Lavenergimagasiner

- koncept og bæredygtighed

Museernes
Grønne Akademi

Lavenergimagasiner

- koncept og bæredygtighed

Indhold

Forord 7

Læsevejledning 9

Eksempler på danske lavenergimagasiner 10

Del 1 Funktionsbeskrivelse

1 Lavenergimagasiner 13

2 Magasinbygningen 15

2.1 Konstruktion og klimatiseringsprincip 15

2.2 Klimabelastning 16

2.3 Alternative byggematerialer 18

3 Indeklima 19

3.1 Klimazoner 19

3.2 Basisklima 19

3.3 Tørt/Ultratørt klima 20

3.4 Køligt klima 20

4 Bevaringsparametre 23

4.1 Time-Weighted Preservation Index 23

4.2 Andre bevaringsfaktorer 25

Del 2 Specifikke funktionskrav

5 Klimaskærm 27

5.1 Formål 27

5.2 Energiramme 27

5.3 Validering af energiforbrug og temperaturstabilitet 27

5.4 Klimaskærmens tæthed 29

6 Krav til klimaskærmens elementer (tag, ydervægge, m.v.) 30

6.1 Krav til tagkonstruktion 30

6.2 Krav til ydervægge 30

6.3 Krav til skillevægge mod andre klimazoner 32

6.4 Krav til adgangsveje 33

6.5 Krav til nødudgange 34

6.6 Krav til terrændækskonstruktion 34

6.7 Krav til indvendige overflader 36

6.8. Øvrige generelle funktionskrav 37

7 Krav til installationer 38

7.1 Ventilation 38

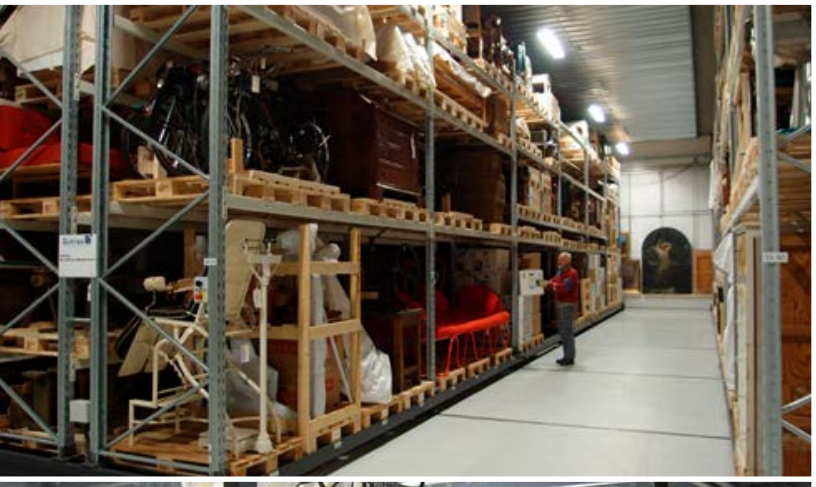
7.2 Indeklima 40

7.3 Funktionsafprøvning og driftskontrol 43

Referencer 44

Appendiks 47

Begrebsoversigt 50



Forord

Museernes opgave er at bevare kunst-, kultur- og naturarven – både for nutiden og for kommende generationer. Derfor stilles der høje krav til opbevaringsforholdene i museumsmagasiner.

Samtidig befinder museerne sig – ligesom resten af samfundet – midt i en grøn omstilling, hvor energiforbrug, CO_2-udledning og ressourceforbrug skal reduceres. Lavenergimagasiner er ét svar på denne dobbelte udfordring. Konceptet udnytter bygningens fysiske egenskaber og udeklimaet til at skabe stabile bevaringsforhold – ofte uden opvarmning og med minimal teknisk styring.

"Den danske model" for lavenergimagasiner kombinerer høj bevaringskvalitet, lave anlægsomkostninger og et ekstremt lavt energiforbrug, og vi definerer her i denne rapport et lavenergimagasin ud fra disse parametre: Et magasin, der yder en høj bevaringskvalitet (udtrykt ved et TWPI bevaringsindeks over 100), for et relativt energiforbrug til klimakontrol på under 3 kWh per kubikmeter magasinplads årligt.

Kimen til lavenergikonceptet for museumsmagasiner kan findes i flere tidlige magasinbyggerier igennem 1980-90erne, samt med inspiration fra de stabile klimaforhold som kunne observeres i nogle historiske slotte og kirkebygninger (se f.eks. Ræder Knudsen & Lundby, 2017, samt Ryhl-Svendsen & Smedemark, 2025). Ud af dette er der i de seneste ca. 25 år opført en række moderne lavenergimagasiner, både i Danmark og i udlandet, med ambitionen om at opnå høj kvalitet og et lavt forbrug. Erfaringerne viser dog, at det ikke altid lykkes. Derfor er der behov for en tydelig opsamling af viden og praksiserfaringer, som kan guide fremtidige projekter.

Denne rapport beskriver de krav, der skal opfyldes for at etablere lavenergimagasiner, som både sikrer langtidsholdbar bevaring af kulturarven og minimerer miljøbelastningen. Den samler mere end to årtiers danske erfaringer med lavenergimagasiner og bygger på dokumenterede eksempler, hvor både bevaringskvalitet og energiforbrug er målt og analyseret. Den er tænkt som et praktisk redskab til bygherrer, rådgivere, museumsfolk og myndigheder, der arbejder med planlægning, projektering og drift af lavenergimagasiner til flytbar kulturarv.

Rapporten er udviklet i regi af Museernes Grønne Akademi i samarbejde med eksperter og fagfolk fra branchen. Nye løsninger rejser ofte spørgsmål hos myndigheder og forsikringsselskaber – især når de involverer alternative byggematerialer eller fravalg af konventionel ventilation og opvarmning. Derfor lægger vi vægt på, hvad vi ved virker i praksis.

Med rapporten ønsker vi at understøtte bygherrer, rådgivere og entreprenører i at træffe oplyste valg – og dermed bidrage til en fremtidssikret, bæredygtig forvaltning af vores fælles kulturarv.

Morten Ryhl-Svendsen, Lise Ræder Knudsen, Pil Rasmussen og Jesper Stub Johnsen.
Juli 2025

STARK
STARK
STARK
STARK

Læsevejledning

Denne rapport er udarbejdet som et praktisk redskab til bygherrer, rådgivere, museumsfolk og myndigheder, der arbejder med planlægning, projektering og drift af lavenergimagasiner til flytbar kulturarv.

Rapporten er opbygget med henblik på at kunne fungere både som introduktion, dokumentation og kravspecifikation. Hver del kan læses uafhængigt, men det anbefales, at man først orienterer sig i del 1 for at forstå rationalet bag kravene i del 2.

Del 1: Funktionsbeskrivelse

Gennemgår grundprincipperne for det tekniske byggeri omkring lavenergimagasiner, herunder konstruktion, klimatiseringsprincipper og indeklimaets betydning for bevaringskvalitet. Denne del introducerer centrale begreber som termisk inerti, Time-Weighted Preservation Index (TWPI) og klimazoner (basisklima, tørt, ultratørt og køligt klima).

Del 1 anbefales til alle læsere som en introduktion til lavenergimagasinet som koncept.

Del 2: Specifikke funktionskrav

Beskriver tekniske og bygningsmæssige krav, der skal opfyldes ved etablering af et lavenergimagasin. Her findes detaljerede krav til klimaskærm, konstruktion, ventilation, installationer, målinger og energiforbrug. Del 2 fungerer som en specifikation og checkliste ved nybyggeri eller renovering, og retter sig især mod projekterende rådgivere og entreprenører.

Appendiks og tabel

Bagest i rapporten findes en teknisk beskrivelse af TWPI-beregning samt en tabeloversigt over udvalgte danske lavenergimagasiner og deres præstationer på en række parametre.

→

Indeklimaet i de uopvarmede lavenergimagasiner er køligt året rundt, hvilket sikrer en høj bevaringskvalitet.

Eksempler på danske lavenergimagasiner

Kortet viser placeringen af otte danske lavenergimagasiner. Disse anlæg repræsenterer forskellige bygningstyper og klimatiseringsprincipper, men har det til fælles, at de alle arbejder med lavt energiforbrug og høj bevaringskvalitet. De udvalgte bygninger dækker ikke listen over alle danske magasiner, men er valgt på basis af at have været inkluderet i forskningsprojekter, hvorfra detaljerede data er tilgængelige.

De tekniske specifikationer for hvert magasin – herunder temperatur- og fugtniveauer, luftskifte, TWPI og energiforbrug – er samlet i Tabel 1, sidst i rapporten. Tabellen kan bruges som reference ved vurdering af designvalg og driftsresultater.

Samlingshuset /
Nordjyske Museer
Vestbjerg
Museum Østjylland
Randers
Nationalmuseet /
Det Kgl. Bibliotek
Vinge
Konserveringscenter Vejle /
Fælles Museumsmagasiner
Vejle
Museum Vestsjælland
Ugerløse
Københavns Museum /
Kunst & Historie
Høje Taastrup
Museum Vest
Ribe
Museum Sønderjylland
Rødekro

Del 1

Funktions-beskrivelse

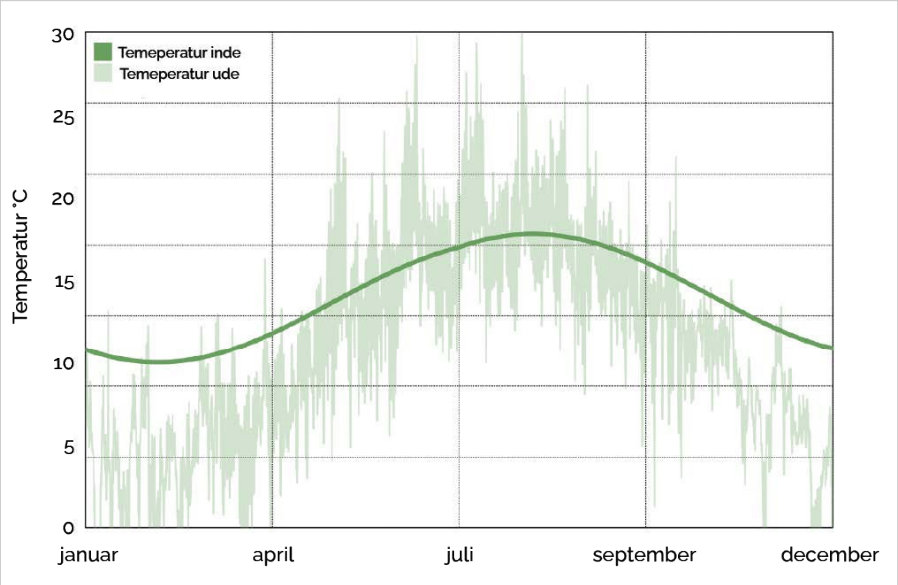
1

Lavenergimagasiner

Museumsmagasiner skal rumme flytbar fysisk kulturarv i et indeklima med høj bevaringsmæssig kvalitet (klima-, luftkvalitets- og sikringsmæssigt). I lavenergimagasiner er målet, at dette gøres for så lave omkostninger som muligt, i forhold til investering, energiforbrug og drift.

Lavenergikonceptet er baseret på bygningens konstruktion som det centralt styrende element, med et minimum af mekanisk kontrol. For at opnå dette i et tempereret, nordeuropæisk klima benyttes følgende principper:

- En stor termisk inerti for at udjævne korttidsvariationer i temperatur. Jorden under magasinet (uisoleret gulv) bruges som et termisk bufferlager. Dette gør populært sagt gulvet til en stor køleflade om sommeren og stor varmeflade om vinteren.
- God isolering af ydervægge og taget for at dæmpe døgnets temperatursvingninger og reducere varmeudveksling med omgivelserne.
- En uopvarmet bygning. Kombineret med det ovenstående vil dette give et indeklima, der med stærkt reduceret amplitude følger den årlige cyklus af udendørstemperaturen.
- En tæt bygningsskal med et meget lavt luftskifte. Dette minimerer påvirkning fra et afvigende fugtindhold udendørs (for tørt eller for fugtigt), hvilket tillader passiv stabilisering af den relative luftfugtighed indendørs fra hygroskopisk bufferende materialer i bygning eller samlingsgenstande, understøttet af lejlighedsvis mekanisk affugtning, når nødvendigt. Den tætte bygning skærmer desuden for udendørs luftforurening.



Den tætte og velisolerede bygning sikrer, sammen med gulvets varmelager, en stabil temperatur indendørs (fed kurve), som kun langsomt ændrer sig med årstidernes skiften (udetemperatur tynd kurve). Principmodel baseret på data fra Ribe magasinet.

Der er en række specifikke funktionskrav til lavenergimagasiner, som supplerer eller afviger fra kravene for traditionelt magasinbyggeri, herunder specifikationer til materialer og konstruktion.

Velfungerende eksempler på konceptet findes i en række eksisterende danske museumsmagasiner, hvor hovedparten opnår et årligt indeklima med en temperaturcyklus inden for intervallet 7 og 17 °C og en relativ luftfugtighed (RF) mellem 45-55 %, for et energiforbrug på under 3 kWh per kubikmeter magasinvolumen (Tabel 1).

Det skal dog understreges, at ingen museumsmagasiner er ens. Som det ses i Tabel 1, kan der være væsentlige forskelle i størrelse, klimatiseringskoncept og benyttede sætpunkter for klimakontrol, hvilket afspejles i, hvorledes bygningen præsterer med hensyn til indeklima og energiforbrug. Den såkaldte "danske model" dækker med andre ord ikke over ét bestemt design, men vil være en bygning baseret på variationer af de grundlæggende principper oplistet ovenfor.

For lavenergimagasiner gælder i øvrigt alle love, standarder og regler, som gælder for almindelige museumsmagasiner. Funktionskrav, der gælder for magasiner i al almindelighed – for eksempel sikring mod vandindtrængning, indbrud, påvirkning fra luftforurening, brand, rystelser m.v. – gentages ikke i forbindelse med nærværende beskrivelse af funktionskrav til lavenergimagasiner.

Ligeledes antages det her, at der i selve magasinområderne ikke forefindes faste arbejdspladser, dvs. at der ikke er arbejdsmiljømæssige krav til f.eks. temperatur, dagslys, luftkvalitet m.v. For specifikationer for museumsmagasiner generelt henvises f.eks. til DS/EN 16893:2018.

Der er en række specifikke funktionskrav til lavenergimagasiner, som supplerer eller afviger fra kravene for traditionelt magasinbyggeri. Ved ønske om et lavenergimagasin skal disse specifikke funktionskrav opfyldes af byggeriet, hvilket er vigtigt at præcisere konkret når byggeriet udbydes. Disse krav kan enten supplere eller afvige fra dem, der gælder for traditionelt magasinbyggeri og er nærmere beskrevet i kapitlet "Specifikke funktionskrav".

De følgende afsnit giver et overblik over, hvordan lavenergimagasiner fungerer i praksis og sætter rammen for de specifikke krav, der skal være opfyldt for at sikre et stabilt magasinmiljø baseret på lavenergiprincipper.

2
Magasinbygningen

2.1 Konstruktion og klimatiseringsprincip

De eksisterende danske lavenergimagasiner er typisk opført som et råhus af betonelementer til vægge og tage samt med et terrændæk støbt på stedet med et underlag af et kapillarbrydende lag af singels i varierende lagtykkelser (normalt 150 mm). Det kapillarbrydende lag skal have en høj varmeledningsevne for ikke at virke som en isolering mod gulvet.

Gulvene har ingen varmeisolering, mens vægge og tag er tætte og velisolerede, typisk med mineraluld i størrelsesordenen 250-300 mm (se afsnit 5 i Specifikke funktionskrav). Ydervægge kan være opført som sandwichelementer, eller eventuelt som letbetonelementer med udvendig isolering og metalbeklædning. Tage kan være konstrueret som forspændte huldæk, alternativt som TTS-elementer og trapezplader. Enkelte andre variationer af bygningskonstruktion ses blandt danske magasinbygninger, f.eks. brug af tegl.

Den primære klimakontrol udgøres af interne, recirkulerende ventilationsanlæg med mekanisk affugtning, men uden befugtning. Ofte benyttes sorptionsaffugtere frem for kondensaffugtning. Ideelt set kan magasinets temperatur styres helt passivt, hvor klimaet i den uopvarmede magasinhal følger årstiden med en tidsforskydning, afhængig af jordvolumens varmekapacitet (se figur side 13). I enkelte eksisterende magasinbygninger opereres dog med mulighed for en svag opvarmning om vinteren, hvis temperaturen falder under en ønsket grænseværdi. Køling er ikke nødvendig i magasinerne, bortset fra eventuelle rum med særlige klimazoner (se afsnit 3.4).

Til vurdering af energiforbruget til klimakontrol kan det være hensigtsmæssigt at benytte størrelsen *energiforbrug per kubikmeter magasinvolumen*, da dette tager forbehold for variation i magasinhallernes frihøjde. Dette giver desuden mulighed for en direkte sammenligning af forskellige magasiners forbrug, uanset forskel i størrelse. Enheden for det relative energiforbrug er således kWh/m^3 per år.

Lavenergi-magasiner er typisk opført som større haller, gerne med en indre frihøjde på 6-8 m (se eksempler i Tabel 1). For pladsoptimering benyttes ofte kompaktreoler. Ud over et eller flere magasinrum, kan magasinbygninger omfatte en række lokaler til andre funktioner, herunder modtagelse, håndtering og behandling af genstande samt personalefaciliteter. Beskrivelse af disse områder er udeladt i denne rapport.

→

En væsentlig parameter er optimal pladsudnyttelse i magasinerne. Dette sker både i højden, og ved brug af flytbare kompaktreoler.

2.2 Klimabelastning

I to nyligt afsluttede projekter (2024) blev klimabelastningen for en række lavenergimagasiner kortlagt:

Projekt A: En undersøgelse af seks nyere eksisterende magasinbygninger, hvor bygningernes CO_2-udledning i forbindelse med opførelse, vedligeholdelse og bortskaffelse efter endt brug, blev beregnet ved en livscyklus-analyse (LCA) (Ryhl-Svendsen, Jensen & Larsen, 2025).

Projekt B: En undersøgelse af et eksisterende magasinbyggeri fra 2012 ved Konserveringscenter Vejle (beskrevet i Tabel 1, kolonne 2), som har været model for fem af byggerierne inkluderet i projekt A (Ræder Knudsen *et al*, 2025). Her blev det undersøgt, hvorvidt den nuværende bygnings gode resultater i drift, opbevaringskvalitet og anlægsudgift ville kunne opnås med mere bæredygtige byggematerialer i fremtidige byggerier.

For begge undersøgelser blev der udført LCA-beregninger baseret på retningslinjerne i Bygningsreglementet BR18 (Social- og Boligstyrelsen, 2018), med en brugstid på 50 år (dog forventes den reelle levetid for de fleste moderne magasinbyggerier at være betydeligt højere).

I undersøgelse A blev det fundet, at CO_2-udledningen for alle bygninger lå imellem 6-10 kg CO_2/m^2 per år, hvilket for alle var under Bygningsreglementets daværende krav på højst 12 kg CO_2/m^2 år, og for fire af byggerierne desuden under kravene for lav-emissionsklassen på 8 kg CO_2/m^2 årligt [1]. For alle de undersøgte magasiner gjaldt, at langt det største bidrag kom fra beton (40 – 65 %) efterfulgt af isoleringsmaterialer (15 – 25 %). Hvor metalplader indgik i tag eller facader, udgjorde dette 15-20 %. Analysen blev specifikt udført på magasindelen af bygningerne, mens tilstødende funktioner (personaleafsnit, etc.) ikke var medtaget.

I undersøgelse B blev der opstillet tre alternative koncepter for anvendelse af byggematerialer med stigende grønne ambitioner, og med overvejelser vedrørende koncepternes mulighed for at yde museumssamlinger den nødvendige beskyttelse i forhold til akutte hændelser som brand, tyveri og vandskade, samt andre skader forårsaget af f.eks. skimmel, skadedyr, lys og uhensigtsmæssig luftfugtighed. Desuden blev der, ud over LCA, foretaget LCC (livscyklus-omkostning) beregninger på de alternative koncepter. Dette giver en indikation af de forventede udgifter ved et mere bæredygtigt byggeri, i forhold til det eksisterende traditionelle byggekoncept, som primært er baseret på beton, mineraluld og metalplade.

[1]: Tal ifølge BR18 gældende i 2024. Bemærk, at CO_2-grænseværdien for bygningers klimapåvirkning løbende strammes, med seneste ændring af BR18 per 1. juli 2025 (https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2025/271).

←

Fællesmagasinet i Vejle blev i 2012 udvidet med en sektion magasinhaller, der i dag præsterer et indeklima med et meget højt bevaringsindeks for et meget lavt energiforbrug, og fremstår derved som et foregangseksempel på "den danske model" (se Tabel 1, Vejle Hal F).

2.3 Alternative byggematerialer

For alle byggerier i ovennævnte undersøgelse A blev det fundet, at gulve, fundamenter, vægge og etageadskillelser samt tagkonstruktionen tilsammen udgjorde mere end 90 % af den samlede CO_2-udledning. I modsætning til dette er CO_2-udledningen fra energiforbruget til klimatisering mindst en faktor 10 under udledningen fra bygningens konstruktion og materialer. Derfor var det oplagt at udforske, hvorvidt brugen af især beton kan minimeres, og om benyttelse af alternative byggematerialer kan mindske klimabelastningen. En af de undersøgte magasinbygninger blev derfor som forsøg simuleret opført i alternative versioner, hvor den optimale version var med bærende konstruktion af limtræ, facade med træbeklædning, samt isolering med papiruld. Dette gav for en 50 års periode omtrent en halveret CO_2-udledning, sammenholdt med den virkelige bygning i beton og metal. Der er således en betydelig klimagevinst ved at opføre en let klimaskærm baseret på træ frem for en tung klimaskærm af beton.

I undersøgelse B blev tilsvarende simuleringer foretaget med lignede resultat, dog påpegede analyserne også problemer for de alternative versioner med at imødegå diverse risikofaktorer som nævnt ovenfor. Ligeledes fandt undersøgelse B, at der kun kunne opnås begrænset gevinst ved brug af visse alternative materialer, som f.eks. ubrændte lersten til indre vægge eller "rammed earth" mure.

Det må erkendes, at der stadig ikke findes realiserede eksempler på magasinbyggerier opført i bæredygtige materialer i Danmark, hvilket delvis kan skyldes udfordringer i forhold til prøvning og godkendelse af utraditionelle byggematerialer. Vi opfordrer til, at dette udforskes yderligere.

De to projekter var støttet af Slots- og Kulturstyrelsens Pulje for bæredygtige museer (2024). Projekt B var desuden støttet af Augustinusfonden.

↑

Beton står for omkring halvdelen af en magasinbygnings samlede klimaaftryk. I det omfang dele af bygningen kan opføres i alternative materialer, kan bygningens bæredygtighed øges betydeligt.

3
Indeklima

3.1 Klimazoner

I et lavenergimagasin kan findes forskellige klimazoner, afhængig af den aktuelle samlings materialesammensætning og behov. Typisk udgøres hovedparten af magasinområdet af såkaldt "basisklima", hvor sætpunktet for relativ luftfugtighed ligger omkring 50 % RF, og hvor der ikke er behov for aktiv køling. Basisklima kan for en typisk museumssamling udgøre over 90 % af det samlede magasinareal.

Hertil kan der, afhængig af samlingen, være behov for yderligere, separate specialklimazoner – ofte "Tørt" (30-40 % RF), "Ultratørt" (<10 % RF), eller "Køligt" (<10 °C). Andre klimazoner kan forekomme for materialegrupper med særlige behov, men de ovenstående er de almindeligst forekommende.

Typiske krav til de forskellige typer indeklima beskrives nedenfor. Det må understreges, at det er de opbevarede genstandes bevaringsbehov, der afgør krav til indeklimaet. Derfor kan der være tilfælde, hvor samlingens krav afviger fra de typiske specifikationer. For hygroskopiske genstande (der kan optage eller afgive vanddamp) guider DS/EN 15757:2010 til, hvordan klimakrav kan specificeres. Anbefalinger for klima i magasiner kan desuden findes i samlingen af "Anbefalinger til museernes forebyggende bevaringsindsats" (Rasmussen et al, 2021). Hvilke krav til indeklima, der er nødvendigt for den aktuelle samling, skal i hvert enkelt tilfælde fastsættes i samråd med konserveringsfagligt personale.

De almindeligste klimazoner beskrives kort herunder. I " Del 2: Specifikke funktionskrav" uddybes specifikationer for etablering af basisklima mere detaljeret. I forhold til magasiner med tørt, ultratørt eller køligt klima, vil der være få afvigende funktionskrav fra basisklima – eksempelvis øget affugtningskapacitet eller køleanlæg. Hertil kan komme en række opholds- og håndteringszoner uden for magasinområdet, som kræver et eget indeklima, der kan være specificeret ud fra andre behov end bevaring, f.eks. komfort. Dette vil ikke blive behandlet i denne rapport.

3.2 Basisklima

Et basisklima vil opfylde kravene for hovedparten af den typiske museumssamling. Som udgangspunkt ligger denne klimazones grænser indenfor et fugtinterval på 40-60 % RF og en temperatur på under 20 °C. Erfaring viser, at de fleste lavenergimagasiner passivt kan opretholde en temperatur svingende på årsbasis indenfor intervallet ca. 7-17 °C, med døgnudsving på under +/- 2 °C.

For den relative fugtighed styres den øvre grænse ved mekanisk affugtning. Dette sætpunkt fastsættes typisk omkring 50 % RF, og best practice viser, at luftfugtigheden ofte kan holdes konstant indenfor +/- 5 procentpoint. De præcise fugtgrænser fastsættes ud fra den aktuelle samlings behov. Bevaringskvaliteten, udtrykt i "Time Weighted Preservation Index" (TWPI), skal være højere end indeks 100 (se Bevaringsparametre, afsnit 4).

Energiforbruget for et basismagasin skal være mindre end 3 kWh/m^3 per år. Best practice viser dog, at basisklima under optimale forhold kan driftes for mindre end 1 kWh/m^3 årligt.

3.3 Tørt/Ultratørt klima

Tørt klima benyttes typisk til opbevaring af recente metalgenstande. Ultratørt klima benyttes særligt til bevaring af arkæologisk metal, genstande indeholdende salte og lignende. Den relative fugtighed i et tørt klima ligger typisk mellem 30-40 % RF, men kan være lavere. En luftfugtighed lavere end 10 % betegnes ultratør. Temperaturforhold svarer som udgangspunkt til basisklima.

Af energimæssige grunde skal justering af luftfugtigheden skal ske ved mekanisk affugtning, og ikke ved opvarmning. Jo lavere grænse der sættes for den relative fugtighed, jo højere vil energiforbruget til affugtning blive. Best practice for tørt klima viser, at 30 % RF kan opretholdes for 10 kWh/m^3 per år.

For de ovennævnte materialegrupper har bevaringskvalitet udtrykt i TWPI ikke mening. Den primære bevaringskvalitet er fraværet af fugt (lav RF), hvilket forhindrer korrosion eller saltudblomstring.

3.4 Køligt klima

Køligt indeklima benyttes til kemisk ustabile genstande, eksempelvis moderne genstande af plastik (legetøj, husholdningsgenstande, tekstiler, m.v.), surt papir (aviser, m.v.), film og lydmedier, fotografiske negativer og lignende.

Temperaturen bestemmes i hvert tilfælde ud fra konservatorfaglig vurdering, men vil altid være 10 ˚C eller lavere. Den relative fugtighed skal typisk være 30-40 % RF. Ovenstående klimaintervaller vil medføre et TWPI bedre end indeks 200. For langtidsbevaring af ustabile genstande vil indeks 400 være et fornuftigt pejlemærke.

Justering af temperatur vil nødvendigvis skulle ske ved mekanisk køling. Jo lavere temperatur, desto højere bliver energiforbruget. Best practice for køligt klima viser, at 10 ˚C kan opretholdes for 30 kWh/m^3 årligt.

STILL
RX50-10

4
Bevaringsparametre

4.1 Time-Weighted Preservation Index

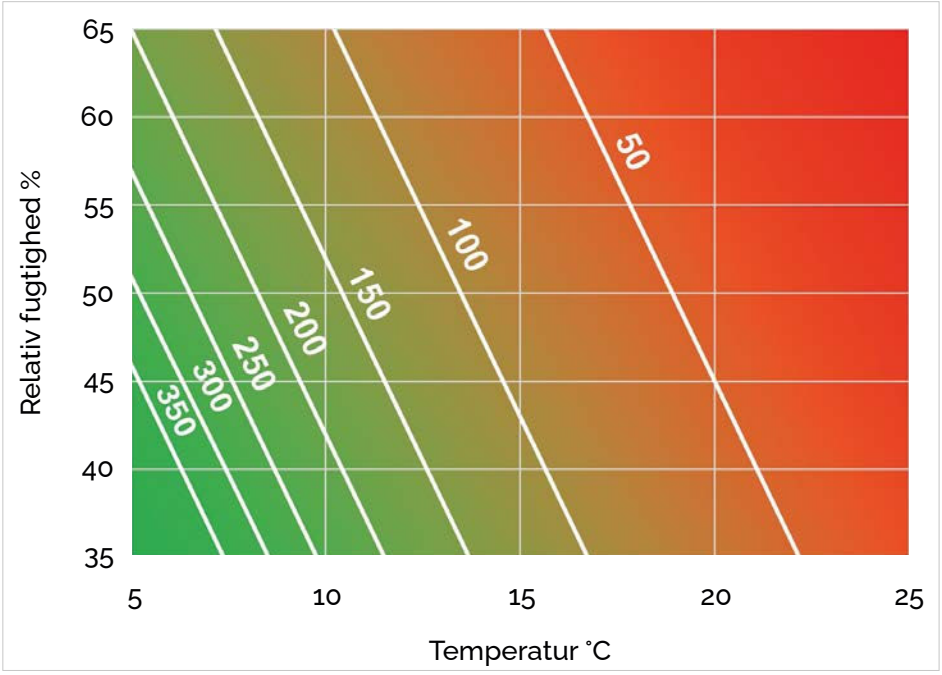
I forbindelse med klassificering af indeklimaet i lavenergimagasiner benyttes Time-Weighted Preservation Index (TWPI) - eller bevaringsindeks - som et udtryk for indeklimaets bevaringskvalitet (Nishimura, 2007; Richardson, 2023). TWPI angiver et indekstal, der udtrykker den gennemsnitlige hastighed for kemisk nedbrydning af organiske materialer, under indvirken af indeklimaets temperatur og luftfugtighed: Jo højere TWPI, desto langsommere sker nedbrydning (og desto bedre er bevaringskvaliteten). Ændrer man f.eks. indeklimaet, så TWPI stiger fra 50 til 100, vil holdbarheden (eller "levetiden") for organiske materialer – alt andet lige - fordobles.

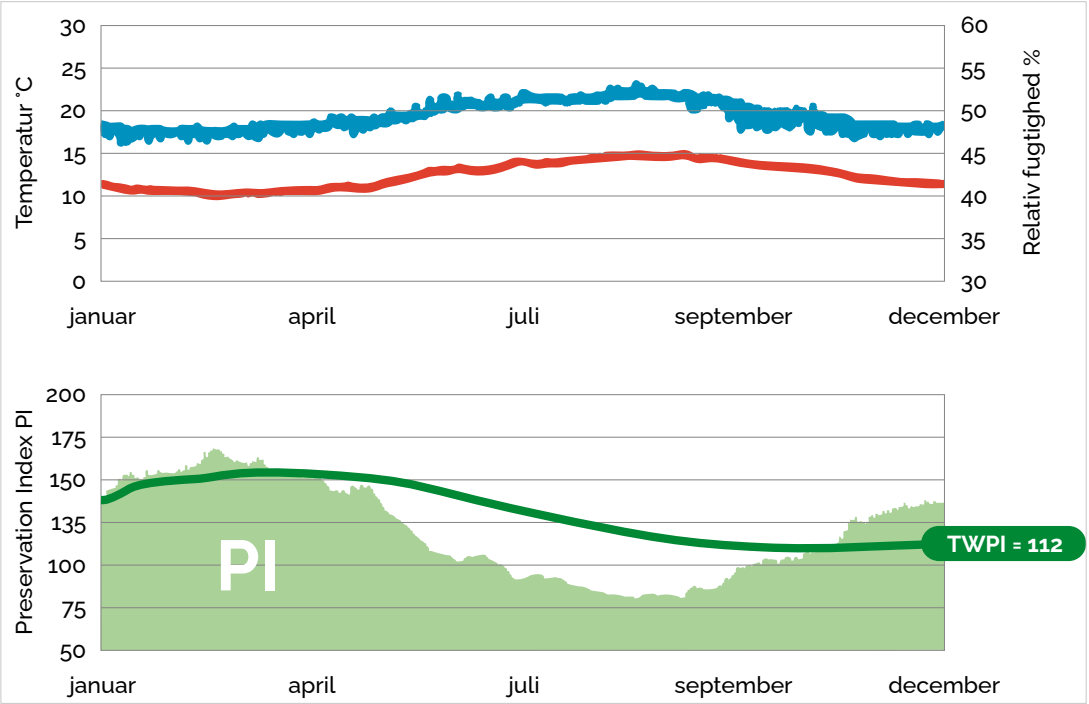
I museumsmagasiner kan temperatur og luftfugtighed variere over årstiderne, grundet skift i udetemperaturen, samt ved eventuel påvirkning fra bygningens klimaanlæg. Man vil derfor sjældent opleve et magasin, hvor temperatur og luftfugtighed er konstant over en længere periode. I TWPI indregnes påvirkningen af temperaturen og relativ luftfugtighed med deres variation, vægtet over en tidsperiode på et helt år. Hermed fås en samlet værdi for bevaringskvaliteten, som tager hensyn til alle årstiders påvirkning. Se Appendiks for beskrivelse af TWPI-beregning.

Almindeligvis vurderes kvaliteten af TWPI-niveauer således (Nishimura, 2007):

- TWPI > 45: Dårligt miljø, hurtig nedbrydning
- TWPI 45-75: OK miljø, middel holdbarhed
- TWPI 75-100: Godt miljø, god holdbarhed
- TWPI > 100: Fremragende miljø, lang holdbarhed

Preservation Index (PI) som funktion af indeklimaets temperatur og relativ fugtighed. De skrå hvide kurver angiver, hvorledes PI stiger med lavere temperatur og relativ fugtighed, og omvendt hvordan PI falder, hvis temperatur og/eller relativ fugtighed er høj.





Temperatur (rød) og relativ fugtighed (blå) i et magasin, og det til hver tid tilhørende bevaringsindeks PI (lys grøn). PI falder, hvis temperatur og/eller relativ fugtighed stiger, og vice versa.

Den mørkegrønne kurve nederst viser, hvorledes det tidsvægtede bevaringsindeks (TWPI) akkumuleres over tid. Efter præcis ét år haves et fuldt TWPI, i dette tilfælde indeks 112.

Data fra Vejle Fællesmagasin.
Se appendiks for yderligere om bevaringsindekset.

4.2 Andre bevaringsfaktorer

TWPI er kun gældende for kemisk nedbrydning af organiske materialer. For genstandsgrupper ud over dette, og deres tilhørende nedbrydningsmekanismer, er følgende risikofaktorer vigtige (Nishimura, 2007):

Risiko for korrosion: Jo lavere relativ fugtighed, desto bedre. For recente metalgenstande gerne 40 % RF eller lavere, for arkæologisk metal og genstande forurenet med salte <10 % RF.

Risiko for skimmelangreb: Jo lavere relativ fugtighed, desto bedre. Temperatur har også indflydelse på skimmelsvampes vækstbetingelser, men i de typiske klimaintervaller som findes i museumsmagasiner, vil relativ fugtighed være den drivende faktor. Traditionelt har et indeklima med RF under 65 % været anset som sikret mod skimmelangreb. Men nylige fund af xerophile skimmelsvampe (som kræver meget lidt fugt) i museumsmagasiner antyder, at disse svampe kan trives ved lavere fugtighed, til niveauer lige under 60 % RF (Bastholm et al., 2024). Dog, for et typisk basisklima, hvor affugtnings-sætpunktet stilles til omkring 50 % RF som beskrevet herover (afsnit 3.2), er risikoen for skimmeludbrud fortsat minimal.

Risiko for fugtinduceret mekanisk skade: Luftens fugtighed vil påvirke vandindholdet (ligevægtsfugtindholdet) for visse typer organiske materialer på en måde, hvor ændringer i fugtforhold kan medføre mekanisk skade. Dette kan give sig til udtryk som revnedannelse ved udtørring, eller deformation grundet dimensionsændringer i materialet. Sårbare genstandstyper kan, blandt mange andre, være malerier på lærred og træ, møbler, eller tand- og knoglemateriale. Se f.eks. DS/EN 15757:2010.

Del 2

Specifikke funktionskrav

5
Klimaskærm

5.1 Formål

Lavenergimagasinets klimaskærm har til formål at isolere indeklimaet mod kortvarige og store temperaturudsving i udeklimaet. I Danmark svinger den gennemsnitlige udendørs månedsmiddeltemperatur årligt fra ca. -1 °C til ca. +18 °C, hvilket ideelt set bør halveres og udjævnes indendørs ved hjælp af klimaskærmens tæthed og isoleringsevne (se Basisklima, afsnit 3.2). En høj tæthed vil desuden minimere energiforbruget til affugtning af infiltrationsluft.

I det følgende beskrives de specielle funktionskrav for klimaskærmen omkring et basisklima. Andre klimazoner – tørt, ultratørt eller køligt klima – vil have få afvigende funktionskrav fra basisklima, primært hvad angår isoleringsevne.

5.2 Energiramme

Der stilles i Bygningsreglementet BR18, §260, følgende krav ("Energiramme for andre bygninger end boliger"), at bygningens samlede behov for energi højst må være 41,0 kWh/m^2 per år tillagt 1.000 kWh per år divideret med det opvarmede etageareal. Endvidere kan andre bygninger end boliger klassificeres som lavenergiklasse, når det samlede behov for tilført energi til opvarmning, køling, varmt brugsvand og belysning pr. m^2 opvarmet etageareal ikke overstiger 33,0 kWh/m^2 pr. år (BR 18, §475).

Da magasindelen af et lavenergimagasin ikke er defineret som opvarmet byggeri, kan disse tal kun tjene som sammenligningsgrundlag. Uanset dette kan lavenergimagasiner opfylde ovenstående krav, hvilket er vist i flere realiserede projekter (se Tabel 1).

5.3 Validering af energiforbrug og temperaturstabilitet

Valg af klimaskærmskonstruktioner skal valideres ved dynamiske indeklimasimuleringer med et egnet program, som f.eks. BSim, IDA ICE, m.v. Inden de dynamiske indeklimasimuleringer kan foretages, er det nødvendigt at benytte et anerkendt, to- eller tredimensionelt varmeberegningsprogram, som f.eks. HEAT2, HEAT3 eller COMSOL, der kan analysere varmeoverførsel fra museumsmagasinet til det underliggende jordvolumen.

Gulvarealet skal deles op i minimum fem gulv-delflader i afhængighed af afstanden fra ydervæggen for museumsmagasinet. På denne måde er det muligt at fastlægge tykkelsen af det underliggende varmeakkumulerende jordlag for de enkelte gulv-delfader. Når tykkelse af jordlagene for disse gulv-delflader er fundet, skal disse tykkelser overføres til det dynamiske indeklimasimuleringsprogram, og gulvet opdeles på tilsvarende vis i minimum fem gulv-delflader. Da jordvolumen har en meget stor varmekapacitet, er det nødvendigt at simulere ti år med vejrdata for indeklimasimuleringsprogrammet, før den nødvendige stabilitet er opnået.

Simuleringerne skal dokumentere, at det af bygherren beskrevne indeklima (temperatur, relativ fugtighed og TWPI) samt energiforbrug overholdes i lavenergimagasinet.

Til validering af det specificerede indeklima og den heraf afledte bevaringskvalitet (TWPI) skal der anvendes vejrdata i henhold til

Bygningsreglementet (BR18) samt klimadata for ekstremsituationer og for fremtidigt klima. Sidstnævnte kræves på grund af bygningens funktion og forventede lange levetid.

Derudover skal det i projektet sikres, at forholdene i terrænet under og i en afstand på 8 m temperaturmæssigt ikke bliver forstyrret af omkringliggende byggerier og anlæg.

For simuleringen anbefales det, at den førnævnte metode anvendes, og der udføres en beregning på 10 år med de valgte klimadata, indtil den nødvendige stabilitet er opnået:

- Validering af bygningens indeklima med den valgte klimaskærmskonstruktion samt installationer, m.v., med dynamiske indeklimasimuleringer. I givet fald inddrages forhold fra tilstødende matrikler eller på eget matrikel, der kan have temperaturmæssig indflydelse på terrænet under og i en omkreds på 8 m omkring lavenergimagasinet. Der simuleres med klimadata, som findes på Ålborg Universitets hjemmeside i forbindelse med BSIM-software: https://www.build.aau.dk/til-byggebranchen/software/bsim/klimadata, eller indbygget i det respektive program:
  - Almindeligt gældende standardklimadata for Danmark (DRY 2013 for kalenderåret 2010) i henhold til BR18.
  - Klimadata for ekstremsituationer ("hot", "cold", "sunny" og "cloudy") er ikke velegnede til selvstændige simuleringer, da disse datasæt ikke dækker en fuld 10-årig periode, hvilket er nødvendigt for at opnå stabilitet. Hvis man alligevel ønsker at vurdere indeklimaets følsomhed over for sådanne scenarier, kan det f.eks. ske ved først at simulere otte år med DRY2013-data, efterfulgt af to år med klimadata for ekstremsituation.
  - Klimadata til simulering af fremtidigt klima i 2050 og i 2090.

Resultater fra simuleringen skal:

- Sammenstilles i tabeller for hvert klimadatasæt og sammenholdes med det af bygherren beskrevne indeklima (TWPI) og energiforbrug.
- Inkluderes i en afsluttende rapport med evaluering af simuleringerne for at vise, at bygningen i endelig brugstilstand overholder indeklimaspecifikationer, bevaringskvalitet (TWPI) og energiforbrug med:
  - Klimadata DRY 2013 i kalenderår 2010 (i henhold til bygningsreglement)
  - Klimadata for ekstremsituationer ("hot", "cold", "sunny" og "cloudy")
  - Klimadata for fremtidigt klima i 2050 og i 2090

5.4 Klimaskærmens tæthed

I det følgende beskrives krav til klimaskærmens tæthed og tilhørende dokumentation.

5.4.1 Lutskifte

Den samlede tæthed af klimaskærmen skal resultere i et gennemsnitligt luftskifte på under 0,02 h^{-1} for hele magasinområdet. I tilfælde af, at der etableres flere klimazoner, skal det gennemsnitlige luftskifte for hver klimazone ligeledes være under 0,02 h^{-1}.

Bestemmelse af klimaskærmens tæthed foretages for hver klimazone ved måling af det gennemsnitlige luftskifte i en periode på mindst en måned, f.eks. ved perfluorocarbon-/PFT-sporgas metoden jf. SBi-anvisning 227 (Bergsøe, 1992).

Resultatet dokumenteres i en rapport med angivelser af de målte værdier i forhold til kravet for et gennemsnitligt luftskifte under 0,02 h^{-1}.

5.4.2 Radon

I det følgende beskrives krav til radonsikring og dokumentation af radonniveauer.

Radonsikring

Det lave luftskifte i et lavenergimagasin medfører risiko for ophobning af radon i indeklimaet, da eventuelt indtrængende radon stort set ikke vil fortyndes. Derfor skal bygningen udføres med radonsikring, så radonindholdet i indeklimaet ikke overstiger 100 Bq/m^3. Radonsikringen skal kvalitetskontrolleres grundigt ved montage.

Kravet til denne radonsikring af bygningen fastholdes, uanset at der, jf. BR18 og "Bekendtgørelse om ioniserende stråling og strålebeskyttelse" (BEK nr. 84 af 02/02/2018) i bygninger uden opholdsrum og uden faste arbejdspladser ikke stilles krav til radonniveauet i indeklimaet. En af grundene til dette er, at der andre steder i bygningen kan befinde sig opholdsrum, og at luft fra magasinet kan infiltrere disse områder.

Måling af radonniveau

Der stilles krav om:

- Måling i lavenergimagasinet til bestemmelse af den estimerede årsmiddelværdi af radonindholdet i indeklimaet, jf. SBi-anvisning 270 (Rasmussen, 2018), efter ibrugtagning af bygningen. Målinger udføres uden nogen form for aktivt radonsug, selvom der måtte være forberedt til det.
- Dokumentationsrapport med angivelse af de målte værdier i forhold til kravet om maksimalt 100 Bq/m^3 radonindhold i indeluften.

6

Krav til klimaskærmens elementer (tag, ydervægge, m.v.)

6.1 Krav til tagkonstruktion

Tagkonstruktionen i et lavenergimagasin isoleres kraftigt. U-værdien for tagkonstruktioner i eksisterende lavenergimagasiner ligger typisk ved 0,09-0,12 W/(m²K).

Tagkonstruktionens valgte U-værdi, inkl. linjetab ved ydervægskonstruktion, skal valideres ved en simulering, som nævnt i afsnit 5.3.

Følgende krav stilles til isolering og tæthed:

- Isoleringsevne: U-værdi mindre end 0,12 W/(m²K).
- Der må ikke etableres ovenlys – heller ikke som røglemme. Det sidste skal forhandles med brandmyndighederne.
- Gennembrydninger gennem tagkonstruktionen er ikke tilladt, blandt andet for at sikre overholdelse af krav til klimaskærmens tæthed (afsnit 5.4).
- Samlinger med andre bygningsdele, komponenter eller fuger skal udføres med to-trins-tætning, langtidsholdbare og så drifts- og vedligeholdelsesvenlige som muligt. Elastiske fuger som tætning alene er ikke tilladt.
- Der må, af hensyn til krav til fugtsikring af bygningen, ikke udføres grønt tag.

6.1.1 Specielt vedrørende solceller

Det kan være oplagt at inkludere solceller til magasinets energiforsyning, men det må frarådes at montere disse på taget, grundet høje krav om fugtsikkerhed i magasinrummene. Risici omfatter bl.a. gennemføring gennem tagmembran, samt vanskelig tilgang til taget for vedligeholdelse.
Det kan i stedet anbefales at placere solceller på grunden ved siden af bygningen. Hvis placering på tag er nødvendigt, kan en løsning være at etablere et tilgængeligt og inspicerbart tagrum mellem tag og magasin – f.eks. som en udeluftventileret saddeltagskonstruktion. Endvidere bør risikoen for brandfare i solpaneler og batterier nøje overvejes, og inddrages ved valg af placering.

6.2 Krav til ydervægge

Ydervægge i et lavenergimagasin isoleres kraftigt. U-værdien for ydervægge i eksisterende lavenergimagasier ligger typisk på 0,12-0,13 W/(m²K).

Ydervægskonstruktionens valgte U-værdi, inkl. linjetab ved tagkonstruktion og fundament/terrændæk, skal valideres ved en simulering, som nævnt i afsnit 5.3.

→

Ydervægge og tag opføres tætte og velisolerede, med et minimum af døre, vinduer og gennembrydninger, og med isolering typisk i størrelsesordenen 250-300 mm.

Wille Dahles

SOBYG A·S

Der stilles krav om:

- Isoleringsevne: U-værdi mindre end 0,13 W/(m^{2}K).

For klimaskærmens tæthed stilles følgende krav:

- Ydervægskonstruktionen skal udføres efter princippet "to-trins-tætning", for at sikre overholdelse af krav til klimaskærmens tæthed, se afsnit 5.4.
- Der må ikke etableres vinduer.
- Brandceller skal vælges tilpas små (f.eks. under 1.000 m^2), så der ikke er behov for røglemme. Det præcise forhold skal forhandles med brandmyndighederne.
- Ydervægskonstruktionen skal etableres med så få gennembrydninger som muligt, blandt andet for at sikre overholdelse af krav til klimaskærmens tæthed, se afsnit 5.4.
- Samlinger med andre bygningsdele, komponenter eller fuger skal udføres med to-trins-tætning, langtidsholdbare og så drifts- og vedligeholdelsesvenlige som muligt. Elastiske fuger som tætning alene er ikke tilladt.

6.3 Krav til skillevægge mod andre klimazoner

Afhængigt af rumdisponering og den valgte grundplan vil der være indre skillevægge mod områder med andre klimazoner, eksempelvis komfortzoner, eller andre magasinklimazoner.

Grænseflader mellem basismagasinet og andre faciliteter skal udformes, så de understøtter det passive princip for at holde en korrekt temperatur i magasinet. Dette stiller krav til isolering og tæthed, med et minimum af gennemføringer og gennembrydning.

Eventuelle skillevægskonstruktioners U-værdi, inkl. linjetab ved tagkonstruktion og terrændæk/fundament, skal indgå i simuleringen, som nævnt i afsnit 5.3.

Der stilles krav om:

- Isoleringsevne mod komfortzoner: Som udgangspunkt samme som ydervægge (afsnit 6.2), men kan reduceres, da væggen ikke vender mod udetemperatur. Lavere isolering kan være tilstrækkelig og omkostningsbesparende.
- Isoleringsevne mod ultratørre, tørre, eller kølige klimazoner skal dimensioneres, så energiforbrug og temperaturstabilitet i begge magasinzoner kan valideres som beskrevet i afsnit 5.3.
- Klimaskærmens tæthed: Samme som for ydervægskonstruktioner (afsnit 6.2).

6.4 Krav til adgangsveje

Den isolerende funktion af klimaskærmen mod udeklimaet skal brydes så lidt som muligt, det vil sige, at der ikke må være vinduer eller ovenlys, og døre samt eventuelle andre absolut nødvendige gennembrydninger – såsom røglemme – skal holdes på et minimum og udføres isoleret.

Adgangsveje til lavenergimagasinet skal holdes på et minimum. Der er typisk kun behov for én adgangsvej. Adgangsvejen skal etableres, så luftskiftet og energitab i både lukket tilstand og ved anvendelse er minimeret. Adgangsvejen skal derfor etableres som en sluse med to porte, hvor den første port, ud over klimaskærm, har andre funktioner i forhold til f.eks. sikkerhed og brand, mens den anden port – en hurtiggående led-hejseport – skal sikre et minimalt luftskifte.

Der stilles krav om:

- Adgangsvejen etableres fra tilstødende lokaler – ikke direkte fra det fri.
- Adgangsvejen udføres med sluse. Indeklimaet i slusen bliver ikke styret separat.

For port ind til slusen:

- Denne adgangsport skal vælges, så den opfylder de nødvendige funktioner, der er nødvendige for adgangsveje i magasiner i al almindelighed, herunder f.eks. brand og sikkerhed.

Port fra slusen ind til lavenergimagasinet:

- Denne adgangsport skal være en hurtiggående ledhejseport ("bananport").
- Denne adgangsport leveres og monteres så tæt som muligt, så overholdelse af krav til klimaskærmens tæthed sikres, se afsnit 5.4.
- Fuger omkring porten skal udføres med to-trins-tætning.

6.5 Krav til nødudgange

Antallet af nødudgange skal holdes på et minimum. Dette forhandles med brandmyndighederne.

Der stilles krav om:

- Døre til nødudgange skal være højtisolerede, med en samlet U-værdi på mindre end 1,0 W/(m²K).
- Nødudgangsdøre skal leveres og monteres så tætte, at overholdelse af krav til klimaskærmens tæthed sikres, se afsnit 5.4.
- Fuger skal udføres med to-trins-tætning.

6.6 Krav til terrændækskonstruktion

Terrændækskonstruktionen i et lavenergimagasin er uortodoks, idet den skal være uden varmeisolering, da gulvet og det underliggende jordvolumen udnyttes som passivt varmelager (se afsnit 1). Derfor opfylder et lavenergimagasin som udgangspunkt ikke Bygningsreglementets mindstekrav til klimaskærmens isoleringsevne (U-værdi mindre end 0,2 W/(m²K) (BR18, §257). Men dels er et lavenergimagasin en uopvarmet bygning, og dels kan BR 18's krav til energiramme opfyldes, når energibehovet anskues for den samlede bygning. Dette bør pointeres i forbindelse med myndighedsgodkendelse.

6.6.1 Terrændækkets termiske egenskaber

For at udnytte det temperaturstabiliserende potentiale af jorden under bygningen, isoleres terrændækket i et lavenergimagasin ikke, og der anvendes et materiale, der leder varme godt, f.eks. beton. U-værdien for terrændæk i udførte lavenergimagasiner ligger typisk ved 3,8 til 4,4 W/(m²K). Til det kapillarbrydende lag benyttes f.eks. singels med en høj varmeledningsevne (f.eks. lambda = 2 W/mK) for at undgå, at det kapillarbrydende lag er med til at isolere gulvet.

↓

Terrændæk under konstruktion, med et kappilarbrydende lag af singels dækket af en plastdug. Herpå støbes betondækket, inklusiv forberedelse til montering af kompaktreolskinner.

Det betyder samtidigt, at jorden under og i en vis omkreds omkring bygningen ikke samtidigt må anvendes til lagring af energi, hverken til varme- eller kølebehov. Jorden må heller ikke på anden måde påvirkes, så dens naturlige temperaturforhold bliver forstyrret. En friholdt omkreds på 8 m anslås at være en passende afstand.

Terrændækskonstruktionens valgte U-værdi skal valideres ved en simulering, inkl. linjetab ved ydervægskonstruktionen og eventuelle forhold i terrænet i 8 m under og omkring lavenergimagasinet, som nævnt i afsnit 5.3. I den forbindelse skal der tages højde for eventuelle isolerende egenskaber ved det kapillarbrydende lag, som der skal etableres til fugtsikring. Der anbefales at bruge singels eller skærver som kapillarbrydende lag.

Idet lavenergimagasiner har et ekstremt lavt luftskifte, skal der i forbindelse med konstruktion af terrændækket udføres radonsikring. Til dokumentation af den udførte radonsikring udføres radonmålinger, som nævnt i afsnit 5.4.2.

Følgende krav stilles:

- Isoleringsevne: U-værdi større end 3,7 W/(m^{2}K). Isolansen af det kapilarbrydende lags hele tykkelse skal medregnes i sin fulde størrelse i tør tilstand, dvs. uden reduktioner, jf. DS 418:2011.
- Komponenter der påvirker jordtemperaturen, f.eks. anlæg til jordvarme/jordkulde, må ikke etableres under og i en afstand på 8 m til magasinets klimaskærm og bygningsdele. Tilstødende bygningskroppe med andet indeklima end lavenergimagasinet skal udføres med et højtisoleret terrændæk, dvs. U-værdi mindre end 0,15 W/(m^{2}K).

For klimaskærmens tæthed stilles følgende krav:

- Terrændækskonstruktionen skal udføres så lufttæt som muligt, for at sikre overholdelse af krav til klimaskærmens tæthed, se afsnit 5.4.
- Terrændækskonstruktionen skal etableres med så få gennembrydninger som overhovedet muligt, blandt andet for at sikre overholdelse af krav til klimaskærmens tæthed, se afsnit 5.4.
- Samlinger mellem bygnings-/konstruktionsdele eller fuger skal udføres med langtidsholdbare løsninger, som f.eks. membraner, dilatationsprofiler eller lignende drift- og vedligeholdelsesfrie samlinger. Elastiske fuger som tætning alene er ikke tilladt.

6.6.2 Specielt om radonsikring
Følgende krav stilles:

- Terrændækskonstruktionen skal udføres, så radonniveauet i indeklimaet i byggeriet ikke overstiger 100 Bq/m^3, se også afsnit 5.4.2.
- Til opfyldelse af ovennævnte funktionskrav skal der primært anvendes langtidsholdbare, tætnede principper. Dette kan kombineres med trykudligning under terrændækket/passivt radonsug. Her gøres der opmærksom på, at funktionskrav til radonindholdet i indeluften skal være opfyldt, uden at der er tilkoblet aktivt radonsug, da aktivt radonsug er energi-, drifts- og vedligeholdelseskrævende.

Følgende punkter skal der – ud over almindelig byggeskik – tages særligt hensyn til ved radonsikringen. Listen er ikke udtømmende, men adresserer typiske udfordringer:

- Ved anvendelse af betondæk som lufttætnede lag skal betonkvalitet, svindarmering, efterbehandling, placering og udførelse af dilatationsfuger udføres efter gældende regler og afstemmes, så der opnås en betonplade uden gennemgående revner.
- Samlinger mellem bygnings- og konstruktionsdele eller fuger udføres med langtidsholdbare løsninger, som f.eks. membraner, dilatationsprofiler eller lignende drifts- og vedligeholdelsesfrie samlinger. Elastiske fuger som tætning alene er ikke tilladt.
- Eventuel trykudligning under terrændæk eller forberedelse til radonsug må ikke føres igennem lavenergimagasinets klimaskærm.

6.6.3 Specielt om gulvmonteret inventar

- Inventar (reoler, skabe, etc.) kan med fordel være med åbne sokler, der tillader luftcirkulation over terrændækket og i forbindelse med det øvrige indeklima.

6.7 Krav til indvendige overflader

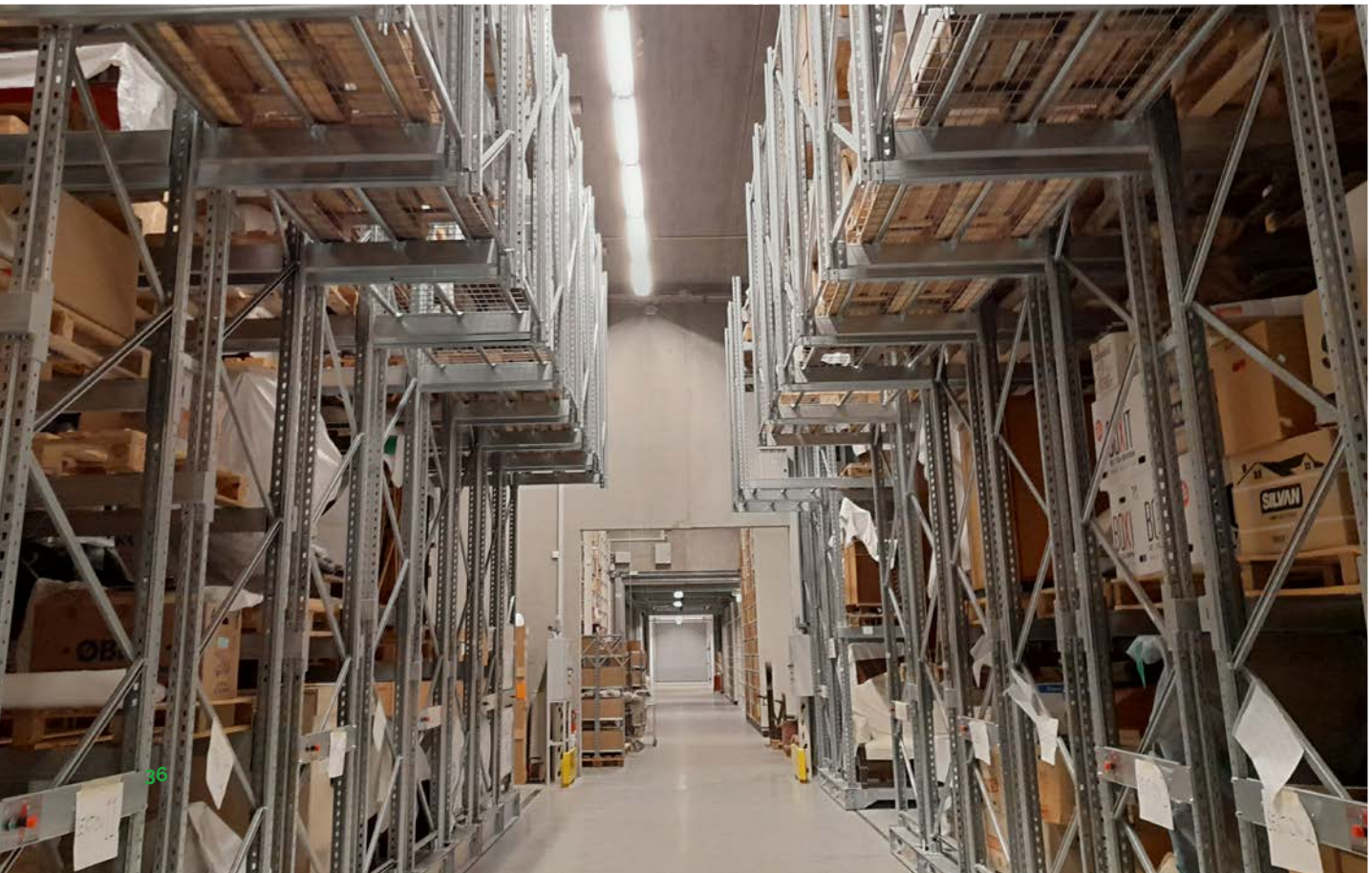
Generelt:

- Magasinet bør udføres som en "lavt forurenende bygning", jf. *Dansk Indeklima Mærkning* (DIM): https://indeklimamaerket.dk. Der bør foreligge dokumentation for dette.

Specielt for vægoverflader:

I lavenergimagasinet skal vægoverflader være hvide af hensyn til energiforbruget til belysning, samt være diffusionsåbne for bidrag til vægmaterialers stabilisering af indeklimaet. Der anvendes overfladebehandling med alle de følgende egenskaber:

- Farve: hvid
- Maksimal diffusionsåben
- Uorganisk/mineralsk
- Godkendt til anvendelse i indeklima
- Eksempler på brugbare malingstyper inkluderer ren silikatmaling (uden plastbinder) eller cementbaseret murmaling.



Specielt for gulvoverflader:

- Gulvoverflader skal være lyse og rengøringsvenlige, dvs. at der typisk kræves en overfladebehandling på terrændækkets beton.
- Overfladen skal være stærk nok til at modstå slid fra tung færdsel med palleløftere og gaffeltruck.

6.8. Øvrige generelle funktionskrav

Vær opmærksom på, at andre funktionskrav - eksempelvis vedrørende brand, sikring og arbejdsmiljø - kan udfordre lavenergimagasinkonceptet. Disse forhold bør derfor afklares i den tidligste fase af planlægningen af en om-, ud- eller nybygning.

- Brand: Brandkrav til en bygning fastsættes i Bygningsreglementet (BR18). Brandsyn udføres af det kommunale redningsberedskab. Derfor kan man opleve varierende krav til, hvordan brandkravene skal opfyldes, afhængigt af det lokale beredskab og bygningens konkrete indretning. Alternativer til krav om f.eks. sprinkleranlæg og røglemme bør drøftes med de lokale brandmyndigheder (se også afsnit 6.1, 6.2 og 6.5).
- Sikring: Vejledning til valg af sikringsniveau findes eksempelvis i Sikringsguiden fra *Forsikring og Pension:* https://www.sikringsguiden.dk/. Man skal her kontrollere, at valget af materialer til et bestemt sikringsniveau ikke strider mod materialevalg til lavenergimagasiner. Det samme gør sig gældende, hvis man ønsker at kunne opbevare genstande eller værker, der er omfattet af National Indemnity (NI). NI er en statslig forsikringsordning, hvor staten kan påtage sig den forsikringsmæssige risiko for danske og udenlandske udlån af værker: https://kum.dk/ministeriet/organisation-og-institutioner/bestyrelser-raad-naevn-og-udvalg/kulturministeriets-sikringsudvalg.
- Arbejdsmiljø: Blandt andet på grund af det lave luftskifte og manglende dagslys i lavenergimagasiner er det ikke foreneligt med indretning af permanente arbejdspladser i selve magasinet. Især ved indflytning i et nybygget magasin skal man tage højde for dette, ved tilrettelæggelse af arbejdstid.

7
Krav til installationer

7.1 Ventilation

I det følgende beskrives kun kravene til basisklima og de tekniske installationer, der tilvejebringer det. I forhold til magasiner med tørt, ultratørt eller køligt klima, vil der være afvigende funktionskrav fra basisklima – eksempelvis øget affugtningskapacitet, øget ventilationsrate eller køleanlæg.

7.1.1 Ventilationsprincip

Der skal benyttes opblandingsventilation, hvor den affugtede luft blæses ind fra kanaler i loftet, og blandes op med rumluften

↓→

Det meget begrænsede behov for mekanisk klimastyring i lavenergimagasiner betyder, at ventilationsanlæg gerne er små og pladsbesparende. De primære elementer er en affugter og en recirkulerende ventilator.

7.1.2 Dimensionerende luftmængder

- Ventilationsanlægget skal indblæse en luftmængde, der sikrer en tilstrækkelig omrøring af luften, så der opnås jævn fordeling af konditioneret luft, med jævn fugt- og temperaturfordeling. Det vurderes, at et internt luftskifte, det vil sige en recirkulationsrate, på 0,25 gange i timen er tilstrækkeligt for at opnå dette.

7.1.3 Ventilationsanlæg

Princip:

- Aggregatet skal være med recirkulering og uden tilførsel af friskluft.

Filtre:

- Der skal som minimum benyttes et F7-filter med et begyndelsestryktab på 30 Pa, og et sluttryktab på 130 Pa. Ønskes en højere luftrensningseffektivitet, kan et F9-filter med et begyndelsestryktab på 50 Pa, og et sluttryktab på 200 Pa, benyttes.
- Kulfiltre kan være et fordelagtigt tilvalg i særlige situationer med meget forurenende samlinger, som f.eks. store avissamlinger, acetatplastmaterialer, etc. Der kan benyttes posefiltre med kombineret kulimprægnering og partikelfilter, med et begyndelsestryktab på 150 Pa og et sluttryktab på 250 Pa. Hvis der benyttes kulcylindere, som kun opfanger gasser, idet partikelfiltreringen sker separat i andre (pose) filtre, er der reelt ingen stigende tryktab over kulfilterets levetid.
- Behovet for filtrering af skadelige stoffer må baseres på en konserveringsfaglig vurdering af type og omfang af eventuelle problematiske genstande i magasinet.
- Filtre skiftes, når tryktabet overstiger det maksimale (ønsket) sluttryktab.
- Kulfiltre skiftes når filtereffekten er opbrugt, hvilket eksempelvis kan overvåges ved VOC- eller korrosionssensorer (afsnit 7.2.5).

DST
AF08
MAX

Varmeflade/køleflade:

- Da temperaturreguleringen sker passivt via korrekt dimensioneret isolering af klimaskærmen, bør aktiv temperaturregulering ikke være nødvendig.

Ventilatorer og motorer:

- Der skal benyttes kammerventilatorer (ventilatorer med bagud krummede skovle (B-hjul).
- Der skal benyttes IE3- eller IE4-motorer. Gerne permanentmagnet motorer (PM-motorer).

Indblæsnings- og udsugningsarmaturer:

- Det skal sikres, at der ikke sker kortslutning af luft i magasinområdet, så luften fra indblæsningsarmaturet går direkte til udsugningsarmaturet.

Affugtningsanlæg:

- Der skal anvendes en energieffektiv absorptionsaffugter med genvinding af varmen fra regenereringsluften. Den opvarmede fugtige luft skal føres via en krydsstrøms-varmeveksler, inden den ledes ud i det fri. Dette kan reducere energiforbruget til regenereringsvarme markant.

Placering af tekniske anlæg:

- Tekniske anlæg placeres i teknikrum inde i bygningen, men udenfor selve magasinområdet. Der skal etableres afløb i teknikrummet til bortledning af vand fra affugteren.

Styring og regulering:

- Ventilationsanlægget styres efter at opretholde en ønsket relativ fugtighed i magasinrummet. Affugteren regulerer efter fugtighedssensorer placeret jævnt fordelt i hele magasinet og i forskellige højder (typisk tre niveauer), samt i udsugningskanalen. Sætpunktet indstilles, så en ønsket maksimal RF ikke overskrides.
- Der benyttes ikke befugtningsanlæg, da nedre grænser for RF opretholdes passivt af bygningen og dens temperatur.

7.2 Indeklima

I det følgende beskrives målepunkter og deres placering, sensortyper og deres nøjagtighed samt krav til kalibrering, dataindsamling og datalagring.

7.2.1 Målepunkter

Her specificeres typer og den optimale placering af målepunkter, så der kan opretholdes et ønsket indeklima.

→
Øverst/midt: Elmålere på de enkelte anlægskomponenter dokumenterer magasinets energiforbrug. Energiforbrug bør logges separat for hver enkelt anlægskomponent, herunder affugter, ventilator og CTS, evt. varmeflade, etc.

Nederst: Klimasensorer skal placeres jævnt fordelt i hele magasinet og i forskellige højder.

7.2.2 Sensorer i indblæsningskanal (temperatur og fugtighed)
Sensorer til måling af indblæsningstemperatur og relativ fugtighed placeres i indblæsningskanalen efter aggregatet.

Acceptabel afvigelse:

- Temperatursensor [°C]: +/-1 °C
- Relativ fugtighedssensor [%]: +/-3 % RF

7.2.3 Sensorer i udsugningskanal (temperatur og fugtighed)
Sensorer til måling af udsugningstemperatur og relativ fugtighed placeres i udsugningskanalen før aggregatet.

Acceptabel afvigelse:

- Temperatursensor [°C]: +/-1 °C
- Relativ fugtighedssensor [%]: +/-3% RF

7.2.4 Sensorer i lokaler og haller (temperatur og fugtighed)
Fugt- og temperatursensorer skal placeres jævnt fordelt i hele magasinet og i forskellige højder. De kan enten placeres i midten af magasineringsrummet, eller i hver sin ende af magasineringsrummet. Forskellen mellem de målte temperaturer i de forskellige højder må ikke være mere end 2 °C.

Acceptabel afvigelse:

- Temperatursensor [°C]: +/-1 °C
- Relativ fugtighedssensor [%]: +/-3 % RF

7.2.5 Forureningssensorer
Forureningssensorer kan være tilvalg, primært benyttet i forbindelse med kulfiltrering, eller hvis særligt forurenende materialer eller aktiviteter findes i nærområdet.

Partikelmåler:
Partikelsensorerne placeres i udsugningskanalen før aggregatet. Der benyttes enten infrarøde- eller lasersensorer.

Acceptabel afvigelse:

- Ultrafine partikler: [mindre end 1,5 µm] +/- 10 %
- Større partikler: [Fra 1,5 til 10 µm] +/- 5 %

VOC (volatile organic compounds) sensor:
VOC-sensorerne placeres i udsugningskanalen før aggregatet. Der benyttes elektrokemiske sensorer.

Acceptabel afvigelse:

- VOC: [koncentration] +/- 20%

Korrosionssensorer:
Et alternativ til VOC-sensorer er korrosionsmålere, der angiver luftens "aggressivitet" i forhold til metalbelagte elektroniske sensorer, ved måling af raten, hvorved de korroderer. Sensorer er typisk baseret på sølv og kobber.

7.2.6 Kalibrering af udstyr
Alle sensorer skal kalibreres en gang årligt, med sporbart og akkrediteret udstyr. Sensorer skal, i den forbindelse, være monteret med nem adgang.

7.2.7 Data, adgang og ejerskab
Den følgende specifikation omhandler driftsdata, som forbliver tilgængeligt for magasinet, uafhængigt af hvem der har servicekontrakten.

I CTS/BMS-anlægget bør der være et modul til registrering af alle data fra regulerede eller styrede parametre, regulerings- og styringssignaler, driftsstatus og alarmer, samt energiforbrug. Data for elforbruget til hele magasinet, samt separat elforbrug til ventilationsanlæg, affugter og belysningsanlæg, samt anden drift, skal opsamles.

Nedenstående tre afsnit stammer fra vejledningen vedr. bygningsautomatik i Bygningsreglementet (BR18):

- Alle data fra regulerede eller styrede parametre, regulerings- og styringssignaler, driftsstatus og alarmer skal opsamles med højst 5 minutters opløsning, og gemmes i mindst 60 uger. Rum- og udetemperaturer behøver dog kun at blive logget med højst 15 minutters opløsning.
- Desuden etableres mulighed for, at driftspersonalet kan etablere samlede ad hoc logninger af parametre, signaler, driftsstatus og alarmer efter eget valg, med valgfri opløsning (5 sek. – 6 timer) og for tidsperioder, de selv kan bestemme.
- Målerdata opsamles med intervaller på højest en time og gemmes mindst 10 år. Målerdata vises i diagrammer og i tabeller som timeværdier og summeret for døgn, uge, måned og år. Tabellerne udformes, så data kan trækkes over til videre anvendelse i andre it-systemer.

↑
Flytbar energimåler monteret direkte på affugter.

7.3 Funktionsafprøvning og driftskontrol

Her beskrives, hvilke funktionsafprøvninger og driftskontrol der skal foretages.

7.3.1 Funktionsafprøvning

Der skal foretages følgende funktionsafprøvninger:

- Kontrol af luftmængder
- Kontrol af SEL-faktorer (specifikt elforbrug). Der er ikke krav til SEL-faktoren for recirkuleringsanlæg i BR18, men et rimeligt krav vil være, at den maksimalt må være 600 W/ m^3/s.
- Kontrol af styring og regulering (temperatur- og fugtstyring)
- Kontrol af affugtningsanlæg. Det kontrolleres, at affugteren kan levere den nødvendige luftmængde (fra ventilationsanlægget) med den ønskede fugtighed og med mindst muligt elforbrug. Der er ikke krav til energiforbruget for affugtningsanlæg i BR18, men det årlige energiforbrug til affugtningsanlæg og ventilationsanlæg for et lavenergimagasin må samlet ikke overstige 3 kWh per kubikmeter magasinvolumen. Best practice viser, at der kan opnås et forbrug på under 1 kWh/m^3/år.

Der tages udgangspunkt i kravene og vejledningen vedr. funktionsafprøvning af ventilationsanlæg i Bygningsreglementet (BR18).

Der henvises desuden til Kapitel 9 i DS 447:2021 (Ventilation i bygninger).

7.3.2 Drift og vedligehold

Formålet med energieffektiv drift er at sikre, at anlæggene leverer de ydelser, de er projekteret eller dimensioneret til med det mindst mulige energiforbrug og lavest mulige service- og vedligeholdelsesudgifter.

De tekniske anlæg omfatter ventilations- og affugtningsanlæg, og ydelserne er termisk og atmosfærisk indeklima.

Der henvises til Kapitel 9 i DS 447:2021 (Ventilation i bygninger). Service bør foretages af ventilationsfirmaer, der er medlemmer af VENT-ordningen.

Referencer

Bastholm, C.J., Andersen, B., Frisvad, J.C., Oestergaard, S.K., Nielsen, J.L., Madsen, A.M., Richter, J., A novel contaminant in museums? A cross-sectional study on xerophilic *Aspergillus growth in climate-controlled repositories. Science of the Total Environment* 944 (art. 173880). Online: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173880

Bergsøe, N.C., *Passiv Sporgasmetode til Ventilationsundersøgelser. Beskrivelse og Analyse af PFT-Metoden, SBI-Raport 227*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut SBi, 1992, 53 s.

DS 418:2011, *Beregning af bygningers varmetab*. København: Dansk Standard, 2011, 126 s.

DS 447:2021. *Ventilation i bygninger – Mekaniske, naturlige og hybride ventilationssystemer*. København: Dansk Standard, 2021, 98 s.

DS/EN 15757:2010. *Bevaring af kulturarv – Specifikationer for temperatur og relativ fugtighed med henblik på begrænsning af klima-betingede mekaniske ødelæggelser i organiske hygroskopiske materialer*. København: Dansk Standard, 2010, 14 s.

DS/EN 16893:2018. *Bevaring af kulturarv – Specifikationer for placering, opførelse eller ændring af bygninger beregnet til magasinering og brug af samlinger*. København: Dansk Standard, 2018, 55 s.

Indenrigs- og Sundhedsministeriet, *Bekendtgørelse om ioniserende stråling og strålebeskyttelse* (BEK nr. 84 af 02/02/2018). Online: https://retsinformation.dk/eli/lta/2018/84

Nishimura, D.W., *Understanding Preservation Metrics*. Rochester: Image Permanence Institute, 2007, 11 s. Online: https://rit.edu/ipi/publications

Padfield, T., The Preservation Index and the Time Weighted Preservation Index. *Conservation Physics*, 2024. Online: https://conservationphysics.org/twpi/twpi_01.php

Richardson, E.J., Cummings, M., Bigourdan, J.-L., Context, Development, and Intent: An Introduction to the IPI Preservation Metrics. *Heritage* 6, 2023, 4202-4213. Online: https://doi.org/10.3390/heritage6050221

Rasmussen, M.H., Kjerulff, A.-K., Hovmand, I., Ramskov, C., Westergaard, M. (red.), *Anbefalinger til museernes forebyggende bevaringsindsatser, et webbaseret ressource-værktøj til museerne*. Slots- og Kulturstyrelsen, Københavns Museum og Konserveringscenter Vejle, 2021. Online: https://konsvejle.dk/vejledninger/anbefalinger-til-museernes-forbyggende-bevaringsindsatser/

Rasmussen, T.V., *Måling af radon i bygninger. SBi-anvisning 270*. København: Statens Byggeforskningsinstitut, 2018, 66 s.

Ryhl-Svendsen, M., Jensen, L.Aa., Bøhm, B., Larsen, P.K., *Low-energy Museum Storage Buildings: Climate, Energy Consumption, and Air Quality. UMTS Research Project 2007-2011: Final Data Report*. Kgs. Lyngby: National Museum of Denmark, 2012, 122 s. Online: https://doi.org/10.5281/zenodo.8403981

Ryhl-Svendsen, M., Jensen, L. Aa., Larsen, P.K., *Bæredygtige Museumsmagasiner (Rapport)*. København: Det Kongelige Akademi, under udarbejdelse: forventes 2025.

Ryhl-Svendsen, M., Smedemark, S., Environmental Conditions for Danish Storage Buildings: A Summary of 20 Years of Air Quality Surveys, *Studies in Conservation* 70, 2025, 148-169. Online: https://doi.org/10.1080/00393630.2024.2351761

Ræder Knudsen, L., Lundby S.R., Performance of Danish low-energy museum storage buildings. *ICOM-CC 18th Triennial Conference, Copenhagen, 4–8 September 2017*, 2017, art. 1515. Online: https://www.icom-cc-publications-online.org/1601/Performance-of-Danish-low-enetgy-museum-storage-buildings

Ræder Knudsen, L., Nygaard, S., Klarskov Sylvester, B., Bamford, S., Christensen, J-E., Djernes Østergaard, J. *Bæredygtigt byggekoncept for lavenergi museumsmagasiner (Rapport)*. Vejle: Konserveringscenter Vejle, under udarbejdelse: forventes 2025.

Social- og Boligstyrelsen, *Bygningsreglementet 2018*. Herlev: Molio, 2018 (samt med de til en hver tid gældende ændringer), 240 s. Online: https://bygningsreglementet.dk

Yderligere litteratur

Larsen, P.K., *Sustainable museum storage buildings with low energy consumption: three models from Denmark*. Visby: Riksantikvarieämbedet, 2023, 37 s. Online: https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1752684&dswid=2925

Padfield, T., Ryhl-Svendsen, M., Larsen, P.K., Jensen, L.Aa., A review of the physics and the building science which underpins methods of low energy storage of museum and archive collections. *Studies in Conservation* 63-S1, 2018, 209-215. Online: https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1504456.

Ryhl-Svendsen, M., Jensen, L.A., Larsen, P.K., Bøhm, B., Padfield, T., Ultra-low-energy museum storage. *ICOM CC 16th Triennial Conference, Lisbon, 19-23 September 2011*, 2011, art. 268. Online: https://www.icom-cc-publications-online.org/1201/Lightweight-or-heavy-The-construction-of-low-energy-museum-buildings

Appendiks

Beregning af Time-Weighted Preservation Index

Preservation Index (PI) er en faktor baseret på indeklimaets temperatur og relativ fugtighed, som beskriver hastigheden af kemisk nedbrydning for organiske materialer, primært ved hydrolyse. Jo højere indekstal, desto langsommere sker nedbrydningen (= længere genstandsliv).

Grundlaget for PI er udledt fra kemiske reaktionshastigheder og deres temperaturafhængighed, som beskrevet i Arrheniusligningen, og er baseret på typiske kulturarvsmaterialers nedbrydning, undersøgt ved accelererede ældningstests.

PI konceptet er udviklet af Image Permanence Institue ved Rochester Institute of Technology (Nishimura, 2007; Richardson et al., 2023). I forbindelse hermed, har Image Permanence Institute udgivet en online regnemaskine for bevaringsindekset (PI) ved en fast temperatur og relativ fugtighed: http://www.dpcalc.org

For beregning af bevaringsindekset i et dynamisk varierende indeklima over længere tidsrum, foretages en tidsvægtet analyse af alle de fortløbende enkeltmålinger, hvilket resulterer i et Time-Weighted Preservation Index (TWPI). For evaluering af et magasins TWPI og sammenligning mellem TWPI ved forskellige indeklima, skal klimadata for præcis ét eller flere hele år benyttes, således at vinter og sommerperioder vægtes lige i beregningen.

Image Permanence Institute formidler en integreret web-platform med software for TWPI-beregning, analyse og datalagring (på abonnementbasis): http://eclimatenotebook.com. Softwaren udregner desuden risiko for metalkorrosion, skimmelvækst og mekanisk skade på organiske materialer.

Algoritmen bag Image Permance Institutes værktøj er ikke åben tilgængelig, men på websiden https://conservationphysics.org findes en open source-version af samme type beregning. Denne giver inden for tætte marginaler samme TWPI-udregning som Image Permanence Institutes software.

Herfra citeres metoden for beregning:

- For en temperatur T (°C) og relativ fugtighed RF (%), udregnes værdien RATE efter formlen:
- RATE = RF × 5.9 × 10^12 × exp(-90300/(8.314 × (T + 273)))
- Bevaringsindeks PI = 1/RATE
- For en tidsrække med varierende klimamålinger udregnes først RATE for hvert sæt temperatur og RF-værdier
- Herefter udregnes gennemsnittet af alle RATE værdier
- TWPI = 1/ (gennemsnit af RATE)

Kontrol: T = 20 °C og RF = 50 % skal give TWPI = indeks 43

Uddybende beskrivelse af den åbne TWPI-beregning findes i Padfield (2004).

Tabel 1: Danske lavenergi-magasiner og specifikationer for deres basis-klima.
Kilde: Ryhl-Svendsen *et al*, 2012; Ryhl-Svendsen, Jensen & Larsen, 2025; Ryhl-Svendsen & Smedemark, 2025.

Magasin	Fælles Museumsmagasiner Vejle, Hal A (Konserveringscenter Vejle)	Fælles Museumsmagasiner Vejle, Hal F (Konserveringscenter Vejle)	Ribe Magasinet (Museum Vest)	Randers Magasinet (Museum Østjylland)	
Byggeår	2003	2012	2005	2007	
Areal, basis klimazone (m^2)	1060	700	1000	1640	
Frihøjde i magasin (m)	6,3	6,2	6,2	7,0	
Temperaturkontrol, princip	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	
Sætpunkt, temperatur (°C)	Ureguleret	Ureguleret	Ureguleret	Ureguleret	
Temperatur årsklima, målt (°C)	7-17	7-19	9-15	8-19	
Fugtkontrol, princip	Recirkulering, mekanisk affugtning	Recirkulering, mekanisk affugtning	Recirkulering, mekanisk affugtning	Recirkulering, mekanisk affugtning	
Sætpunkt, affugtning (%RF)	50	50	50	55	
Fugt årsklima, målt (%RF)	45-55	45-55	45-55	40-60	
Bygningens tæthed, målt luftskifte (h^{-1})	0,05	0,01	0,03	0,04	
TWPI (indeks)	115	112	115	90	
Energiforbrug ($kWh/m^3år$)	1,5	0,7	1,5	3,0	
Måling foretaget år	2007-2010	2018-2025	2007-2010	2008-2010	
Evt. separate specialklima-zoner ud over basisområde	Tørt, Semi-tørt	Tørt, Semi-tørt	Tørt	Tørt	
Evt. særlige forhold	(b)	(c)	(d)		

a): Måling behæftet med usikkerhed.
b): Hal A er én hal ud af fire sammenhængende haller i Vejle-magasinets første byggeetape.
c): Hal F er én hal ud af tre sammenhængende haller i Vejle-magasinets udbygning 2012.
d): Bygning med saddeltag. Tegl benyttet på facade og indre vægflade.
e): Ventilation kører med et lille overtryk af udeluft samt kulfiltrering.
f): Gulv med varmeisolering.
g): Kulfilter indsat i recirkuleringsanlægget.
h): Magasinet er fælles med Det Kgl. Bibliotek, men opdelt i separate områder. Bibliotekets magasinrum styres udelukkende som specialklima og med overtryk.

	Ugerløse Magasinet (Museum Vestsjælland)	Samlingshuset Vestbjerg (Nordjyske Museer)	Høje Taastrup Magasinet (Københavns Museum)	Bevaringscenter Sønderjylland, Rødekro (Museum Sønderjylland)	Fællesmagasinet i Vinge (Nationalmuseet)
	2010	2011	2018	2021	2022
	1800	3950	5200	1900	7800
	7,6	6,8	8,0	7,9	9,4
	Grundvarme, vinter	Grundvarme, vinter	Grundvarme, vinter; Køling, sommer	Grundvarme, vinter	Passiv
	>10	>8	11-18	15	Ureguleret
	10-20	9-19	11-17	14-19	10-16
	Recirkulering, mekanisk affugtning	Recirkulering, mekanisk affugtning	Recirkulering, mekanisk affugtning	Recirkulering, mekanisk affugtning	Recirkulering, mekanisk affugtning
	55	55	50	50	55
	50-60	50-55	40-60	40-55	50-55
	0,02	<0,01	0,03	0,02	<0,01
	68	85	78	64	99
	2,4	1,4	(ca. 3) (a)	(ca. 3) (a)	0,6
	2023-2025	2024-2025	2022-2025	2024-2025	2022-2025
	Befugtet	Tørt, Køligt, Frost	Ultratørt, Køligt	Tørt, Ultratørt, Køligt, Frost	Semi-tørt, Køligt
			(e)	(f)	(g,h)

Begrebsoversigt

Her forklares rapportens vigtigste tekniske begreber i forbindelse med lavenergimagasiner til flytbar kulturarv.

Affugtning (mekanisk)

Fugt fjernes fysisk fra luften – typisk kun i perioder med høj udefugt. Lavenergimagasiner bruger energieffektive systemer med lavt elforbrug, f.eks. sorptionsaffugtere, der optager vanddamp i et tørremiddel. Disse er effektive ved lav temperatur, og derved særligt egnet til lavenergimagasiner uden opvarmning.

Basisklima

Standardklima i magasinrum: ca. 50 % relativ luftfugtighed og temperatur under ca. 17 °C. Dækker behovet for langt de fleste typer museumsgenstande.

Bufferende materialer

Materialer, som passivt optager og afgiver fugt eller varme og derved hjælper med at holde indeklimaet stabilt. Eksempler på varmestabiliserende materialer er beton og tegl. Mange organiske gensstande i museumssamlinger er fugtbuffererende, herunder objekter i træ og papir.

CO_2-udledning (byggeri)

Byggeriets samlede klimabelastning, angivet som mængden af CO_2 der frigives ved produktion og drift af bygningen. Beton er den største kilde. Der er stort potentiale til nedsættelse af CO_2-udledningen i brug af alternative materialer som træ og andre bio-materialer.

Kapillarbrydende lag

Lag af grus eller skærver (singels) under terrændækket, der forhindrer fugtoptræk fra jorden.

Klimaskærm

Bygningens ydre skal (vægge, tag, gulv), der adskiller ude- og indeklima. Skal være meget tæt og velisoleret for at beskytte mod udsving i vejr og klima, og minimere energiforbrug.

Klimazoner

Forskellige områder med særligt tilpasset klima, fx:
- Basisklima til generelle museumsgenstande
- Tørt (30–40 % RF) til metaller
- Ultratørt (<10 % RF) til arkæologisk metal
- Køligt (<10 °C) til plastik, fotografi, og andre kemisk ustabile materialer.

Lavenergimagasin

Et magasinbyggeri, der sikrer høj bevaringskvalitet (TWPI > 100) med lavt energiforbrug – under 3 kWh/m^3/år. Udnytter bygningens egne egenskaber til passiv klimastyring med minimal teknik.

Radon

Radioaktiv gas fra undergrunden. Lavenergimagasiner kræver en høj grad af radonsikring, da det lave luftskifte ellers kan føre til ophobning af radon i magasinområdet.

Relativt energiforbrug	Driftens energiforbrug målt pr. kubikmeter magasinrum. Bruges til dokumentation og sammenligning. Bedst praksis er under 1 kWh/m^3/år.
Termisk inerti	Udtrykker bygningens evne til at modvirke hurtige temperaturændringer. Skabes i magasinbygninger gennem tunge materialer, primært et uisoleret gulv, der virker som passivt varmelager.
Terrændæk	Gulvkonstruktionen mod jord. I lavenergimagasiner er betondækket ikke varmeisoleret, så jorden kan virke som passiv temperaturbuffer.
TWPI (Time-Weighted Preservation Index)	Et relativt mål, der angiver hvor godt indeklimaet beskytter organiske materialer over tid. Høj TWPI = langsom nedbrydning og lang holdbarhed. Målet for langsigtet bevaring er TWPI > 100.
Ventilation (recirkuleret)	Luften cirkuleres internt uden tilførsel af frisk luft. Der ventileres kun for affugtning og intern luftfordeling – ikke for komfort.

Kolofon

Lavenergimagasiner
- koncept og bæredygtighed

Ekspertgruppe
Morten Ryhl-Svendsen, Det Kongelige Akademi
Lise Ræder Knudsen, Konserveringscenter Vejle
Pil Rasmussen, SMK - Statens Museum for Kunst
Jesper Stub Johnsen, Vikingeskibsmuseet

Specifikke funktionsbeskrivelser
Teknologisk Institut, Energi og Klima, i samarbejde med ekspertgruppen

Øvrig tekst og redaktion
Ekspertgruppen og Museernes Grønne Akademi

Fotos
Lise Ræder Knudsen og Morten Ryhl-Svendsen

Figurer
Morten Ryhl-Svendsen

Design og layout
4PLUS4

2025

Danske Museer
Vartov, Farvergade 27D, 2. sal
1463 København K

www.dkmuseer.dk

Museernes
Grønne Akademi

Lavenergimagasiner - koncept og bæredygtighed

Denne rapport samler to årtiers erfaringer med lavenergimagasiner i Danmark og præsenterer et samlet vidensgrundlag for fremtidens magasinbyggeri. Fokus er på at forene høj bevaringskvalitet med lavt energiforbrug og reduceret klimabelastning.

Publikationen er udarbejdet af en ekspertgruppe med baggrund i forskning, konservering og byggeteknik og er forankret i Museernes Grønne Akademi under Organisationen Danske Museer. Arbejdet er sket i tæt samarbejde med Teknologisk Institut og bygger på dokumenterede eksempler og analyser fra eksisterende lavenergimagasiner i Danmark.

Målet er at kvalificere beslutningsgrundlaget for nybyggeri og renovering af magasiner – og at fremme udbredelsen af lavenergiløsninger, hvor bygningens egenskaber understøtter bevaringsindsatsen med et minimum af teknisk styring.

Rapporten henvender sig til bygherrer, rådgivere, myndigheder og museumsinstitutioner og kan anvendes både som introduktion til lavenergikonceptet og som konkret værktøj i projektering og kravspecificering.

Museernes
Grønne Akademi