFD calculation was carried out for a seemingly high λ -value, determined for a much lower density than the density of the bales used (62 vs. approximately 90 kg/m^3). Therefore, the tests conducted by Christian et al. (1998) seem to suffer from the same problem as the other tests - the U-values calculated from the λ -values were significantly smaller than the U-values measured on real walls. However, the work revealed that convection was part of the explanation for the differences.

Another part of the explanation could be that the effective thickness of the straw was reduced because the stucco percolated into the straw. This could increase λ for some 10 mm at both sides of the bale. It might be more serious that the rounded corners of the bales causes a cavity at the top and bottom of each end joint between the bales which is filled with stucco. At these points the stucco might intrude 40 mm from each side. This causes a thermal bridge that increases the heat loss. If these intrusions are assumed to be equivalent to a reduction of the effective straw thickness by 50 mm and the convection is assumed to reduce the resistance by $0.9 \text{ m}^2\text{K/W}$ the measurements of λ and U in this study will agree quite well. The resistance from the stucco is taken as $0.1 \text{ m}^2\text{K/W}$. (The air film resistance is not included in the U-values in Table 2).

For the straw parallel to the heat flow is then obtained:

$$1/U = 0.1 + (385-50)/60 - 0.9 = 1/0.209$$

and for straw perpendicular to the heat flow:

$$1/U = 0.1 + (365-50)/56 - 0.9 = 1/0.207$$

As the measured values were 0.208 and 0.196 W/m²K, the agreement is quite good.

The bales used for the hot box test for the straw parallel to the heat flow were reduced in thickness in order to fit into the apparatus. With the full thickness, 450 mm, the U-value would be 0.170 W/m²K with the same assumptions. An air film resistance of 0.2 m²K/W will improve the value U-value of a straw bale wall to 0.165 W/m²K.

In real life, heat flow perpendicular to the straw only occurs when the bales are used for insulation in roof constructions. When the roof pitch is low, the air circulation causing the convective loss cannot take place. The expected U-value of a roof insulated with 360 mm straw bales is therefore:

$$1/U = 0.1 + (360-50)/56 = 1/0.177$$

The contribution from roof cladding and ceiling might be slightly higher than 0.1 m²K/W. When also the air film resistance is taken into account the U-value of a roof insulated with 360 mm straw bales will be 0.17 W/m²K.

Moisture content

All the quoted thermal properties applies for dry conditions as the straw is dried by the heat flow when waiting for the steady-state heat flow to develop. The steady-state is required by the standard methods used to determine the thermal properties. However, Kristiansen and Rode (1999) developed a method to determine the thermal conductivity for higher moisture contents. The method has not been applied to straw, but tests on other cellulose materials showed that the thermal properties did not depend significantly on the moisture content if the moisture content is below what corresponds to equilibrium at 70 % RH. These conditions will be fulfilled in a correctly constructed straw bale wall. There is, therefore, no evidence for prescribing higher adjustment factors for moisture content for straw than for more conventional insulating materials.

Conclusion

A straw bale wall with 450 mm straw parallel to the heat flow and plastered on both sides has a U-value of 0.165 W/m²K when the heat loss due to convection is taken into account. This value should equal the U-value determined from design λ -values (which are determined from λ_{10} -values). According to the Danish standard for determining heat loss, (DS 418:2002) this value should be increased by 0.01 W/m²K to obtain a design U-value. The formal design U-value then becomes 0.18 W/m²K, which is 10 % better than the required value for light weight walls, 0.20 W/m²K, in the Danish Building Regulations (Bolig- og byministeriet, 1998).

A straw bale insulated roof construction with 360 mm straw perpendicular to the heat flow has a U-value of 0.17 W/m²K, which also should be increased by 0.01 W/m²K so that the design U-value becomes 0.18 W/m²K, similar to the U-value for the wall.

Due to expected variability in straw types and density a reasonably safe design U-value will be 0.20 W/m²K for both walls and roofs insulated with normal 360 x 450 mm straw bales as the primary insulation material.

Fugt og kondens i halmvægge

Undersøgelserne vedrørende fugt og kondens er beskrevet detaljeret på engelsk neden for. De væsentligste resultater fremgår af det følgende danske resumé.

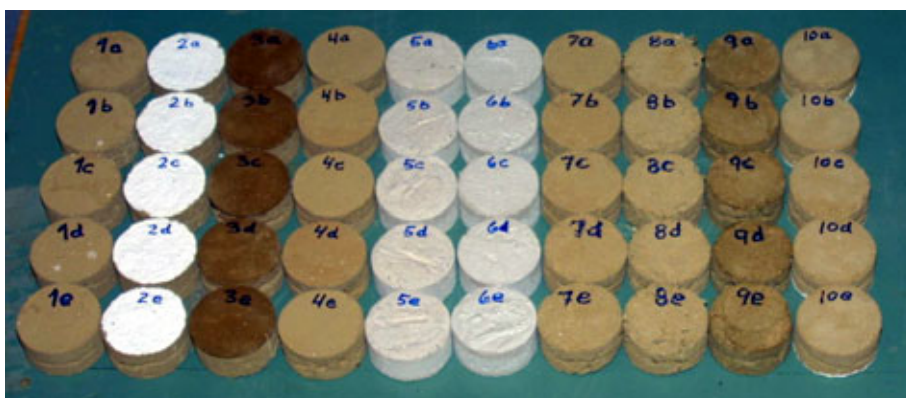
Dansk resumé

En væsentlig fugtrelateret risiko for halmvægge består i, at fugtig indeluft om vinteren, på grund af den manglende dampspærre, kan trænge ud i væggen og på grund af at afkølingen kondenserer i halmen. Herved starter en nedbrydning af halmen. Denne risiko er undersøgt ved laboratorieforsøg, dels ved måling af vanddampdiffusionsmodstanden (Z-værdien) for forskellig pudstyper og for halmen, dels ved simulering af vinterklima i en varm-koldkasse for en halmvæg med lerpuds på indersiden og henholdsvis lerpuds og kalkpuds på ydersiden.

Table 3 og table 4 viser Z-værdier for pudstyper. De fleste overfladebehandling og additiver har kun forsvindende lille indflydelse på Z-værdien. Det er væsentligt, at Z-værdien for den indvendige puds er højere end for den udvendige, dvs. at fx cementholdig puds ikke bør anvendes på ydersiden, medmindre indersiden også er meget tæt og specielt fri for revner.

Z-værdien for en almindelig halmballe er omkring $2 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ i begge retninger, altså på niveau med de fleste pudslag.

Forsøget i varm-koldkassen viste, at der selv ved langvarig påvirkning med vinterklima (0°C og $85\% \text{ RH}$ på ydersiden og 25°C og $45\% \text{ RH}$ på indersiden) ikke skete fugtophobning, der førte til kritiske vandindhold i halmen. Da opstillingen blev adskilt umiddelbart efter forsøgets afslutning, kunne der ikke konstateres nogen tegn på nedbrydning af halmen. Der er en tendens til at den del af væggen, der er pudset med kalkpuds på ydersiden er lidt mindre fugtig, end den del der er pudset med ler. Dette er i overensstemmelse med, at Z-værdien for den anvendte kalkpudstykkelse, ca. 20 mm er lidt mindre end for lerpudstykkelsen, ca. 40 mm.



Figur 41. Vanddamppermeabiliteten testes ved kopforsøg på 10 forskellige materialesammensætninger. Numrene svarer til emnenumrene i table 3.

En anden risiko udgøres af regnpåvirkning, hvis vandet kan trænge ind i halmen. Denne risiko må primært fjernes ved konstruktiv beskyttelse, fx tagudhæng, og ved at sikre at det udvendige pudslag er fri for revner. En lille vandoptagelsesevne kan også reducere fugtpåvirkningen af halmen lidt. Forskellige pudstyper og overfladebehandlinger giver forskellig vandoptagel-

se, som det fremgår af table 6, der dog ikke indeholder værdier for lerpuds, der må forventes at kunne optage mere vand end de angivne pudstyper.



Figur 42. Opbygning og afretning af halmvægge med vinkelsliber i forbindelse med opbygning af Varm-kold kasse på By og Byg beregnet til test af fugtphobning.



Figur 43. Varm-kold kasse på By og Byg. Her testes fugtphobningen i halmvægge med to forskellige pudstyper (ler- og kalkpuds).

Moisture and condensation in straw bale walls

A major potential moisture related risk for straw bale walls is condensation on the inner side of the outside stucco during winter time, when water vapour diffusing through the wall from the inside is cooled down to below its point of condensation. In the following this risk is evaluated on the basis of laboratory tests.

Another risk is penetration of rain. This should primarily be dealt with in design, e.g. roof overhang, but some interesting results from the literature on water absorption are summarised.

As part of the present study two types of test were carried out, the vapour transmission for stucco and straw and a direct study of moisture in a wall subjected to winter conditions in a 'hot-cold box'.

Stucco

The water vapour resistance Z for approximately 40 mm thick samples of stucco based on clay or lime were determined in accordance with EN ISO 12572 (Dansk Standard, 2001). The samples were manufactured by an experienced straw bale builder in rings of diameter 80 mm. The samples consist of two layers of stucco and potential surface treatment. For the clay based stucco different additives and surface treatments were investigated. All stucco types were tested at high relative humidity (RH), between 50 and

94 % (wet conditions). Some were also tested at low RH, between 0 and 50 % (dry conditions). The results reported in (Statens Byggeforskningsinstitut, 2002a) are summarised in Table 3.

Table 3. Z-values for clay and lime stucco with different surface treatments or additives and for wet and dry conditions. The values refer to 40 mm thick samples. All values are an average of five measurements. The standard deviation is about 0.1 GPa s m²/kg. Clay plaster was mixed from dry clay powder and sharp edged sand 0-4 mm in mixture 5:9 by volume. The amount of additives mentioned is also by volume.

Sample	Z, GPa s m ² /kg	
	Wet	Dry
1 Clay plaster	1.6	2.4
2 Clay plaster with 5 layer of whitening	1.7	2.4
3 Clay plaster painted with linseed oil	2.6	3.5
4 Clay plaster mixed with linseed oil, 1 %	2.5	3.1
5 Lime, coarse (0-4 mm)	2.1	2.2
6 Lime, fine (0-2 mm)	3.0	-
7 Clay plaster mixed with chopped paper, 5 %	1.8	-
8 Clay plaster mixed with chopped straw, 30 %	1.8	-
9 Clay plaster mixed with cow manure, 25 %	1.5	-
10 Clay plaster painted with silicate paint system, four layers	2.5	-

For all the combinations with clay plaster tested at both moisture levels showed, as expected, that the permeability increased with the moisture content. This means that the same stucco applied to both sides of a wall effectively ensures that the wall is more permeable on the outside than on the inside, as recommended.

(Straube, 2000) has carried out similar tests for stucco types with different content of cement and lime, and with different surface treatments and additives. The results are shown in Table 4. The values are determined between 75 and 100 % RH in order to simulate the conditions for the outside stucco during winter.

Table 4. Z-values for different stucco and treatments. (Straube, 2000).

Sample	Thickness, mm	Z, GPa s m ² /kg
Cement:Sand		
1:3 datum	43.5	25.6
1:3 elastomeric	39.5	25.0
1:3 siloxane	41.0	25.0
Cement:Lime:Sand		
1:6:6 datum	35.0	3.4
1:6:6 linseed	36.0	4.5
1:6:6 elastomeric	32.5	4.1
1:6:6 siloxane	41.0	4.9
1:6:6 calcium stearate	53.5	12.3
1:6:6 calcium stearate	44.0	7.0
1:6:6 calcium stearate	53.5	24.4
1:6:6 latex paint	36.5	4.9
1:6:6 oil paint	40.0	24.4
Cement:Lime:Sand		
1:2:9 datum	50.5	3.4
1:2:9 linseed	50.5	3.9
Lime:Sand		
1:3 datum	33.5	1.8
1:3 datum	35.5	1.9
1:3 quicklime	32.0	2.2

It is seen that for clay and pure lime plaster Z-values of 2-3 GPa s m²/kg are obtained almost independently of treatments. The Z-value increases with the cement content, but values that approach those of a normal water vapour barrier are only obtained with the pure cement plaster. The only additives which seem to influence the permeability are calcium stearate (2 % of cement content) and oil paint. These treatments and pure cement plaster should obviously not be used on the outside of the wall. However, used on the inside they might improve the moisture performance of the wall.

As the cement-lime plasters require thinner stucco than clay and pure lime plasters, the Z-value of the stucco layer is likely to be 2-4 GPa s m²/kg except for a few additives and for pure cement stucco. The Z-value will be slightly lower on the outside (wet side) than on the inside (dry side).

Straw

The moisture transmission properties of 72 mm thick layer of straw was also determined according to EN ISO 12572 (Dansk Standard, 2001) for the high moisture level, between 50 and 100 % RH (Statens Byggeforskningsinstitut, 2002b). The method in the standard had to be modified as the prescribed air velocity in the test chamber initially caused airflow through the test specimen due to the low air flow resistance. The water vapour resistance for 72 mm was found to be $Z = (0.5 - 0.1) \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ perpendicular to the straw and $Z = (0.3 - 0.1) \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ parallel to the straw. For a normal straw bale, 360 x 450 mm, the Z-value for the whole bale was approximately 2 GPa s m²/kg in both directions. This is almost the same resistance as each of the stucco layers will have.

Warm-cold box test

Furthermore, a wall section 1.3 x 1.5 m with the straw parallel to the heat flow was tested in a 'hot-cold box', a chamber somewhat similar to a hot box where temperature and humidity can be prescribed on each side of the wall. The tests are reported in (Statens Byggeforskningsinstitut, 2002c).

On the warm side (inside) the temperature was about 25°C and the humidity approximately 45 % RH. On the cold side (outside) the temperature was about -1°C and the humidity approximately 85 % RH. The wall section was divided into two parts. Both halves of the inside were plastered with approximately 40 mm clay stucco with chopped straw. On the outside, one half was plastered similar to the inside while the other half was plastered with 20 mm lime stucco.

The temperature and the moisture content were measured at different depths of the wall. The moisture was measured by means of wood probes with a known relation between the electrical resistance and the moisture content in the wood. It was assumed that the moisture content was the same for the straw as the absorption properties are very similar for wood and straw, at least up to approximately 80 % RH. The moisture measurements are expressed as 'percent wood moisture'.

Figure 44 shows the moisture content measured by wood probes in the air on the warm and the cold side and the moisture content measured by probes embedded in the straw closest to the outside for each half of the wall. The actual depth for each probe was determined by assuming that the temperature gradient was linear over the straw thickness. In the part with clay stucco on both sides the probe was placed 25 mm from the outside surface, whereas it was placed 40 mm from the outside surface in the lime stucco part. Figure 45 shows the air temperature on the warm and on the cold side.

The test had been running for a quite extensive period and was interrupted for about 40 days during which the wall dried out to summer-like conditions.

The major observation was that for the part with lime stucco the moisture level in the straw near to the outside surface seemed to be equal to, or

slightly lower than, the moisture level of the outside air, whereas it was higher on the part with clay stucco on the outside.

This was confirmed by direct measurements of the moisture content in samples of the stucco taken from the wall immediately after the test was interrupted. The inside clay stucco had a moisture content by weight of 0.6 % which equals about 50 % RH, which was close to the 45 % RH in the air on the inside. The lime stucco had a moisture content of 1.05 % by weight, which equals approximately 90 % RH. The clay stucco on the outside surface contained more than 1.5 % which equals close to 100 % RH. Therefore the trend shown by the moisture content of the probes was confirmed.

The difference in the probe measurements could partly be due the different depth of the probes. 80 mm behind the clay stucco the moisture content was 15 % but it was 20 % 25 mm behind the stucco around day 100. The moisture content of the straw decreased rapidly with the dept from the outside surface. An estimation showed that the moisture content 40 mm behind the clay stucco was approximately 18 %, somewhat more than the 16.5 % measured 40 mm behind the lime stucco.

It should be mentioned that, when the wall was dismantled it was observed that there was no sign of mould growth behind the outside stucco. Furthermore, the straw in close proximity to the outside stucco had kept its sound yellow colour on both sides and the smell was still like fresh straw.

Table 3 shows that the lime stucco was less permeable than the clay stucco with the same thickness, but the thickness of the lime stucco could be thinner. The thickness was no more than approximately 20 mm in the hot-cold box test, so that the Z-value was about $1.2 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ for the lime stucco whereas it was approximately $1.8 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ for the clay stucco.

The Z-value of the straw, approximately $2 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$, can be added to the Z-value of the inside stucco, approximately $2.5 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ so that the water vapour resistance against condensation on the inner side of the outside stucco is about $4.5 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$. Relative to this quite small value an outside resistance of 1.2 in stead of $1.8 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ might make a difference and thereby explain the different behaviour of the two parts.

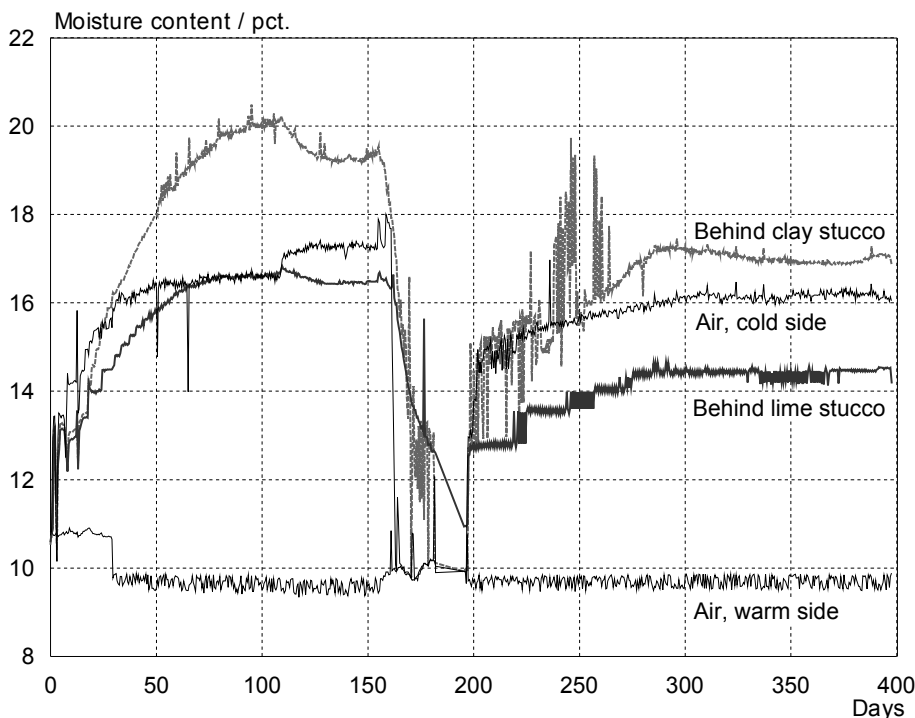


Figure 44. Moisture content by weight measured by a wood probe in the air on the warm and on the cold side of the wall in the hot-cold box and the moisture content approx. 25 mm behind the clay stucco and 40 mm behind the lime stucco on the cold side. The measurement behind the clay stucco was severely affected by electrical noise for several periods.

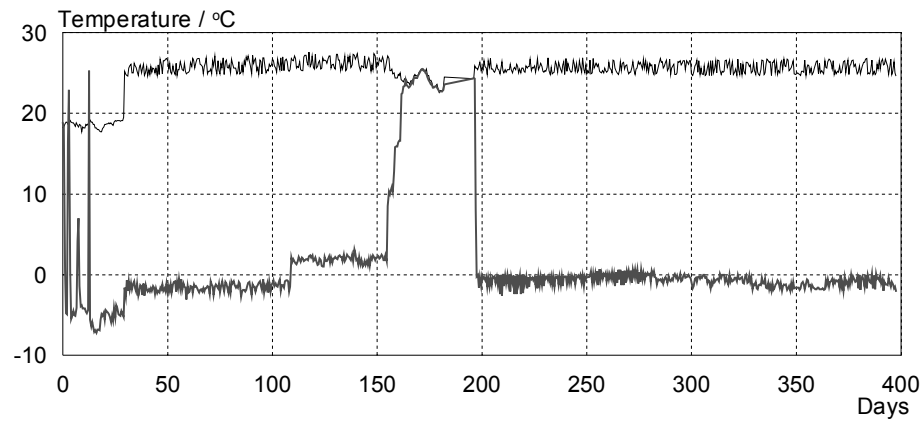


Figure 45. Air temperature on the cold and the warm side of the wall in the hot-cold box.

Figure 44 and Figure 45 show that the climatic conditions in the box were not stable during the first 30 days meaning that the behaviour was difficult to evaluate. It appeared that the moisture content in the probes had stabilised near day 100.

Shortly after a change in the operation of the cooling aggregate caused the temperature at the cold side to increase some 3°C. It also changed the humidity on the cold side. Figure 44 shows that the moisture content of the wood probe in air on the cold side increased. Table 5 shows that the partial water vapour pressure on the cold side increased by some 150 Pa about day 110, meaning that the differential pressure between the warm and the cold side decreased. This difference is the force driving water vapour from the warm side to the cold side. When it decreased the wall started to dry as is clearly seen from Figure 44.

Table 5. Climatic conditions in hot-cold box for periods with stable conditions. p_s is the water vapour pressure at saturation for the observed temperature, p_v is the partial water vapour pressure at the actual relative humidity. The difference is the driving force.

Period Days	Warm side				Cold side				Difference	
	T, °C	p_s , Pa	RH, pct.	p_v , Pa	T, °C	p_s , Pa	RH, pct.	p_v , Pa	Dp_v , Pa	
73-102	24.8	3132	46.3	1450	-1.8	526	85.0	447	1003	
103-108	25.0	3169	48.0	1521	-1.5	540	83.9	453	1068	
110-134	25.3	3245	45.1	1463	1.7	392	88.8	614	822	
229-259	25.0	3169	44.0	1394	-1.1	558	83.5	466	928	
260-285	24.9	3151	44.8	1412	-1.0	562	84.7	476	936	
286-316	24.6	3095	43.5	1346	-1.0	562	86.0	483	863	
349-379	24.8	3132	43.2	1353	-1.4	544	85.2	463	890	

The period after the interruption, starting just before day 200, is easier to interpret. It is seen that the moisture content of the straw increased quite fast, in a way very similar to the moisture of the air on the cold side, but approaching different levels. The slow increase of the air humidity indicated that the moisture level of the straw might have increased faster if the air had been more humid than approximately 80 % RH as it was.

Water absorption

(Straube, 2000) has also measured the water absorption for the different types of stucco. This value can be used to evaluate how much water exposed parts of the wall might take up from a rainfall. The results are shown in Table 6.

High cement content reduced the suction, but it also increased the Z-value to an unsatisfying level. Of the different treatments siloxane seemed very appropriate because it reduced the suction very efficiently but it did not affect the permeability significantly. Elastomeric, latex and oil paint all re-

duced the suction significantly, whereas the effect of linseed oil and calcium stearate was very limited (oil paint should not be used on the outside as mentioned earlier).

Table 6. Capillary suction for different stucco and treatments. (Straube, 2000).

Sample	Suction, kg/m ² s ^{0.5}
Cement:Sand	
1:3 datum	0.0378
1:3 elastomeric	0.0085
1:3 siloxane	0.0004
Cement:Lime:Sand	
1:6:6 datum	0.0917
1:6:6 linseed	0.0665
1:6:6 elastomeric	0.0146
1:6:6 siloxane	0.0006
1:6:6 calcium stearate	0.1005
1:6:6 calcium stearate	0.0833
1:6:6 calcium stearate	0.0934
1:6:6 latex paint	0.0197
1:6:6 oil paint	0.0140
Cement:Lime:Sand	
1:2:9 datum	0.1100
1:2:9 linseed	0.1052
Lime:Sand	
1:3 datum	0.1273
1:3 datum	0.1725
1:3 quicklime	0.1608

Praktiske erfaringer

Der er foretaget fugtmålinger i et udhus isoleret med halm i såvel væg som tag (Højer Pedersen, 2001). Der er anvendt dampspærre i en del af taget og opsat regnskærm på en del af ydervæggene.

Målingerne er foregået i vinteren 2000/2001. Luftfugtigheden i huset er ved befugtning bragt op på et niveau svarende til beboelse, mens temperaturen har været 16-18°C. Fugtindholdet i halmen nær vægindersiden er målt til 13-14 %. Det er noget højere end målt ved forsøgene i varm-koldkassen (11 %), og viser at fugtindholdet i indeluften har været ret højt.

Målingerne indikerer:

- 1 Fugtindholdet i taget nær halmens yderside afhænger ikke af, om der er anvendt dampspærre eller ej.
- 2 Fugtindholdet i ydervæggene afhænger primært af de udvendige forhold, specielt reducerer en ventileret regnskærm uden på pudsens fugtindholdet med omkring 5 %. Forskellige malerbehandlinger af den indvendige puds (cementmørtel) syntes ikke at have indflydelse på fugtindholdet nær ydersiden.

Det er især overraskende, at dampspærren i taget ikke ændrer nævneværdigt på fugtforholdene. Regnskærmen på ydervæggene reducerer naturligvis regnpåvirkningen, men fugtindholdet i væggen yderside burde fortsat afhænge af tætheden af den indvendige beklædning, hvilket ikke kan observeres af målingerne.

Sætninger i halmvægge

Når halmvægge bruges som bærende vægge, altså uden stolpekonstruktion til at bære taget, er der konstateret betydelige sætninger i væggene. Disse sætninger forventes især at ske i forbindelse med ændringer i halmens fugtindhold. Sætninger og bevægelser i ikke-bærende halmvægge kan også være af betydning for revnedannelser. Der er derfor udført forsøg, hvor en ikke-bærende og en bærende halmvæg udsættes for vekslende luftfugtighed.



Figur 46. Halmvæg til sætningsmåling (før pudsnings) i traditionelle baller tv. og i bigballer th.

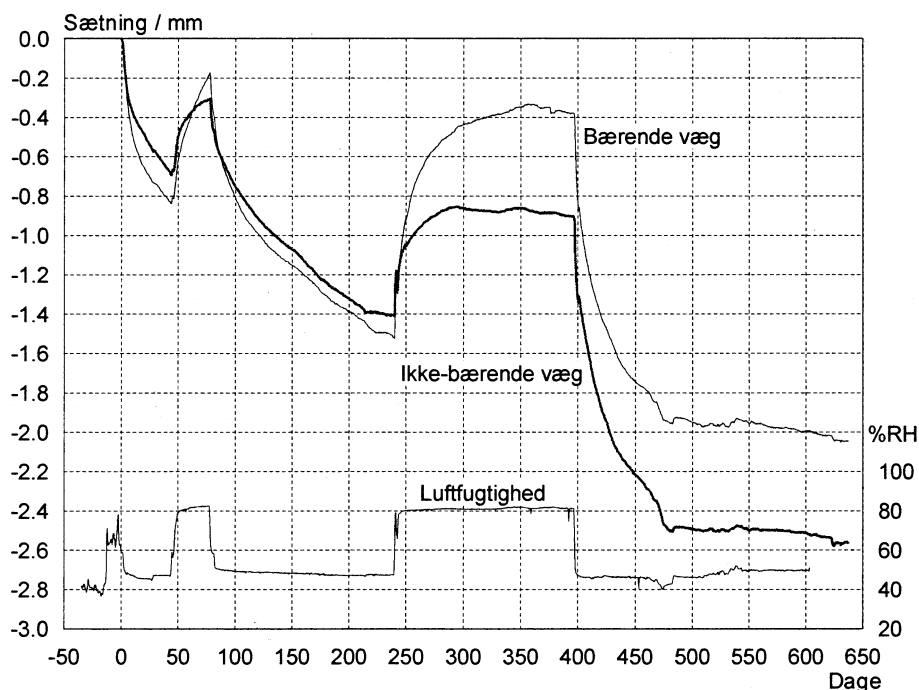
Der er opbygget to vægge, én i almindelige baller hvor belastningen er lig med egenvægten, og én i de lidt hårdere pressede bigballer belastet svarende til vægten af et tag. Begge vægge er pudset med ca. 40 mm lerpuds på begge sider som de øvrige testemner. Væggene er opbygget i et klimakammer, hvor den relative luftfugtighed varieres mellem 50 og 80 %. Forsøgene er rapporteret i (Statens Byggeforskningsinstitut, 2002d).

Væggene er henholdsvis 1,8 m og 1,7 m høje på grund af begrænset lofthøjde i klimakammeret. Den ikke-bærende væg belastes med 42 kg/m svarende til egenvægten af den manglende del af normal væghøjde (3 m). Den bærende væg belastes med 5 kN/m (500 kg/m). Lasterne påføres tilnærmeth jævnt fordelt over halmens overside. Pudsens belastes ikke direkte.

Den bærende væg satte sig ved påføringen af belastningen øjeblikkeligt lidt over 40 mm og sætningen øgedes i løbet af de første 10 dage til knap 60 mm, hvorefter den forblev uændret de følgende 15 dage. Første pudslag var påført samme dag som lastpåførelsen skete, og sætningen forårsagede mindre skader på pudsens. Pudsens blev efterfølgende reetableret. Den ikke-bærende væg satte sig kun ubetydeligt ved lastpåførelsen. Efter lastpåførelsen gik der ca. 50 dage, før de egentlige målinger blev påbegyndt i forbindelse med, at luftfugtigheden blev reduceret til 50 % RF. Resultaterne ses i figur 47.

Det ses, at udtørring giver sammentrykning og opfugtning ekspansion. Ekspansionen er lidt mindre end sammentrykningen. Dette gælder for begge vægge. Kurverne er middel af to målinger, der er noget forskellige, så målin-

gerne for de to vægge faktisk overlapper hinanden. Forskellen på sætningerne kan derfor være mindre end kurverne antyder.



Figur 47. Sætninger i bærende og ikke-bærende halmvæg samt luftfugtighed i rummet. Lasten er påført omkring dag -50.

Resultaterne tyder på, at sætningen primært styres af pudsens fugtbevægelser. Da pudsens er langt stivere end halmen, vil last påført oversiden af halmen føres over til pudsens i den øvre del af væggen. En opfugtning af halmen vil give en ekspansion, der medfører en delvis aflastning af pudsens.

Ved første opfugtning, der varede ca. 30 dage, ses, at der ikke er opnået ligevægt. Heller ikke under den følgende udtørring i ca. 160 dage opnås ligevægt. Den anden opfugtning nærmer sig tilsyneladende ligevægt efter godt 100 dage. Under den efterfølgende udtørring sker sammentrykningen hurtigere, formentlig fordi vandindholdet i væggen er større end efter første opfugtning.

Et utilsigtet fald i luftfugtigheden omkring dag 460 forårsager en forøgelse af sammentrykningshastigheden. Det har tilsyneladende blot accelereret tiden til ligevægt, da sætningen stabiliseres efter luftfugtigheden øges til det tilsigtede niveau.

Måling af det absolutte fugtindhold i halmen med trædyvler viser, at vandindholdet lige bag pudsens kun varierer mellem ca. 11 og 13 % og endnu mindre inde i væggen. Ifølge sorptionskurven svarer ligevægt med henholdsvis 50 og 80 % RH til vandindhold på ca. 10 og 17 %. Når der tilsyneladende er opnået ligevægt, skyldes det formodentlig, at kun pudsens er i ligevægt men ikke halmen. Det kan skyldes, at fugten har svært ved at trænge ind i halmen, når der ikke er nogen temperaturgradient, som der vil være i ydervægge. Forsøgene i varm-kold kassen viste, at halmen tørrede ret hurtigt ud ved nedsættelse af luftfugtigheden.

Sammenfattende kan det konstateres, at sætningerne som følge af fugtændringer vil være ret små. Det skal bemærkes, at væggene ikke var spændt sammen i lodret retning, som man normalt gør. Sammenspændingen ses at være væsentlig for bærende vægge, hvis man skal undgå at pudsens beskadiges ved snefald, der kan øge lasten på væggene betragteligt især ved taghældninger under 35°-40°. Sammenspænding af ikke-bærende vægge øger deres stabilitet og kan lukke mindre vandrette sprækker, men vil kun have ringe indflydelse på sætningerne, da de tilsyneladende primært skyldes pudsens fugtbevægelser.

Brandmæssige egenskaber af lerpudset halm

De brandmæssige forhold er naturligvis af stor interesse for halmbaserede byggerier. Der er to brandmæssige forhold, der er interessante, nemlig konstruktionsdelens brandmodstandsevne og beklædningens brandbeskyttelsesevne.



Figur 48. Opbygning af halmvæg beregnet til test af brandbeskyttelsesevne.

Kravet til brandmodstandsevnen af ydervægge i fx enfamiliehuse er BD 30. Det betyder, at væggen i 30 minutter skal kunne modstå en defineret brandpåvirkning (standardbrand) uden at miste sin adskillende funktion og samtidig sikre, at temperaturen på den ikke-brandeksponerede side ikke overstiger fastsatte værdier.

Når der anvendes isolering, der ikke er klasse A materiale (dvs. 'brændbar isolering') skal beklædningen, her lerpudsen, samtidig være en klasse 1 beklædning, hvilket betyder, at den skal have en meget lav brændværdi, og at den udsat for en defineret brandpåvirkning i 10 minutter skal bevare sin sammenhæng, samtidig med at den hindrer beskadigelse af halmen. Det er naturligvis væsentligt, at al halm er dækket af lerpuds.



Figur 49. Lerpudset halmvæg efter test af brandbeskyttelsesevne af lerpuds på halm.

Der er udført forsøg til fastlæggelse af brandmodstandsevnen af en lerpudset halmvæg og lerpudsens brandbeskyttelsesevne. Forsøgene er rapporteret i rapporter fra (Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut, 2001a, b).

Brandbeskyttelsesevne

Vedrørende brandbeskyttelsesevnen viser forsøget, at lerpuds på halm med i gennemsnit 30 mm lerpuds på begge sider (tykkelsen varierer mellem 15 og 60 mm), opfylder kravene til klasse 1 beklædning. Det har næppe haft betydning for opfyldelsen af kravene, at testemnet også var pudset på den ueksponerede side.

Brandmodstandsevne

Brandmodstandsevnen blev bestemt for en væg opbygget som vist på figur 51. Væggen indeholder dels 100 x 100 mm stolper, som gennembyder lerpudsen på den brandeksponerede side, dels stolper opbygget af brædder samlet med hulplader i stål inde i væggen. Det var forventet, at det mest kritiske ved prøvningen ville være indbrændingen ved de eksponerede stolper, herunder om indbrændingen ville være tresidig. Prøvningen blev derfor afbrudt efter 30 minutter og branden slukket, for at indbrændingsmønstret kunne observeres.

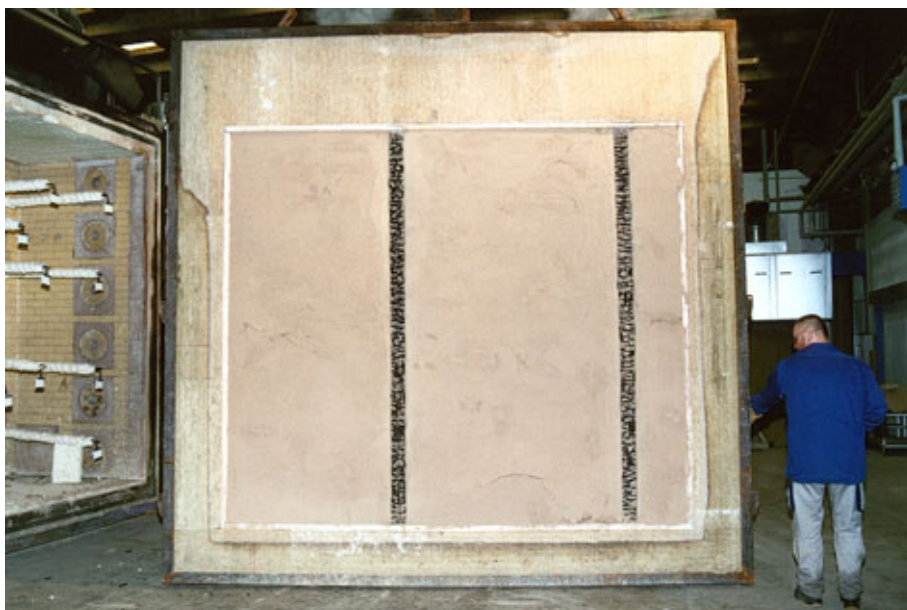
Afprøvningen viste, at væggen opfyldte kravene til BD-væg 30. Temperaturstigningen på den ueksponerede side var højst 1 °C, hvor den tilladte middelstigning for de fem målepunkter er 140 °C.

Der blev konstateret flammer fra de brandeksponerede træstolper efter 10 minutter. Stolperne brændte kun ind fra én side og indbrændingsdybden blev målt til 17-20 mm. I henhold til trænormen, DS 413:1998, er indbrændingshastigheden for nåletræ 0,75 mm/min svarende til 22,5 mm i løbet af 30 minutter. De bræddeopbyggede stolper inde i væggen blev ikke påvirket af branden under forsøget.

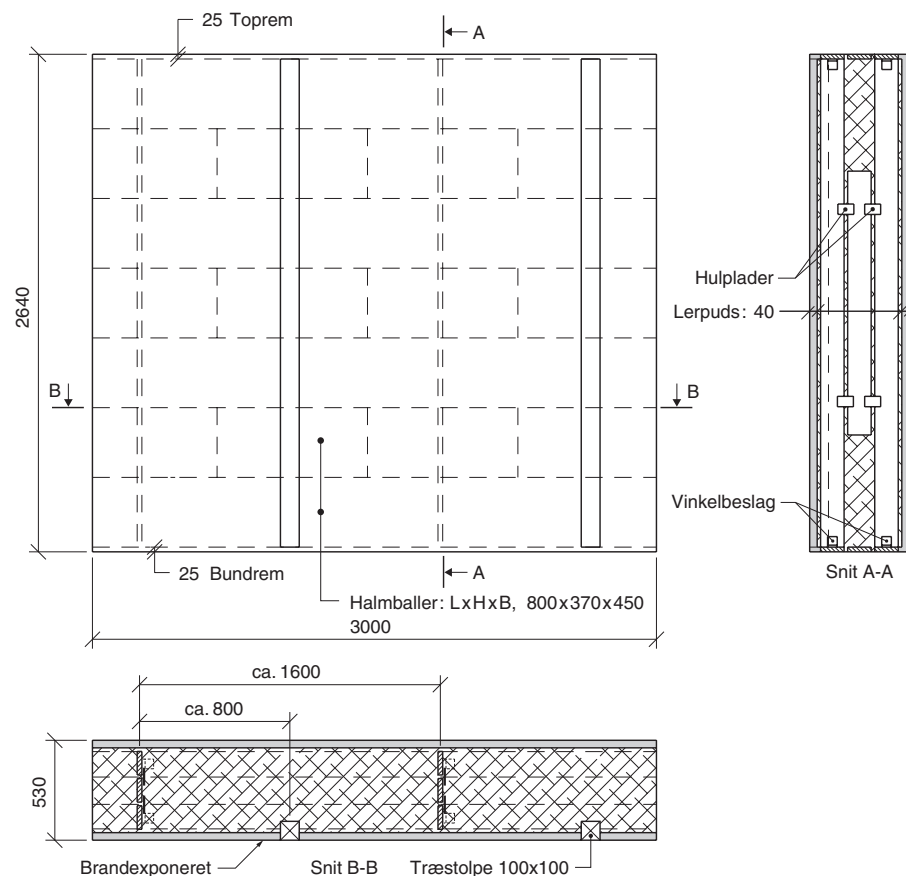
Sammenfatning af danske forsøg

Forsøget viser, at trækonstruktioner placeret inde i væggen, beskyttet af lerpudsen, ikke påvirkes af brand i løbet af de første 30 minutter, og derfor heller ikke får reduceret deres bæreevne. Lerpudsen beskytter også siderne af brandeksponerede trækonstruktioner, således at de kun brænder ind fra én side. Restbæreevnen i brandtilfældet kan bestemmes af trænormen.

Prøvningen antyder, at brandmodstandsevnen uden eksponerede trækonstruktioner vil være betydeligt større end 30 minutter.



Figur 50. Lerpudset halmvæg anvendt ved bestemmelse af brandmodstandsevne. Det bemærkes specielt, at der ikke er sket indbrænding mellem træstolperne og pudsens overflade.



Figur 51. Plan, snit og opstalt af testemne til bestemmelse af brandmodstandsevne.

Østrigske forsøg

Som en del af projektet Haus der Zukunft i Østrig (Wimmer et al., 2001) er der udført brandtekniske prøvninger med halm og halmvægge. Forsøgene er udført efter ÖNORM, der ikke adskiller sig væsentligt fra de tilsvarende danske og europæiske prøvningsmetoder.

Halm som materiale er prøvet for brændbarhed og fundet at opfylde kravene til den østriske klasse B2 (normalbrandbart). Dette svarer omtrent til et klasse B materiale efter dansk klassificering. Prøvningen er udført med hvedestrå og både med densiteten 90 og 120 kg/m³.

Desuden er brandmodstandsevnen af en halmvæg afprøvet for en væg opbygget med et træskelet inde i halmen med samme bredde som halmballernes tykkelse. Til skelettet var der på begge sider fastgjort 20 mm forskallingsbrædder. På den brandeksponerede side var forskallingen opsat uden mellemrum, og uden på forskallingen blev opsat rørvæv og 20 mm lerpuds. På den anden side var forskallingen spredt, og der blev anvendt kalkpuds. På begge sider var opsat dampbremse mellem halmen og forskallingen.

Væggen blev klassificeret som F90 med østrigske betegnelser, omtrent svarende til BD-væg 90, ikke-bærende med danske betegnelser. Observationer under prøvningen viste, at lerpudsen allerede begynder at falde af efter ca. 10 minutter, efter 25 minutter brænder forskallingen og den begynder at falde ned efter godt 40 minutter.

Pudsen sidder således væsentligt dårligere fast på rørvæv og forskalling, end når den som i den danske prøvning er påført direkte på halmballerne. Det bemærkes, at halmen i den sidste halvdel af forsøgsperioden stort set ikke har været beskyttet på den brandeksponerede side. En upudset halmvæg kan derfor formodes at kunne opfylde kravene til BD-væg 30, ikke-bærende (men naturligvis ikke kravet om at brændbar isolering skal være dækket af klasse 1 beklædning).

Brand i halmhuse

I et enkelt tilfælde er et dansk halmhus totalskadet ved brand (Halmhus gav store problemer, 2001). Der var tale om et hus, der ikke var færdigbygget, hvor der gik ild i en presenning, som dækkede en manglende afslutning omkring et ovenlysvindue. Ilden inde i huset blev hurtigt slukket af beboerne, men branden bredte sig til spalten mellem halmisoleringen i taget og tagdækningen af stålplader på grund af den manglende afslutning. Halmen var ikke pudset på oversiden, da det ikke er noget krav ved anvendelse af brændbar isolering.

Nedbrændingen skyldtes primært, at brandvæsenet ikke havde udstyr til at fjerne tagdækningen, så udbredelsen af branden på grund af røggasser kunne standses. Nedbrændingen skete særdeles langsomt, således at det meste bohaves uden risiko kunne reddes.

Hvis huset havde været færdiggjort med korrekte vinduesindækninger, ville branden næppe være opstået og slet ikke have nået at brede sig til taget. Et tyndt lag lerpuds på oversiden af halmisoleringen ville naturligvis også have hindret udbredelsen af branden. En sådan puds vil formentlig også forbedre varmeisoleringsegenskaberne som tidligere nævnt.

Andre typer tagdækning, som fx tagpap på underlag af brædder eller plader, ville også have hindret røggasser i at sprede sig, da spalten mellem isolering og tagdækning ikke er sammenhængende, idet tagunderlaget lukker hen over spærerne. Samtidig kunne brandvæsenet lettere have fjernet denne type tagdækning, da den ikke bliver opvarmet så hurtigt.

Skadens omfang skyldes således et sammenfald af mange uheldige omstændigheder og bør ikke give anledning til generel bekymring vedrørende halmhuses brandmæssige egenskaber.

Lydisolering for halmvægge

Lydisolationen af lerpudsede halmvægge er målt i et bestående hus (Delta, 2001). Der er målt både på en væg med liggende halmballer (stråene vinkelret på væggens plan) og på en væg med stående halmballer (stråene parallelle med væggens plan). I begge tilfælde er der ca. 40 mm lerpuds på hver side af væggen.

I det første tilfælde er lydisoleringen udtrykt ved reduktionstallet fundet til $R'_w = 52$ dB og i det andet tilfælde til $R'_w = 46$ dB. Det andet resultat påvirkes væsentligt af hemse i begge rummene, som er båret af træskelettet inde i væggen. DELTA vurderer, at en udførelse med vægt på at reducere flanke-transmissionen kan opnå værdier på 53-54 dB, uafhængigt af stråretningen.

Til sammenligning kan nævnes, at kravet for lejlighedsskel i etageejendomme er 52 dB, mens kravet til vægge mellem rækkehuse opført efter Bygningsreglement for småhuse er 55 dB. Det sidste krav kan altså ikke forventes at kunne opfyldes. Det skal også bemærkes, at vægge der kun lige opfylder kravene, ikke opleves som tilfredsstillende af beboerne.

Til de fleste andre anvendelser vil halmvægge have en tilfredsstillende lydisoleringsevne. Inden for en bolig er reduktionstallet særdeles tilfredsstillende, og den effektive lydisolation vil i praksis formentlig afgøres af dørene.

Arbejdsmiljø ved byggeri med halmballer

Ved arbejde med organiske isoleringsmaterialer er disses potentiale for afgivelse af organisk støv og mikroorganismer af væsentlig betydning for arbejdsmiljøet. Med henblik på at skønne personeksponering for og rumkoncentration af støv og mikroorganismer har AMI (Arbejdsmiljøinstituttet) monteret måleudstyr på forsøgspersoner (halmbyggere) og samtidig målt med en stationær opstilling i rummet. Målingerne blev foretaget i forbindelse med opbygning af halmvægge på By og Byg og foregik indendørs over en arbejdsdag. Resultaterne er rapporteret i (Møller, 2001). Lignende undersøgelser for andre celluloseholdige isoleringsmaterialer er rapporteret i (Breum et al., 2002).

På baggrund af resultaterne må man konkludere, at mikrobielle støvniveauer og koncentrationer af organisk støv var høje i forbindelse med halmbyggeriet. Således blev Arbejdstilsynets grænseværdi for personeksponering - 3 mg/m^3 for organisk støv med partikelstørrelser mindre end $20 \mu\text{m}$ - væsentligt overskredet ved personbåret måleudstyr, idet alene koncentrationen af støv med partikelstørrelse mindre end $10 \mu\text{m}$ nåede over 4 mg/m^3 . Støvniveauet i indåndingszonen under fysisk aktivitet er generelt højere end den generelle rumkoncentration målt i en stationær opstilling. Der er ikke i Danmark fastsat nogen grænseværdi for respirabelt organisk støv (partikelstørrelse mindre end $4 \mu\text{m}$), men i Norge er fastsat en værdi på $0,2 \text{ mg/m}^3$. Denne værdi blev overskredet henholdsvis tre og fem gange i den stationære opstilling og i det personbårne udstyr.

Resultaterne viser en tydelig sammenhæng mellem støvkonzentrationen og de vekslende typer arbejdsprocesser og disses varighed. Især medvirkede arbejdet med tilretning og afretning af halmvægge med vinkelsliber og kratrydder til stærkt forøgede støvkonzentrationer.



Figur 52. Måling af støv- og svampesporepotentiale ved opbygning af halmvægge på By og Byg.

Forsøgene blev udført med brug af halmballer, som var velbjærgede dvs. friske, tørre og gule. Det har formentlig haft en positiv effekt på niveauet af

skimmelsvampe, der ikke nåede de højder, der kan findes i forbindelse med landbrugsarbejde med korn og halm med skimmelvækst. Trods en i øvrigt pæn halmkvalitet, må de målte støvniveauer vurderes som høje nok til at kunne udgøre en helbredsrisiko i forbindelse med eksponering over lang tid.

Normalt foregår halmhusbyggeriet ikke indendørs som ved målingerne, og derfor vil støvkoncentrationen være mindre i praksis. Resultaterne viser dog klart, at bearbejdning af halmen skal ske, hvor der er meget god ventilation. Mest mulig af bearbejdningen bør derfor ske før, at døre og vinduer monteres. Afretning med vinkelsliber og kratrydder bør helt undgås. En elektrisk hækklipper kan eventuelt anvendes i stedet.

Det er vigtigt at anvende halmballer af god kvalitet, specielt skal det sikres, at de ikke har været opfugtede. Hvis ballerne er grå, er de ikke egnede til byggeri. Der skal være færrest mulige kærnebærende aks i halmen, da kærnerne udgør en næringskilde for mikrobielt liv. Anvendelse af åndedrætsværn må anbefales, især for personer der arbejder med halmbyggeri i længere tid.

Varmeledningsevne for muslingeskaller

Blåmuslingeskaller anvendes i halmhuse hyppigt som varmeisolerende lag i terrændæk. Basisvarmeledningsevnen λ_{10} er bestemt for hele skaller, nedknuste skaller og nedknuste skaller hvor de små partikler er frasigtet (Teknologisk Institut, 2001g, h, i). Resultaterne fremgår af tabel 7.

Tabel 7. Varmeledningsevne for hele og nedknuste blåmuslingeskaller.

	Aktuel rumvægt kg/m ²	Varmeledningsevne W/mK
Hele skaller	307	0,120
Knuste skaller	655	0,112
Knuste skaller frasigtet bundfraktion	555	0,112

Det ses, at varmeledningsevnen reduceres lidt, når skallerne knuses. Dette skyldes formentlig, at hulrummene bliver mindre. Forbedringen af varmeisoleringssevnen er dog marginal. Det har ingen betydning, om de fine partikler fjernes fra de knuste skaller.

Da der må forventes nogen variation i materialeegenskaberne, anbefales det at benytte $\lambda = 0,13$ W/m, som en forsigtigt ansat værdi ved bestemmelse af varmeisoleringssevnen af terrændæk isoleret med muslingeskaller uanset eventuel nedknusning.

Muslingeskaller kan kun benyttes som isoleringsmateriale i vandrette eller næsten vandrette konstruktioner, da modstanden mod luftstrømning er forsvindende. I lodrette konstruktioner vil konvektionstabt som følge af cirkulerende luft reducere varmeisoleringssevnen betragteligt.



Figur 53. Ud over anvendelse som isoleringsmateriale i vandrette konstruktioner anvendes muslingeskaller som tagdækning. Daginstitution i Horsens.

Kapillær stighøjde for muslingeskaller

For at kunne bruge blåmuslingeskaller som isolering under terrændæk uden selvstændigt kapillarbrydende lag, skal det vises, at skallerne er kapillarbrydende. Ifølge Norm for dræning af bygværker mv., DS 436 (Dansk Standard, 1993) bør det kapillarbrydende lags tykkelse være dobbelt så stort som den kapillære stighøjde i laget, dog mindst 150 mm. Der er derfor udført forsøg til bestemmelse af den kapillære stighøjde (Geoteknisk Institut, 2001).

Der er udført forsøg med tre fraktioner, hele skaller, nedknuste skaller og nedknuste skaller, hvor de små partikler er frasigtet. Foruden stighøjden er også rumvægten ved løs henholdsvis fast lejring bestemt. Resultaterne fremgår af tabel 8.

Tabel 8. Kapillær stighøjde for hele og nedknuste blåmuslingeskaller.

	Mindste rumvægt kg/m ³	Største rumvægt kg/m ³	Aktuel rumvægt kg/m ³	Kapillær stighøjde mm
Hele skaller	264	312	288	6
Knuste skaller	559	582	570	21
Knuste skaller frasigtet bundfraktion	474	579	526	24

Det ses, at de hele skaller har væsentligt mindre stighøjde end de knuste skaller. Det er uden særlig betydning, om de små partikler frasigtes. I alle tilfælde er stighøjden væsentligt under halvdelen af mindstetykkelsen for kapillarbrydende lag. Muslingeskaller kan således anvendes som kapillarbrydende lag på samme måde, som andre materialer der samtidigt kan være kapillarbrydende og isolerende. Man antager, at de nederste 75 mm er fugtige og derfor har en højere varmeledningsevne end resten af laget. Varmeledningsevnen i fugtig tilstand er ikke kendt, men det vil kun være lidt på den sikre side at se bort fra isoleringsevnen af de nederste 75 mm.

Bilag 1: Specifikation vedr. testemner

I det følgende er givet en oversigt over de anvendte materialer og fremgangsmåden ved opbygning af testemner.



Figur 54. Tildannelse og syning med bindegarn.

Fremgangsmåde ved opbygning af halmvægge

- 1 Oplægning af hele halmballer
- 2 Tildannelse af kortere baller ved syning med bindegarn
- 3 Efterfyldning med halmtotter i kanten
- 4 Afretning af halmoverfladen med vinkelsliber
- 5 Grundpuds (lervælling) uden snittet halm, påføres manuelt
- 6 Første lag puds med snittet halm, påføres med pudsebræt
- 7 Andet lag puds med snittet halm, påføres med pudsebræt
- 8 Glitning med svamp
- 9 Efterfugning.

Halmballer (almindelige)

Anvendt til forsøg på Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut, Teknologisk Institut, Arbejdsmiljøinstituttet samt By og Byg.

Størrelse: h x b x l = 380 x 450 x 750 mm.

Vægt pr. stk.: ca. 10 kg.

Rumvægt: ca. 78 kg/m³.

Gule, skinnende strå

Fugtindhold målt med halmspyd inden forsøg: 10-14 % (12 prøver).

Fugtindhold af halm fra overflade bestemt ved veje-tørre metode: 16-17% (2 prøver).

Leverandør: Verner Hansen, Alt i Hø og Halm. Halmen er høstet på syd-sjællandske marker.



Figur 55. Anvendelse af friske, gule, skinnende halmballer til venstre i billedet kan anbefales til forskel fra de mindre friske halmballer til højre, der tydeligvis har begyndende skimmelsvampeangreb.

Bigballer (hestonballer)

Anvendt til sætningsforsøg på By og Byg.

Størrelse: h x b x l = 850 x 450 x 2050 mm.

Vægt pr. stk.: ca. 98 kg.

Rumvægt: ca. 126 kg/m³.

Gule, skinnende strå.

Ikke tydelig stråretning.

Fugtindhold målt ved halmspyd inden forsøg: 15-17 % (4 prøver).

Fugtindhold af halm fra overflade bestemt ved veje-tørre metode 18-19 % (2 prøver).

Leverandør: Andelslandbruget Søgård i Midtjylland.



Figur 56. Bigballer vejes og testes for fugtindhold inden brug. (Foto: Jan Carl Westphal).

Lerpuds

Anvendt til forsøgsemner opbygget hos Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut, Teknologisk Institut, Arbejdsmiljøinstituttet samt By og Byg.

Følgende materialer indgår:

- Lerpulver, der leveres tørret, bestående af ler og grus
- Bakkegrus 0-4 mm
- Snittet halm, 6-7 cm lange strå
- Vand.

1. lag lerpuds (grundpuds):

Grundning med lervælling, som består af lerpulver opløst i vand.

2. og 3. lag lerpuds:

Ingredienserne blandes i en tvangsblender i følgende forhold:

- 10 liter lerpulver
- 18 liter bakkegrus
- 8 liter snittet halm
- 3 liter vand.

Leverandør: Lerpulver: Egen Vinding og datter ApS. Grus: lokal vognmand.

Blåmuslingeskaller

Anvendt til prøvninger hos Teknologisk Institut og Geoteknisk Institut.

Der er anvendt tre forskellige fraktioner:

- 1 Vaskede skaller, hele
- 2 Nedknuste skaller (nedknusning udført på fabrik)
- 3 Nedknuste skaller frasigtet bundfraktion.

Leverandør: Fredsø Vognmandsforretning, Nykøbing Mors.

Litteratur

NB: Publikationer mærket med # er udarbejdet som en del af projektet og kan findes på By og Bygs hjemmeside.

Bolig- og Byministeriet. (1998). *Bygningsreglement for småhuse 1998*. København.

Breum, N. O., et al. (2002). *Luftforureninger ved anvendelse af alternative isoleringsmaterialer* (AMI rapport 57). Arbejds miljøinstituttet, & By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut. København: Arbejds miljøinstituttet.

Christian J. E., Desjarlais, A. O., & Stovall, T. K. (1998). Straw bale wall hot box test results and analysis. In *Conference Proceedings: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII, Florida, 6-10 December, 1998* (pp. 275-285). Atlanta, GA: ASHRAE.

#Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut. (2001a). *Prøvningsrapport* (Sag nr. PG10809, Løbe nr. 8053). Hvidovre.

#Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut. (2001b). *Prøvningsrapport* (Sag nr. PG10810, Løbe nr. 8064). Hvidovre.

Dansk Standard. (1993). *Norm for dræning af bygværker mv.* (2. udg.) (DS 436:1993). Charlottenlund.

Dansk Standard. (1997). *Termisk isolering: Bestemmelse af isolans ved brug af kalibreret og beskyttet varmekasse (hot box)* (DS/EN ISO 8990:1997). Charlottenlund.

Dansk Standard. (2001). *Byggematerialers og -produkters hygroteermiske ydeevne: Bestemmelse af vanddamptransmissionsegenskaber* (DS/EN ISO 12572:2001). Charlottenlund.

Dansk Standard. (2002). *Beregning af bygningers varmetab* (6. udg.) (DS 418:2002). Charlottenlund.

Danø, E., Tofte, S., & Ditlev, J. (2000). *Bygningsdele med celluloseuld og høruld: Eksempler*. Hvidovre: Dansk Brandteknisk Institut, & Bygge- og Miljøteknik ApS.

#DELTA. (2001). *Måling af luftlydisolation for lerpudsede halmvægge i ejendom beliggende Kordalsvej 16, 9493 Saltum* (Teknisk Notat P 870072). Århus.

#Geoteknisk Institut. (2001). *Laboratorieforsøg: Kapillar stighøjde (hc) forsøg*. Lyngby.

Halmhus gav store problemer. (2001). *Brandværn og sikring*, (5), 38-39.

Højer Pedersen, C. (2001). Fugt i halmhuskonstruktioner. *LØB'ende NYHEDER*, (23), 6-8.

International Organization for Standardization. (1991). *Thermal insulation: Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus* (ISO 8302:1991). Genève.

Kloster, J. (1999). *Græstørvstage på træunderlag* (2. udg.) (BYG-ERFA erfaringblad (27) 99 06 01). Hørsholm: BYG-ERFA.

Kristiansen F., & Rode, C. (1999). *Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold: Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer* (Sagsrapport SR-0004). Lyngby: Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Bygninger og Energi.

McCabe, J. C. (1993). *The thermal resistivity of straw bale walls for construction*. Tucson, AZ: University of Arizona, Department of Nuclear Engineering. Lokaliseret 20030804 på:
http://sol.crest.org/efficiency/straw_insulation/straw_insul.html

Munch-Andersen, J., Aggerholm, S., Brandt, E., Buhelt, M., & Valdbjørn Rasmussen, T. (2002). *Tillæg 1 til SBI-anvisning 189, 2. udgave: Småhuse*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

#Møller, K. (2001). *Vurdering af organisk og mikrobielt støv som helbredsrisici ved halmhusbyggeri*. København: Arbejdsmiljøinstituttet.

Nikolaisen, L. (red.), et al. (1998). *Halm til energiformål: Teknik - miljø - økonomi* (2. udg.). København: Videncenter for Halm- og Flisfyring.

Oak Ridge National Laboratory. (1998). *Straw bale wall - rotatable guarded hotbox - results May 1998*. Oak Ridge, TN. Lokaliseret 20030804 på:
<http://www.ornl.gov/~roofs/StrawBale/data/results.txt>

Sand Kristensen, P., & Hoffmann, E. (2000). *Fiskeri efter blåmuslinger i Danmark 1989-1999* (DFU-rapport nr. 72-00). Charlottenlund: Danmarks Fiskeriundersøgelser.

Sandia National Laboratories. (1994). *The thermal conductivity of three bales of straw: Test report dated May 13, 1994*. Albuquerque, NM.

Statens Byggeforskningsinstitut. (1999). *Småhuse: Isolering. Fugt. Lyd. Brand. Ventilation. Styrke* (2. udg.) (SBI-anvisning 189). Hørsholm.

#Statens Byggeforskningsinstitut. (2002a). *Prøvningsrapport: 10 forskellige pudsprøver* (Sag nr. 423-8/A). Hørsholm.

#Statens Byggeforskningsinstitut. (2002b). *Prøvningsrapport: Halmprøver* (Sag nr. 423-8/B). Hørsholm.

#Statens Byggeforskningsinstitut. (2002c). *Prøvningsrapport: Fugtophobning i halmvægge der udvendigt er pudset med henholdsvis ler- og juramørtel og indvendigt med lermørtel* (Sag nr. 423-8/C). Hørsholm.

#Statens Byggeforskningsinstitut. (2002d). *Prøvningsrapport: Sætning af halmvægge, der er opbygget af henholdsvis traditionelle (små) halmballer og bigballer (hestonballer) (begge vægge er pudset med lermørtel)* (Sag nr. 423-8/D). Hørsholm.

Straube, J. (2000). *Moisture properties of plaster and stucco for strawbale buildings*. Ottawa, ON: Canadian Mortgage and Housing Corporation.

Formålet med rapporten er at give den projekterende et indblik i og en forståelse for den lange række af problemer, der kan og vil opstå i forbindelse med projekteringen af et nyt belysningsanlæg eller renovering af et eksisterende. For at relatere teori til praksis har to paneler af sagkyndige på belysningsområdet gennemgået ni forskellige bygninger og belysningsanlæg for at vurdere belysningskvalitet og energieffektivitet. Rapporten henvender sig til rådgivende ingeniører og arkitekter samt fabrikanter og leverandører af belysningskomponenter.

1. udgave, 2004
ISBN 87-563-1196-6
ISSN 1600-8049



- #Teknologisk Institut. (2001a). *Prøvningsrapport: Måling af U-værdi - halmvæg med stråretning vinkelret på væggen* (Rapport nr. 55650-34). Taastrup.
- #Teknologisk Institut. (2001b). *Prøvningsrapport: Måling af U-værdi - halmvæg med stråretning parallelt med væggen* (Rapport nr. 55650-35). Taastrup.
- #Teknologisk Institut. (2001c). *Prøvningsrapport: Halm - varmemstrøm parallelt med stråretning* (Rapport nr. 00163). Taastrup.
- #Teknologisk Institut. (2001d). *Prøvningsrapport: Halm - varmemstrøm parallelt med stråretning* (Rapport nr. 00180). Taastrup.
- #Teknologisk Institut. (2001e). *Prøvningsrapport: Halm - varmemstrøm vinkelret på stråretning* (Rapport nr. 01041/rev.). Taastrup.
- #Teknologisk Institut. (2001f). *Prøvningsrapport: Halm - varmemstrøm vinkelret på stråretning* (Rapport nr. 01030/rev.). Taastrup.
- #Teknologisk Institut. (2001g). *Prøvningsrapport: Muslingeskaller nr. 1* (Rapport nr. 01001/rev.). Taastrup.
- #Teknologisk Institut. (2001h). *Prøvningsrapport: Muslingeskaller nr. 2* (Rapport nr. 01002/rev.). Taastrup.
- #Teknologisk Institut. (2001i). *Prøvningsrapport: Muslingeskaller nr. 3* (Rapport nr. 01003/rev.). Taastrup.
- Watts, K. C., Wilkie, K. I., Thompson, K., & Corson, J. (1995). Thermal and mechanical properties of straw bales as they relate to straw house (Paper No. 95-209). In *Canadian Society of Agricultural Engineering, Annual Meeting, July 9-12, Ottawa, ON*. Mansonville, QC: CSAE/SCGR.
- Wimmer, R., Hohensinner, H., Janisch, L., Gruber, H., & Passauer, W. (2001). *Haus der Zukunft: Wirtschaftsbezogene Grundlagenforschung* (Endbericht 01/2001). Wien: Bundesministeriums für Verkehr Innovation und Technologie.
- Österreichischen Strohballen-Netzwerk, ASBN. (2000). *Haus der Zukunft Projekt*. Baierdorf. Lokaliseret 20030804 på:
http://www.baubiologie.at/asbn/re_hausderzukunft.html