

FUKTTEKNISKE UTFORDRINGER KNYTTET TIL ENERGIEFFEKTIVISERING AV ET VERNEVERDIG TEGLBYGG

MOISTURE PROBLEMS DUE TO SUSTAINABLE RETROFITTING OF A HISTORIC
BRICK BUILDING

MARGRETE WIK BÅRDSSEN

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2013



Forord

Denne oppgaven er skrevet som en avslutning på masterstudiet i Byggeteknikk og arkitektur ved Institutt for matematikk og realfag, Universitet for Miljø - og Biovitenskap(UMB), i samarbeid med rådgivende ingeniørfirma Multiconsult AS, seksjon for Energibruk og bygningsfysikk.

Oppgavens tema er valgt på bakgrunn av interessen for bygningsfysiske utfordringer ved energieffektivisering av eksisterende bygningsmasse. Jeg ønsket å se på et gitt bygg, og gjerne med arkitektoniske verdier og de begrensningene det medfører. Intensjonen var å ha hovedfokus på fuktproblematikk. Multiconsult ble kontaktet vedrørende ønskene, og det ledet meg til en rehabiliteringscase – en verneverdig teglsteinsbygning fra 1921.

Perioden har vært spennende og lærerik, men også krevende. Det har vært interessant å lære om teglstein som bygningsmateriale, da det ofte kommer i skyggen av tre, stål og betong i undervisningssammenheng. Teglsteinsbygninger har meget lang levetid og krever utgangspunktet lite vedlikehold, forutsatt at man kjenner til hvordan fukt- og temperaturforhold kan påvirke skader.

Jeg vil takke mine to veiledere Professor Tormod Aurlien ved UMB og sivilingeniør Kjetil Gulbrandsen i Multiconsult for god veiledning og oppfølging underveis i prosessen og oppgaveskrivingen.

Jeg ønsker også å rette en takk til Finn E. Madsø, tidligere teknisk leder av Mursenteret, for faglig hjelp og samtaler om tegl kvalitet, samt for tips og prosedyre for testing av teglstein.

Takk også til Morten Skalle, Multiconsults prosjektansvarlig på bygget, for hjelp med gjennomføring av uttak og testing av teglstein samt befaringer og besøk på bygget.

Universitet for miljø og biovitenskap

16. desember 2013

Margrete Wik Bårdsen

Murbyen Oslo

Dag Bjørnland i Riksantikvaren beskriver "murbyen" slik:

"I et større Oslo-perspektiv kan vi si at en viktig egenskap ved murbyen er dens selvfølgelighet. Den er så velkjent at vi knapt legger merke til den, den er Oslo. På sett og vis er den byens "resonansbunn", den alltid nærværende bakgrunnen som monumentalbyggene, trehusbyggene og vår tids arkitektur trer frem mot." (Bjørnland 1994)



Flyfoto tatt av Bygdøy Allé i 1950 (Flyfotodatabasen)

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler en verneverdig teglsteinsbygning fra 1921, og belyser de utfordringene som ligger i etterisolering av ytterveggene i en slik bygning. I et energiperspektiv vil en utvendig isolering være det mest gunstige tiltaket, men for bygninger med ornamenter i fasadene og begrenset takutstikk må innvendig isolering vurderes.

En innvendig isolering vil endre temperatur- og fuktforhold i veggen som igjen kan påvirke teglfasadenes skadesituasjon. Oppgavens hovedfokus har vært å se på betydningen av teglkvalitet og fuktbelastning av fasadene, gjennom oppgavens hovedproblemstilling, "Hvordan kan teglveggsens isoleringsevne forbedres uten øket sannsynlighet for skade?"

Tre analysemetoder er brukt for å løse oppgaven: skadeanalyse av fasadene, fuktteknisk kvalitetstesting av teglstein og fuktanalyser ved hjelp av beregningsprogrammet WUFI 1D. Første metode viste at fasadene jevnt over er i god forfatning. Konsentrerte skadeområder med blant annet frostskafer i teglstein ble registrert. Testing av teglkvalitet ble gjort av stein tatt ut fra innvendig side av yttervegg i underetasjen. Dersom teststeinene anses å være representative for byggets fasader, ble det funnet at frostmotstandsevne ikke var tilfredsstillende mht. innvendig isolering.

Fuktanalyser av eksisterende situasjon viste at begrenset uttørkingmuligheter kombinert med høy slagregnpåkjenning ga høyest vanninnhold. Ved fuktanalyse av teglveggen ved ulike innvendige isoleringstilfeller, viste simuleringene tendenser til økt vanninnhold i ytre deler av teglfasaden ved økt isoleringstykkelse. En kritisk isoleringstykkelse kunne ikke bestemmes direkte ut i fra noen av metodene, men en helhetlig vurdering ga at veggene kan isoleres med opp til 50 mm mineralull innvendig, uten stor sannsynlighet for øket skade.

En innvendig isolering med større mineralullstykkelser, ble vurdert til å øke sannsynligheten for skader. Dersom dette likevel skulle være ønskelig, ble det vurdert at isoleringen må skje i kombinasjon med to tiltak – kvalitetstesting av teglstein fra de vøreksponerte fasadene til å være tilfredsstillende for norsk klima, - og reduksjon av utvendig regnpåkjenning med regntett pussløsning.

Stikkord:

- Etterisolering
- Teglkvalitet
- Frostskafer
- WUFI

Abstract

This thesis addresses a historic brick building from 1921 and highlights the challenges of insulating the exterior walls of this type of buildings. From an energy perspective, exterior insulation would be the most favorable measure but for buildings with ornamental facades and limited eaves, interior insulation must be considered.

Interior insulation will change the temperature and moisture conditions of the wall which may affect the damages of the brick facades. The main focus of this thesis is to consider the importance of brick quality and water content in the facades through the thesis problem "In what way can the insulation value of the brick wall be improved without increasing the probability of damages?"

Three analytical methods were used to solve the problem: damage analysis of the brick facades, quality testing of bricks and moisture analysis by using the program WUFI 1D.

The first method showed that the facades are generally in good condition. Concentrated areas of damages including frost damages were recorded. Bricks taken from interior side of a cellar wall were quality tested. By considering the test results to be representative of the building's facades it was found that frost resistance was not satisfactory with respect to internal insulation.

Moisture analysis of the existing situation showed that limited capabilities of the wall to dry out combined with high exposure of wind-driven rain gave the highest water content in the brick.

For the insulation cases a water content analysis showed a pattern of increasing water content in the outer parts of the brick facade due to increased insulation thickness. A critical insulation thickness could not be determined on the basis of any of these methods. A comprehensive assessment provided that the walls could be insulated with mineral wool on the interior side with a thickness up to 50 mm without high probability of increased damages.

An internal insulation with greater thicknesses was considered to increase the probability of damages. If this option is desirable, the assessment determined that the insulation retrofit must be done in combination with two measures - quality testing of bricks from the exposed facades to be satisfactory for the Norwegian climate, - and reduction of exterior rain exposure with a waterproof plaster solution.

Keywords:

- Insulation Retrofit
- Brick quality
- Frost damages
- WUFI

Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag	III
Abstract	IV
1. Innledning.....	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Problemstilling.....	1
1.3. Avgrensninger.....	2
1.4. Casebygget	3
2. Teori.....	6
2.1. Innvendig etterisolering	6
2.2. Varmetap gjennom en vegg	7
2.3. Fukttransport gjennom en vegg.....	9
2.4. Verneverdige murbygninger i Oslo.....	12
2.5. Teglsteinsbygninger – historie og byggemetoder	13
2.5.1. Miljøbelastning.....	13
2.5.2. Tegl som byggemateriale	13
2.5.3. Typiske murgårder i Norge på 18- og 1900-tallet	13
2.6. Skader i teglfasader	16
2.6.1. Frostskader	16
2.6.2. Skadekilder	17
2.6.3. Tilsyn og vedlikehold	19
2.7. Teglkvalitet	20
2.7.1. Frostmotstandsevne.....	21
2.7.2. Målemetoder for teglkvalitet, FM-tall.....	21
2.8. Fuktanalyser med WUFI 1D 1.4 Pro.....	23
3. Metode	27
3.1. Skadeanalyse av teglfasader	27
3.1.1. Oppbygging av vegg.....	27
3.1.2. Skaderegistrering.....	28
3.1.3. Termografering.....	28
3.1.4. Fuktinnhold i tegl.....	29
3.2. Testing av teglkvalitet.....	30

3.2.1.	Uttak av tegl og vurdering av brenningsgrad	30
3.2.2.	Prosedyre for testing	31
3.2.3.	Kriterier for testing	31
3.3.	WUFI- simuleringer.....	32
3.3.1.	Forutsetninger for analyse av eksisterende situasjon.....	33
3.4.	Isoleringstilfeller	38
3.4.1.	U-verdiberegninger	38
3.4.2.	Forutsetninger for WUFI-simueleringer	39
4.	Resultater	40
4.1.	Skadeanalyse av teglfasader	40
4.1.1.	Oppbygging av vegg.....	40
4.1.2.	Skaderegistrering.....	42
4.1.3.	Termografering.....	44
4.1.4.	Fuktinnhold i tegl.....	45
4.2.	Testing av telgkvalitet.....	46
4.3.	WUFI – simuleringer eksisterende situasjon	47
4.4.	WUFI – isoleringstilfeller	49
5.	Vurdering og analyse.....	52
5.1.	Skadeanalyse av teglfasader	52
5.1.1.	Oppbygging av vegg.....	52
5.1.2.	Skaderegistrering.....	52
5.1.3.	Termografering.....	54
5.1.4.	Fuktinnhold i tegl.....	54
5.2.	Testing av telgkvalitet.....	55
5.3.	WUFI – simuleringer eksisterende situasjon	56
5.4.	WUFI – isoleringstilfeller	57
6.	Konklusjon	59
7.	Diskusjon	60
8.	Videre arbeid	62
9.	Litteratur.....	63
10.	Vedlegg.....	1-13

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Med stadig strengere energikrav i dagens byggeforskrifter og økende miljøfokus, ligger ofte de største utfordringene knyttet til energieffektivisering i eksisterende bygningsmasse. Etterisolering av bygningens yttervegger vil i sammenheng med andre energiltak, inngå i et mål om å redusere bygningens totale varmetap. I et energiperspektiv vil utvendig isolering være det mest gunstige tiltaket.

Dette alternativet er imidlertid ikke alltid til stede. Mange eldre murbygninger oppført på 18- og 1900-tallet i byer i Norge, er bygd med begrensede takutstikk og ornamenter i fasadene. Fasadene er også i mange tilfeller verneverdige og bygningenes historiske og estetiske uttrykk spiller en viktig rolle i et totalt bybilde.

I slike tilfeller må innvendig etterisolering vurderes. En innvendig isolering vil endre temperatur- og fuktforhold i ytre deler av veggen. Det er derfor viktig å vite nok om fasadenes skadetilstand og teglsteines bestandighet, for å unngå at skader som ikke var der før, oppstår.

Denne oppgaven har tatt for seg en teglsteinsbygning fra 1921, og hvilke fukttekniske utfordringer vi står overfor i teglfasadene ved innvendig etterisolering. Hovedfokus har vært å se på hvilken betydning tegl kvalitet og fuktbelastning har, for å unngå at frostskafer i større omfang oppstår på grunn av isoleringen.

1.2. Problemstilling

Hvordan kan teglveggenes isoleringsevne forbedres uten øket sannsynlighet for skade?

Delt inn i tre delproblemstillinger:

1. Hva forteller dagens skadesituasjon?
2. Hvilken betydning har teglkvalitet?
3. Hvilken betydning har fuktbelastning?

Med skade menes det i første delproblem hele skadesituasjonen til teglfasadene grunnet fukt, mens delproblem 2 og 3 har fokus på frostskafer i teglstein.

1.3. Avgrensninger

Oppgavens undersøkelser er gjort på én bygning, i et gitt klima, Oslo-klima. Oppgaven er begrenset til å se på fuktproblematikk i ytterveggens fasader av tegl, andre bygningsdeler er ikke vurdert.

Andre ulemper som en eventuell innvendig isolering vil kunne medføre, som økt kuldebroproblematikk og kondensfare er utenfor oppgavens omfang.

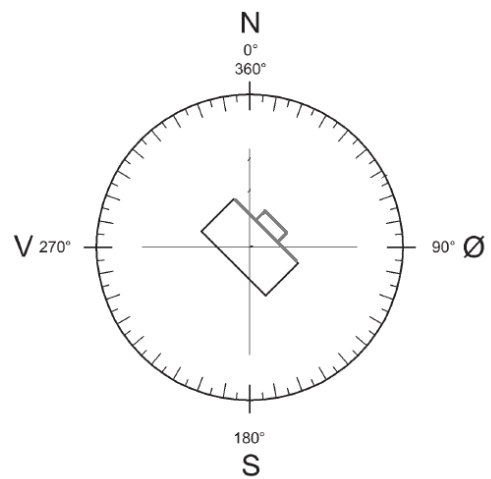
Oppgaven går ikke inn på diskusjonstemaer rundt vern versus rehabiliteringsmuligheter. Det er tatt hensyn til at bygningens fasader er vernet utvendig. Innvendige panelerte og tapetserte rom er det ikke tatt hensyn til ved vurdering av innvendig etterisolering.

Økonomiske aspekter ved ulike løsninger og tiltak er ikke vurdert i denne oppgaven.

1.4. Casebygget



Bygdøy Allé 4 – Situasjon (Flyfoto, Gule sider)



Himmelretninger (MWB)

Som en forenkling er fasadene kalt nordvest, nordøst, sydvest og sydøst.



Murbygningen sett fra nord (MWB)

I forbindelse med innvendig ombygging av murbygningen i Bygdøy Allé 4 er Multiconsult AS engasjert av gårdseier Møller Eiendom AS til å se på byggets totale tilstand med hovedfokus på byggeteknikk. Morten Skalle er Multiconsults prosjektleder og har ledet befaringer både innvendig og utvendig.

Følgende opplysningene er innhentet fra prosjektbeskrivelser og startbefaring på bygget. De er videre brukt som forutsetninger for oppgavens undersøkelser.

Murbygningen i Bygdøy Allé 4 ble bygd i 1921 for Det Norske Livsforsikringsselskap Fram A/S. Det ble tegnet av arkitekt Magnus Poulsson med mønstermurte fasader utsmykket med ornamenter og steinhuggede figurer. (Engh & Gunnarsjaa 1984)

Vernestatus

Bygningens fasader er definert som bevaringsverdig på Byantikvarens Gule liste i Oslo, og er beskrevet til å bevares i sitt opprinnelige uttrykk. Deler av interiøret er også vernet, blant annet originale innvendige panelvegger i to av rommene.

Fundamentering og bærekonstruksjon

Deler av bygget er fundamentert på fjell, mens deler står på pilarer ned til fjell.

Hovedbæresystemet består av søyler, dekker og takkonstruksjon av armert betong. Hvorvidt ytterveggene er bærende, er det ikke opplyst om, da konstruksjonstegninger ikke forelå som prosjektunderlag.

Yttervegger og fasade

Bygget står på en høy sokkel med to underetasjer i et skrånende terreng. I underetasjene er veggene bygd opp av en tosteins teglvinge forblendet utvendig med 15 cm granitt. Veggene over består av slemmet tegl. 3. etasje er tilbaketrukket med saltak. Slemmingen er påført med grov kosting og antas å være original.

Bruk og utskiftinger

Det er ikke opplyst om at bygningen er renovert tidligere, men utskifting av vinduer til 3-lags glass med aluminiumskarmer ble gjort i 1979.

Byggets hovedfunksjon er kontor. Underetasjene har ulike funksjoner, bl. a. lager, kantine og butikklokaler. Det antas at bygget har vært i bruk siden det ble oppført.

Oppvarming og ventilasjon

Oppvarming skjer hovedsakelig ved hjelp av vannbåren varme(radiatoranlegg) og ventilasjonsanlegg. Under befarig er det blitt målt temperaturer i kontorlokaler opp mot 24-25 °C.

Energikilden er 2 stk. oljebrennere. Fyringskurvene er stilt inn på følgende driftstider:

mandag: 0300-1800

tirsdag-fredag: 0600-1800

lørdag-søndag: 0600-1500

Nattsinking av radiatorkursen er satt til en senking på 10°C.

Radiatoranlegget styres manuelt av hver bruker.

Ventilasjon:

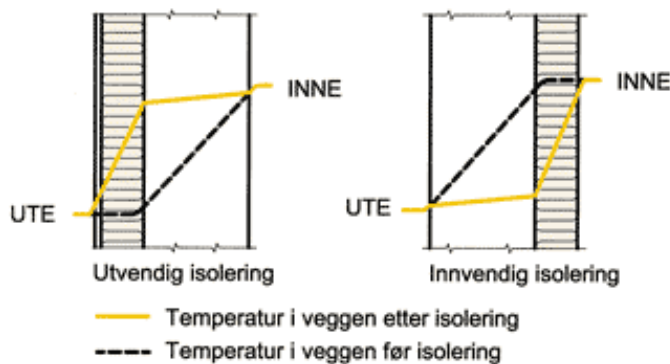
To stk. ventilasjonsanlegg er montert på loftet og er installert i 1983. De er begge balanserte ventilasjonsanlegg med batterigjenvinnere, vannbåren varmebatteri og kjølebatteri.

Planer, snitt og fasader av murbygningen finnes i Vedlegg 1.

2. Teori

2.1. Innvendig etterisolering

Innvendig varmeisolering av murvegger bør i utgangspunktet unngås da det gjør at ytterveggene blir kaldere. Dette reduserer veggens mulighet til å tørke ut inntrengt fukt, som igjen fører til økt fare for frostskafer og fare for råte- og soppangrep på eventuelle tilstøtende eller innmurte trebjelker. På grunnlag av dette bør innvendig isolering av murvegger aldri skje uten kontroll av teglsteinens frostmotstandsevne og analyse av fukt- og temperaturforhold i vegg. (Norges byggforskningsinstitutt 1995)



Figuren viser forskjeller i temperaturer gjennom vegg før og etter utvendig og innvendig isolering. (NBI 723.312, SINTEF Byggforsk 2003)

Figur 1 Utvendig og innvendig isolering av tung vegg

Tabellen under viser fordeler og ulemper med innvendig etterisolering i tung vegg:

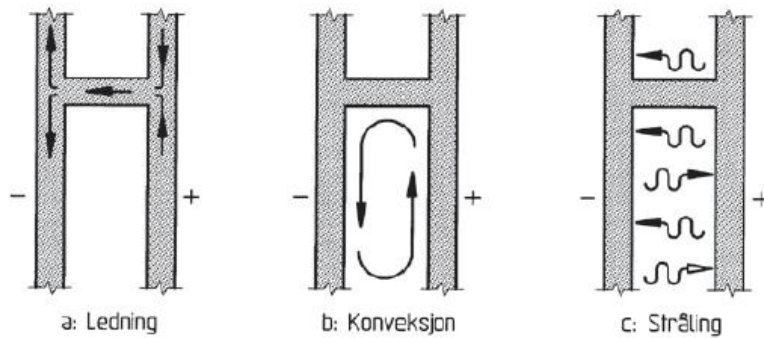
Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none">• Kan brukes i ytterveggskonstruksjoner hvor utvendig isolering ikke er praktisk mulig for eksempel pga. begrenset takutstikk eller ornamenter i fasaden• Kan brukes i tilfeller hvor man kun ønsker å isolere enkelte vegger• Kan brukes i bygninger som har utvendig verneverdig verdi	<ul style="list-style-type: none">• Tap av bruksareal• Opprinnelig vegg vil få lavere minimumstemperaturer, dårligere uttørkningsmuligheter• Økt kuldebroproblematikk(mer-varmetap), spesielt ved etasjeskillere• Utfordringer knyttet til oppvarmingssystem med radiatorer• God klemming av eventuell dampsperre er vanskelig å utføre ved innvendig isolering

(NBI 723.312, SINTEF Byggforsk 2003)

2.2. Varmetap gjennom en vegg

Varmetransport gjennom en vegg skjer ved:

- a) Ledning
- b) Konveksjon
- c) Stråling



Figur 2 Varmetransport gjennom vegg(NBI 471.008, SINTEF Byggforsk 1998)

Varmetransport ved ledning skjer gjennom fast materiale og er avhengig av varmeledningsevnen til materialet.

Varmeledningsevnen for en gass (som luft) er lav, men kan likevel transportere varme ved konveksjon. Konveksjon oppstår normalt i hulerom mellom to flater med ulik temperatur, hvor varme transporteres gjennom strømning fra varm til kald flate.

Stråling er varme transportert fra en materialoverflate til en annen. Materialer med høy emisjon sender ut mye stråling og har samtidig gode absorpsjonsegenskaper.

U-verdi

U-verdien til en bygningsdel, eksempelvis en vegg, er et standardisert mål på hvor lett bygningsdelen slipper gjennom varme.

U-verdien er også kalt varmegjennomgangskoeffisienten og angir hvor mye varme pr. tidsenhet, målt i watt (W), som kan strømme gjennom et areal på 1 m² ved konstant temperaturskjell på 1 K (= 1 °C) mellom omgivelsene på varm og kald side av bygningsdelen.

En godt isolert bygningsdel har dermed lav U-verdi.

(NBI 471.008, SINTEF Byggforsk 1998)

U-verdien til en vegg er avhengig av veggens tykkelse og materialenes spesifikke varmeledningsevne, λ , som er et mål på et bestemt materialets varmeisoleringssevne. For teglstein varierer den med materialets densitet og fuktinnhold. Sammenlignet med andre materialer har teglstein relativt dårlig varmeisolerende evne (høy termiske konduktivitet). (Murkatalogen 2001)

Tabellen under viser NBI-beregnete U-verdier (W/m^2K) for murvegger i eldre murbygninger uten varmeisolasjon, med 10 mm puss utvendig og innvendig. (NBI 471.008, SINTEF Byggforsk 1998)

Murtype	Densitet kg/m ³	Veggtykkelse (stein)							
		1/2	1	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2 ¹⁾	2 1/4	2 1/2
Massivmur	1 200	2,2	1,31,8		1,0		0,7		
	1 600	2,8	2,1		1,3		1,1		
	2 000	3,1			1,6		1,3		
Bergens- hulmur	1 200				1,1		0,9 (0,8)		
	1 600				1,4		1,2 (1,1)		
	2 000				1,6		1,4 (1,3)		
Trond- hjems- hulmur	1 200					0,8		0,7	0,6 ²⁾
	1 600					1,1		0,9	0,8 ²⁾
	2 000					1,3		1,0	0,9 ²⁾
Engelsk hulmur	1 200			1,1					
	1 600			1,4					
	2 000			1,6					

1) Verdiene i parentes gjelder for bergenshulmur med 1-steins vanger.

2) To hulromsrader

Figur 3 U-verdier for eldre murvegger

Minstekrav til U-verdier

Dagens minstekrav til U-verdier i Byggteknisk forskrift (TEK 10) ved en hovedombygning er vist i tabellen under. (Forskrift om tekniske krav til byggverk 2010)

U-verdi yttervegg [W/(m ² K)]	U-verdi tak [W/(m ² K)]	U-verdi gulv på grunn og mot det fri [W/(m ² K)]	U-verdi vindu og dør, inkludert karm/ramme [W/(m ² K)]	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell (luftveksling pr. time)
≤ 0,22	≤ 0,18	≤ 0,18	≤ 1,6	≤ 3,0

Figur 4 Minstekrav til U-verdier i TEK 10

Ved sammenligning av u-verdier for eldre murvegger opp mot dagens minstekrav for yttervegger, ligger de fleste veggkonstruksjonene et godt stykke unna kravet.

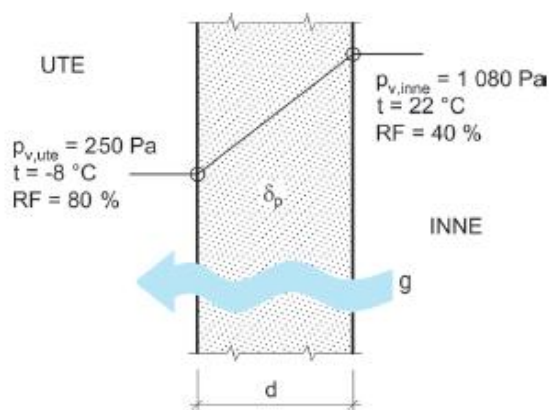
2.3. Fuktransport gjennom en vegg

En grunnleggende forutsetning for å unngå skader på grunn av fukt er å forstå hvordan fukt transporteres.

Fukttransport har fire hovedmekanismer:

Transportmekanisme	Drivkraft
Dampdiffusjon	Dampdiffusjon er den vandamptransport som skjer på grunn av ulikt vandamptrykk i inne- og uteluft.
Luftlekkasjer/konveksjon	Luftlekkasjer (også kalt fuktkonveksjon) er vandamp som transporteres med luftlekkasjer. Et typisk eksempel er fuktig inneluft som vandrer ut gjennom utettheter i konstruksjonen og kondenserer på kalde flater. Skyldes ulikt lufttrykk inne og ute eller evt. inne i en konstruksjon
Væskestrømning/gravitasjon	Væskestrømning skyldes tyngdekraft og kan for eksempel være transport gjennom vannlekkasjer ned til konstruksjonen under
Kapillærsuging	Kapillærsuging er vanntransport på grunn av kapillærkrefter i materialporene

(Time et al. 2004)



Figur 5 Vanndampdiffusjon gjennom vegg
(NBI 421.132, SINTEF Byggforsk 2005)

Figuren illustrerer vanndampdiffusjon på grunn av ulikt damptrykk inne og ute.

Diffusjon kan gi opphav til kritisk høy RF % inne i en konstruksjon. Problemene forsterkes dersom fukt blir stengt inne.

Hvor mye vanndamp som slippes gjennom vegg, g , avhenger av veggens vanndamppermeabilitet δ_p .

Teglmurverk har som en av de viktigste egenskaper å la fukt og luft diffundere gjennom konstruksjonen uten at kondens oppstår i skadelig omfang. (Murkatalogen 2001) Det forutsettes imidlertid at dampette sjikt ikke stenger innetrengt fukt inne.

Mengden vanndamp som slippes gjennom porøse materialer avhenger av materialets fuktnivå, også betegnet som relativ fuktighet i poreluften. Økt fuktnivå gir økt permeabilitet.

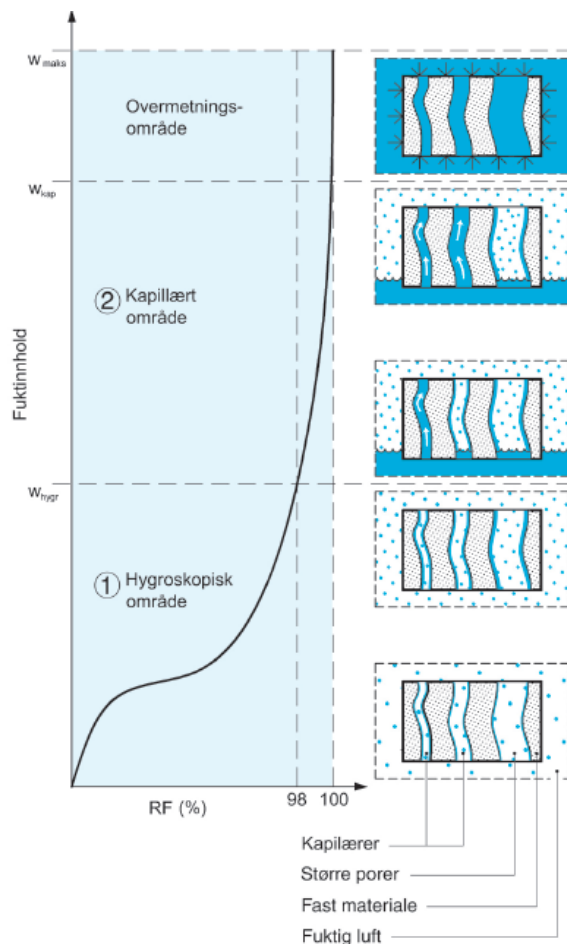
Tabellen under viser at teglmurverk har høy vanndamppermeabilitet sammenlignet med andre byggematerialer.

Materiale	Densitet [kg/m ³]	Vanndamppermeabilitet, δ_p 10 ⁻¹² kg/(m*s*Pa)			
		Materialfuktnivå % RF			
		35-70	70-80	80-90	90-95
Betong, v/c 0,5	2.300	1-1,5	1,5-2,5	2,5-7,5	7,5-21
Porebetong	400	28	28	30	45
Teglmurverk av massivtegl	2.100	20			30
Teglmurverk av hulltegl	1.600	30			40
Lettkl.bl.murverk	770	30			60
Tre (gran)	500	1,5-7	4-15	8-26	

(Murkatalogen 2001)

Fuktoptak i porøst materiale

Ved en gitt RF(%) i omgivende luft, vil et porøst materiales fuktinnhold gradvis gå mot en viss verdi. Det er denne verdien som betegnes som likevektsfuktigheten i et materiale ved det gitte RF-nivået. Ved måling av likevektsfukten i gitte materialer ved forskjellige RF-nivået er det laget såkalte sorpsjonskurver som sier noe om materialets fuktlikevekt.



Figur 6 Fuktoptak i porøst materiale (NBI 421.132, SINTEF Byggforsk 2005)

Figuren viser en sorpsjonskurve med utvidet kapillært område, på høyre side viser poremodellene opptak av fukt de to karakteristiske stadier

Hygroskopisk område:
Opptaket skjer ved at materialet er lagret i luft og dampmolekyler bindes til poreveggene

Kapillært område:
Kapillært opptak skjer ved at materialet er i kontakt med en vannkilde (dette kan være kondens eller lekkasjer). Små og store porer fylles ved hjelp av kapillærkrefter. De små porene fylles først. Det vil samtidig foregå vanddamptransport i de større porene som ikke fylles med vann.

Teglstein er et lite hygroskopisk materiale, dvs. at det binder til seg lite fukt fra den omgivende lufta. På grunn av dette er likevektsfukten i teglsteinen lav sammenlignet med andre bygningsmaterialer. (Murkatalogen 2001)

2.4. Verneverdige murbygninger i Oslo

Begrepene *verneverdig* og *bevaringsverdig* benyttes om hverandre, og har samme betydning. At en bygning er bevaringsverdig, betyr ikke at den har formell beskyttelse. Det er heller ikke gitt hvilke vernetiltak som bør gjennomføres. Dersom en bygning skal beskyttes formelt, må den fredes eller reguleres til bevaring. (NBI 612.012, SINTEF Byggforsk 2010)

I følge Oslo kommunes "Eiendom – og byfornyelsesetat", er en rekke murgårder i Oslo fra 1860 til rundt år 1900 bevaringsverdige og listet opp på Byantikvarens gule liste. Vanligvis omfatter vernet i hovedsak fasadene. Imidlertid vil kulturhistoriske verdier knyttet til fasadene, slik som porter, utsmykninger, dører og vinduer ofte inngå i vernet.

Når det gjelder bevaring av interiør, er det viktig for Byantikvaren at brannsikkerhet kommer i første rekke. Dersom dette er ivaretatt, vil det kan være opp til eier av bygget å vurdere de indre kulturhistoriske verdier. (Oslo kommune: Eiendoms- og byfornyelsesetaten 2003)

Byantikvarens Gule liste i Oslo er en oversikt over registrerte bevaringsverdige kulturminner og beskrives til å ha, " *så stor kulturhistorisk og/eller arkitektonisk verdi, at de ønskes bevart.*" (Oslo kommune: Byantikvaren 2013)

2.5. Teglsteinsbygninger – historie og byggemetoder

2.5.1. Miljøbelastning

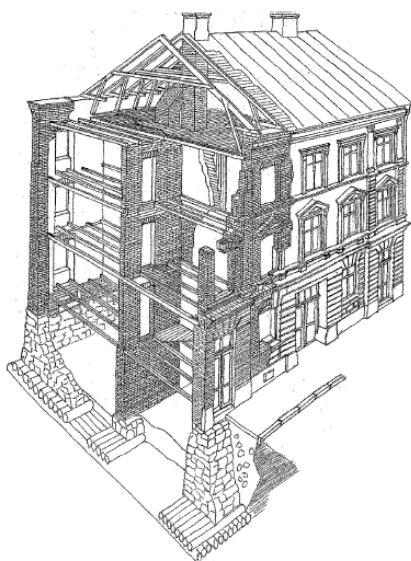
Tegl kan kun ses på som et miljøvennlig materiale dersom dens levetid tas med i betraktningen. Selv om energibruk ved produksjon og transport kan være høyt, har teglstein eksepsjonelt lang levetid sammenlignet med andre bygningsmaterialer. (Sandaker et al. 2003) Dette forsterker viktigheten av vern og bevaring av teglsteinsbygninger.

2.5.2. Tegl som byggemateriale

I Norge har teglstein vært produsert siden 1200-tallet, men det var først rundt år 1750 at teglproduksjonen var av betydning. Som bygningsmateriale var tegl lite utbredt før midten av 1800-tallet. Trematerialer var dominerende for husbygging i Norge, både fordi de var lett tilgjengelige, billigere og lettere å bearbeide. Å bygge med tegl var kostbart, blant annet fordi murere fra Danmark og Tyskland måtte benyttes. Dermed var det i hovedsak bygninger med høyere status, som kirker, festningsanlegg og andre symbolbygg som ble bygd av tegl. Av hensyn til brannsikkerhet ble det etter hvert tvunget fram bruk av tegl også i boliger og bygårder. Store deler av Norges eldre murgårdsbebyggelse ble oppført mot slutten av 1800-tallet under stor ekspansjon av de største byene. Fra slutten av 1800-tallet og i løpet av 1900-tallet fikk også betong som bygningsmateriale en sentral rolle. (SINTEF: Arkitektur og byggeteknikk 2004)

2.5.3. Typiske murgårder i Norge på 18- og 1900-tallet

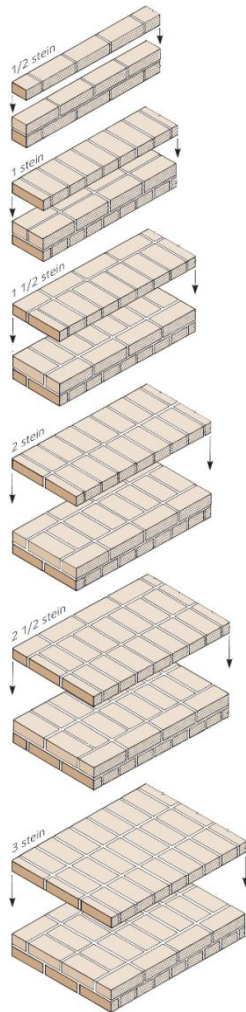
Den typiske murgård i Oslo, Bergen og Trondheim fra perioden 1850-1930 var teglsteinsbygninger i tre-fem etasjer. Yttervegger og innvendige vegger var bærende og bestod av murt tegl. Etasjeskillere bestod ofte av trebjelkelag. Bærende trekonstruksjoner i tak var også vanlig, vanligst var sperretak med hanebjelke. (Norges byggforskningsinstitutt 1995)



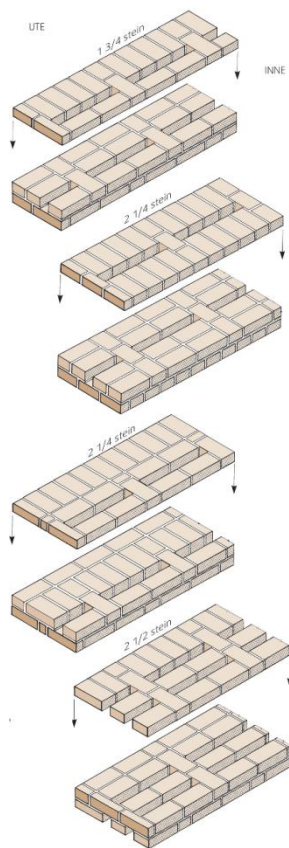
Figur 7 Tegningen viser en typisk murgård (Oslo kommune: Byantikvaren 2002)

Ytterveggene i 1. og 2. etasje bestod ofte av 2-steins mur, mens etasjene over hadde 1 ½-steins tykkelse. Fram til 1890 ble yttervegger murt massive, men etter hvert ble de erstattet av ulike typer hulmurer. (Norges byggforskningsinstitutt 1995)

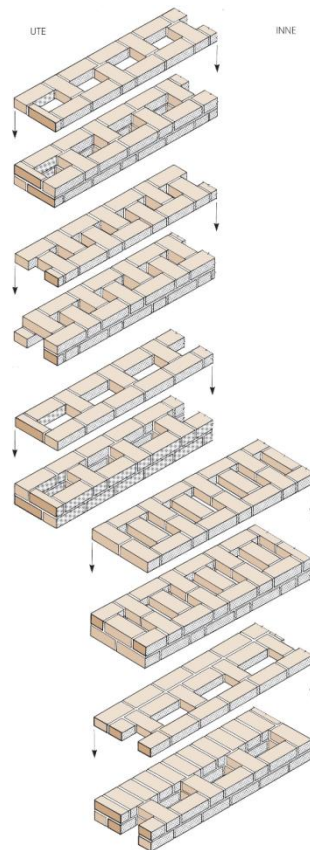
Illustrasjonene under viser fire ulike oppbygginger av yttervegger i tegl. (NBI 723.308, SINTEF Byggforsk 2013)



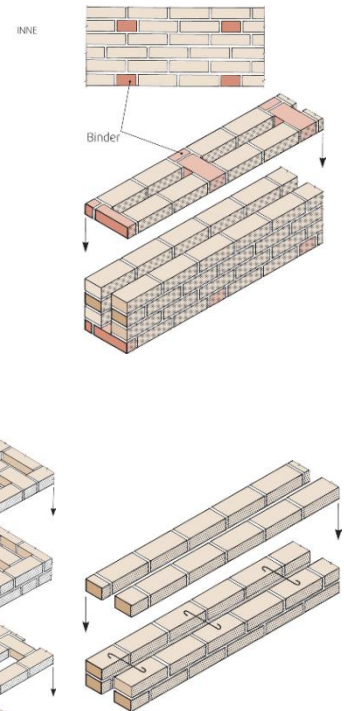
Figur 8
Massiv teglvegg



Figur 9
Trondheimshulmur



Figur 10
Bergenshulmur



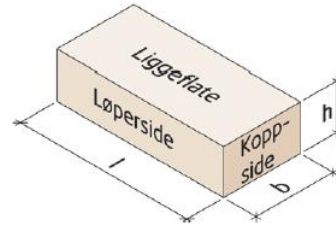
Figur 11
Dansk/Engelsk
Hulmur

Teglsteinens dimensjoner

Fra ca. år 1830 var steinformatet for norskprodusert tegl ca. 65 mm x 110 mm x 235 mm, som er relativt likt dagens normalformat på 226 x 104 x 60 mm. Dimensjonene er imidlertid deklarererte mål, dvs. idealmål uten avvik. Hovedprinsippet er at lengden er tilnærmet til 2 x bredden pluss en fuge. (NBI 723.308, SINTEF Byggforsk 2013)

Figuren viser en massivteglstein hvor:

- Steinens største flate kalles *liggeflate*
- Sideflaten kalles *løperside*, og
- Endeflaten kalles *kopp*



Figur 12 Massiv teglstein
(NBI 523.221, SINTEF Byggforsk 2007)

Fugemørtler

Kalkmørtel var lengde dominerende som fugemateriale. Kalkmørtelen er relativt elastiske og har dermed god evne til å følge bevegelser i murverket uten at sprekker oppstår. Heftfastheten til stein er derimot liten sammenlignet med nyere mørteltyper. Kalkmørtelen er imidlertid veldig dampåpen og en god kalkmørtel kan ha relativt god frostmotstandsevne.

Fasader/utvendig overflatebehandling:

Fasadenes overflatebehandling utvendig var enten fugging eller pussing. Ved fugging ble det stilt strengere krav til steinenes kvalitet. Til puss ble det ofte brukt en ren kalkmørtel, etter århundreskiftet (1900) ble det vanlig å bruke sementtilsatt puss for en sterkere og mer holdbar overflatebehandling.

Fasadene ble i mange tilfeller utstyrt med vertikale pilastre og horisontale bånd, dels av estetiske, og dels av konstruktive årsaker.

Innvendig overflatebehandling:

Innvendig ble overflatene ofte pusset og malt, panelt eller trukket med strie og tapet. En ren kalkmørtel var også vanlig som pussmateriale inne.

(NBI 723.308, SINTEF Byggforsk 2013)

2.6. Skader i teglfasader

2.6.1. Frostskafer

Frostskafer i et porøst materiale er avhengig av en kombinasjon av følgende tre klimatiske betingelser:

- nok nedbør til å fylle materialets porer
- minimumstemperaturer som får vann til å fryse
- et høyt antall frysepunktpasseringer

Frostopåkjenningen varierer, men det er fuktinnholdet i materialet ved nedfrysning som har størst betydning.



Figur 13 Bildet viser typiske frostskafer i teglstein. (NBI 742.302, SINTEF Byggforsk 1992)

Det som ofte kjennetegner et materiale som er utsatt for frostskafer er at det har langt større trykkfasthet enn strekkfasthet, og at det er sprøtt. (Geving & Thue 2002)

Hovedårsaken til at et porøst materiale kan få frostskafer er at vann som fryser til is får en volumøkning på nesten 10 %. Dette i seg selv kan føre til kraftige sprengvirkninger, men også is-sjikt som dannes i ulike dybder i veggens plan kan være en medvirkende årsak til skadene. ((Madsø))

Risiko for skader vil være avhengig av teglmaterialets kvalitet, spesielt med strekkfastheten og porenes størrelse, mengde og fordeling.

Når teglstein utsettes for frostskafer, skjer det i de fleste tilfeller ved avskalling av materialet i tynne sjikt parallelt med vegglivet. Skader kan også opptre som oppsmuldring(forvitring) eller som gjennomgående sprekkskafer. (Madsø 1979)

2.6.2. Skadekilder

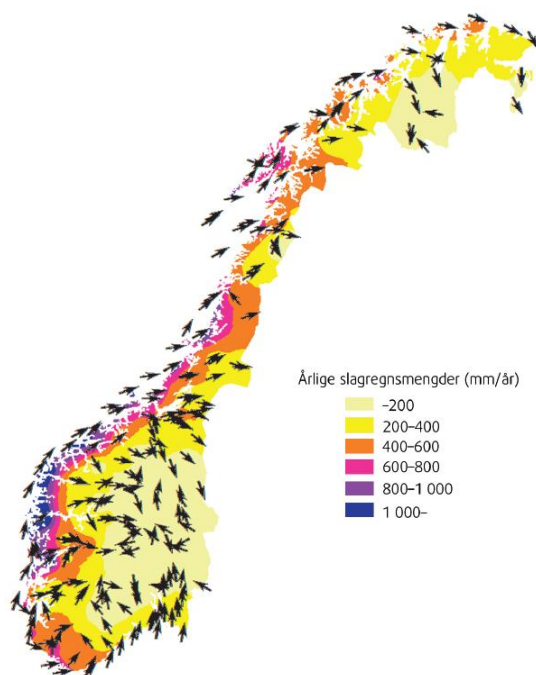
Skader i en murt ytterveggskonstruksjon vil være mest knyttet til utvendige klimafaktorer. Utvendig klima er avhengig av følgende faktorer:

- Temperatur i uteluft
- Relativ luftfuktighet
- Solstråling
- Langbølget stråling
- Slagregn
- Vindhastighet og retning
- Totalt lufttrykk

Fuktforholdene i ytterveggen styres av utvendig og innvendig klima. (Geving & Thue 2002)

For frostskafer i tegl vil slagregnpåkjening være den mest kritiske klimafaktoren. Frostpåkjeninger øker med mengde, intensitet og hyppighet av slagregnangrep, med antall temperatursvingninger rundt 0-punktet samt med minskende mulighet for uttørking. (Madsø 1979)

Slagregnpåkjening avhenger av geografisk plassering. Figuren under viser slagregnkart for ulike områder i Norge.

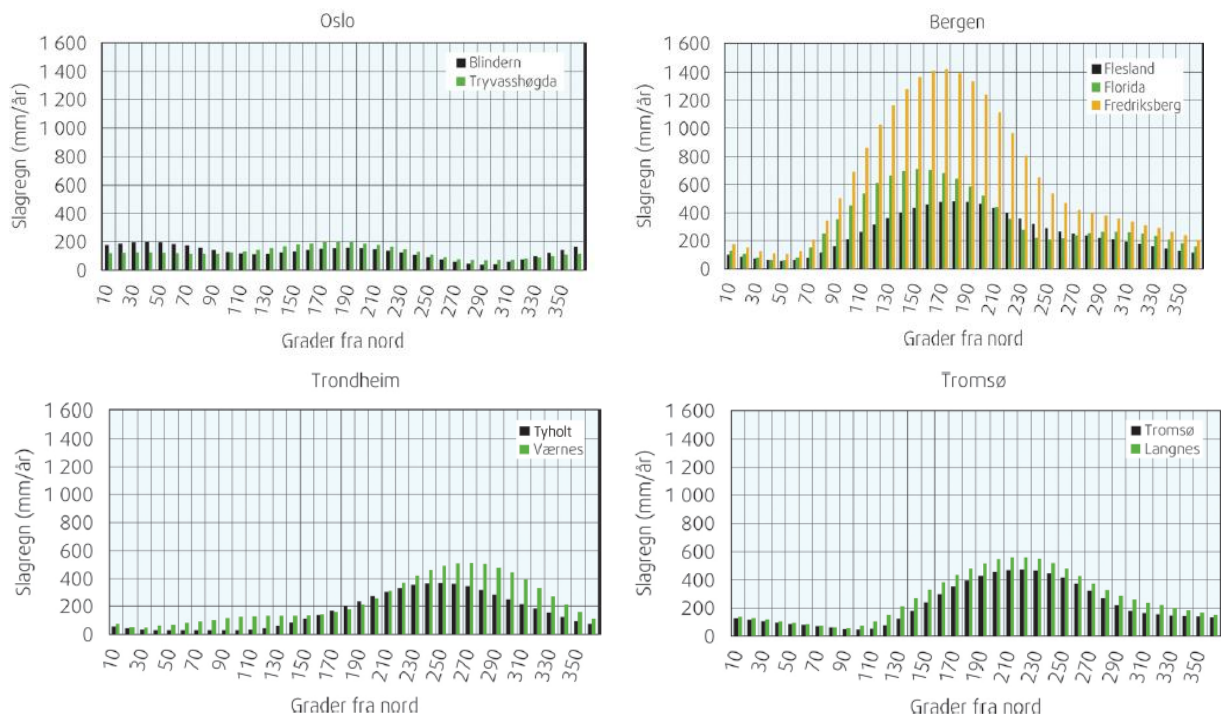


Slagregnkartet er delt inn i ulike fargesoner(klimasoner) ut i fra årlige slagregnmengder fordelt over landet og hovedretning som slagregnet kommer fra på hver stasjon(vist med piler).

Inndelingen av de ulike klimasonene basert på slagregn er brukt til å prosjektere ytterveggløsninger som utforming av luftede kledninger, utforming av ulike beslag og valg av pusstyper for murverk.

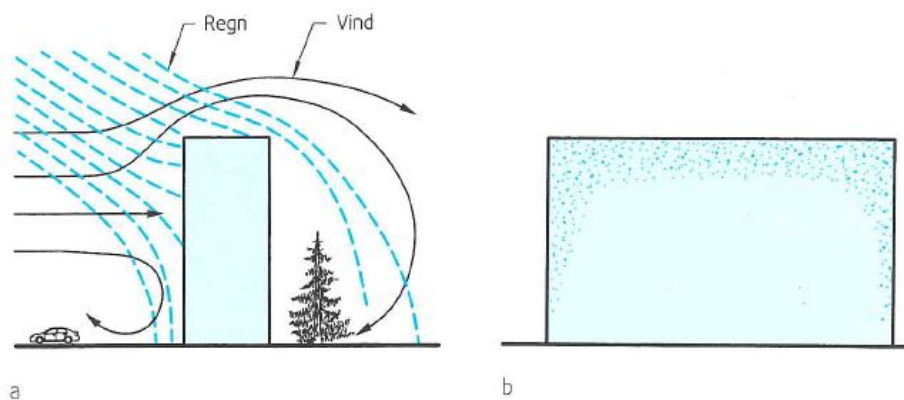
Figur 14 Figur: Årlige slagregnmengder delt inn i klimasoner (Kvande & Lisø 2007)

Diagrammene under viser slagregnmengde og retninger for Norges fire største byer.



Diagrammene viser at det er betydelig forskjell i slagregnets mengde og intensitet ved ulike geografiske plasseringer i landet.

Slagregnet vil fordeles ulikt over fasaden. Midt på vil mengden slagregn være mindre enn i ytterkantene. Ytterkanter og hjørner kan faktisk ha større påkjenning enn slagregnkartet viser.



Figur 15 Slagregnfordeling over fasaden (Kvande & Lisø 2007)

2.6.3. Tilsyn og vedlikehold

Vedlikehold

Vanligvis krever murte overflater lite vedlikehold, men dersom det oppstår skader på slike overflater, kan skadene fort få en akselererende virkning. Små skader kan føre til oppfukting og større, nye skader. Hovedhensiktene med å utføre tilsyn er å oppdage skadene mens de fortsatt er små og kostnadene for utbedring er lave.

Tilsyn

Årlig tilsyn av fasadene bør gjøres for å registrere åpenbare skader. Dette kan være skader på ulike beslagsløsninger, avskallinger eller sprekker. Dersom det registreres at tidligere skader ikke er utbedret, bør det følges opp. Årlig tilsyn kan begrenses til inspeksjoner fra bakkenivå, tak eller balkong.

En mer omfattende tilsynsvurdering bør gjennomføres hvert 2.-5. år. Hvor ofte en slik vurdering gjøres er avhengig av type konstruksjon, materialer og klimapåkjenninger. Hovedtilsyn kan baseres på stikkprøver. Man bør komme opp på fasaden via vindu, stige, lift eller lignende.

Registrering

Skadene bør merkes av på fasadetegninger og/eller dokumenteres ved fotografering. Sjekklistene kan brukes som hjelpemiddel.

Utbedring

Ved registrerte frostskafer i tegl, bør inntrengning av vann i murverket stoppes for å unngå at skadene utvikles. Steiner med store frostskafer bør byttes ut for å unngå videre oppfukting av murverket.

Ved avskallet overflatebehandling/puss bør fuktkildene som har forårsaket avskallingen undersøkes. På områder hvor avskallingen er utbredt bør overflatebehandlingen tilbakeføres med så like materialegenskaper som den opprinnelige, som mulig. Organiske, dampette overflatebehandlinger bør unngås, da de kan forstyrre murverkets fuktbalanse, hindre uttørking utover og øke faren for frostsprengning.

Omfuging bør gjøres på områder hvor fugene har forvitret for å unngå vanninntrengning og videre oppfukting av murverket.

Salt – og kalkutslag kan ofte begrenses ved å stoppe fuktkildene. Dersom transporten av salter skyldes lekkasjer eller lokale oppfuktinger, må lekkasjene stoppes. (NBI 742.302, SINTEF Byggforsk 1992)

2.7. Teglkvalitet

Byggematerialet tegl framstilles ved tørking og brenning av leire.

Under brenning vil teglets kvalitet og egenskaper i stor grad bestemmes av brenningstemperaturen. Generelt sett får steinen bedre frostegenskaper ved økt brenningsgrad. Ved brenning med temperaturer over 900 °C, vil en økning i temperatur føre til økt densitet og fasthet. Samtidig vil porevolum og vannabsorpsjon avta. Teglets porevolum avtar parallelt med at andelen små porer synker og erstattes med store porer ved økt brenningsgrad. Det er spesielt andelen av små porer i størrelsesorden $< 0,5 \mu\text{m}$ som fører til fare for frostskafer. Når vann fryser i kapillærporene virker de grove porene som avlastingsrom for trykket som oppstår ved vannets frysing.

Etter brenning vil teglmaterialet ha en særegen porøsitet hvor fordelingen mellom fine og grove porer vil ha særlig betydning på materialets fukttekniske egenskaper. Det brente resultatet vil også være avhengig av tilsetningen, særlig av sagflis, som gir den brente teglsteinen grovere porer, jevnere brenning og økt frostmotstandsevne. (Madsø 1979)

Hulltegl vil normalt bedre frostbestandighet enn massivtegl av den samme leiren og lik brenningsgrad. Dette er først og fordi hulltegl får jevnere brenning, men også fordi hullene vil virke på samme måte som grove porer - som "avlastningsvolum" under frysingen.

Sammenheng mellom densitet, porøsitet og frostbestandighet kan beskrives ved:

Jo høyere densitet, desto:

- større trykkfasthet og dermed også større strekkfasthet
- bedre evne til å motstå trykk fra absorbert, innestengt vann som fryser til is, utvider seg og mulig sprenger teglmaterialets porer

Jo lavere densitet, desto:

- større porøsitet
- større mengde vann kan absorberes i materialets porer

(Murkatalogen 2001)

2.7.1. Frostmotstandsevne

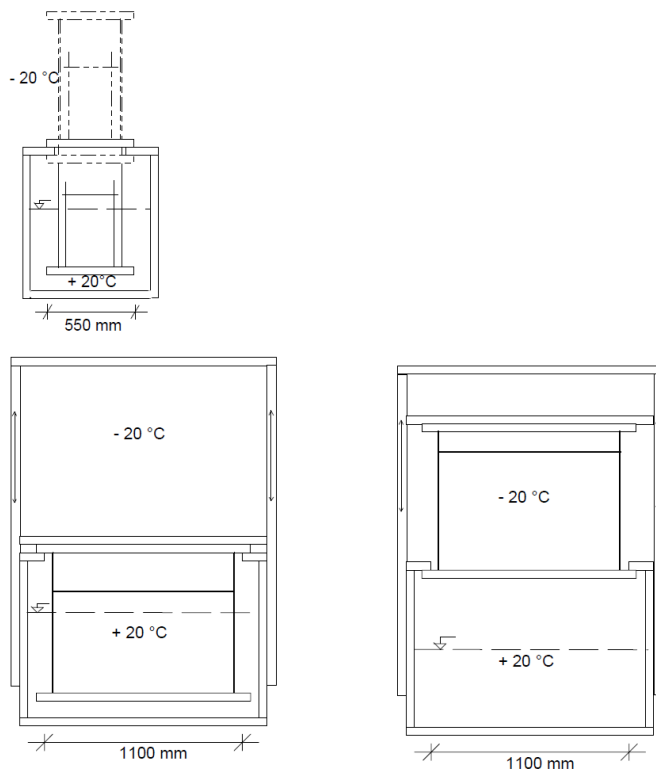
Frostmotstandsevne er beskrevet i Murkatalogen, anvisning M1, som "et uttrykk for et materiales evne til å tåle nedfukning og frysing gjentatte ganger uten skade som forringer dets funksjon". (Murkatalogen 2001)

2.7.2. Målemetoder for teglkvalitet, FM-tall

Teglsteinens frostmotstandsevne kan testes etter standardiserte metoder enten på enkeltsteiner eller sammenmurte veggdeler som blir utsatt for et nærmere definert antall fryse-tine-vekslinger, intensitet og varighet.

Prosedyre for fryse-tine-testing iht. NBI 134/2007, beskrives slik:

Enkeltsteiner fra fasaden(e) tas ut og tørkes ved 105 °C før testingen starter. En syklus defineres ved at hele steinen fryses ned ved – 20 °C til den er frosset, og tines i vann ved 20 °C til den er tint. Syklusen gjentas 84 ganger. Deretter blir steinen tørket og veid. Frostmotstandstall defineres ut i fra andelen stein som skaller av under testing, i vekt-% av hel stein.



Figur 16 Modell for testing av fryse-tine-sykluser (NBI 134/2007)

Frostmotstandstall for norskprodusert tegl kan også bestemmes ut i fra grunnleggende materialegenskaper som densitet, minuttsug, vannabsorpsjon og porefyllingstall. Metoden er nærmere beskrevet i Murkatalogen, Anvisning M1. (2001)

Formelen for FM-tallet er da gitt ved uttrykket:

$$FM = 1.000 \times s_1^{0,5} \times \frac{\rho_f}{\rho_c} \quad (1)$$

hvor

s_1 = teglsteinens minuttsug, målt på løperside/eksponert fasadeside [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$]

ρ_f = teglsteinens porefyllingstall [-]

ρ_c = teglsteinens nettodensitet [kg/m^3]

Teglsteinens *minuttsug*, s_1 , målt på steinens væreksponerte fasadeside, antas å ha betydning for fasadens nedfukting, spesielt under ekstreme, ofte kortvarige slagregnpåkjenninger. Økende minuttsug betyr økt fuktopptak pr. tidsenhet.

Teglsteinens porefyllingstall er andelen av *tilgjengelig* porevolum som fylles med vann ved kapillært oppsug ved neddykking i vannbad.

Netto densitet er materialets tørre masse per volumenhet (kg/m^3).

Sammenheng mellom FM-tall, densitet, minuttsug, vannabsorpsjon, porefyllingstall med veiledende grenseverider er vist i tabellen under.

FM-tall	(-)	0,25	0,55	0,70
Densitet	ρ_c (kg/m^3)	2.150	2.000	1.900
Minuttsug	s_1 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min.}$)	0,6	1,9	2,5
Vannabsorpsjon	W_w (volum-%)	11	22	28
Porefyllingstall	ρ_f (-)	0,70	0,80	0,84

(Murkatalogen 2001)

2.8. Fuktanalyser med WUFI 1D 1.4 Pro

Beregning av varme-, luft- og fuktoppførsel i en bygningskomponent er internasjonalt kjent som HAM-modeller(heat, air and moisture). Den kombinerte varme-, luft- og fukttransporten som skjer kalles den *hygrotermiske* oppførselen til bygningsdelen. (Geving & Thue 2002)

WUFI (" Wärme und Feuchte instationär") er opprinnelig et tysk menystyrt PC-program utviklet av Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), for å beregne varme-, luft- og fukttransport gjennom en bygningsdel over tid. Med andre ord kan man utføre *dynamiske fuktanalyser*- time for time, over flere år.

WUFI finnes i 2D-versjon på Engelsk. Programvaren er ikke beskrevet.

WUFI 1D er begrenset til å beregne hygrotermisk endimensjonal oppførsel og tar dermed *ikke* hensyn til varmetransport eller fukttransport pga. konveksjon, da disse mekanismene sjelden er endimensjonale.

Programvaren WUFI 1D 1.4 Pro tar hensyn til følgende transportmekanismer:

- Varmeledning
- Entalpiendringer ved faseoverganger i fukt
- Kortbølget stråling
- Langbølget stråling

- Dampdiffusjon
- Løsningsdiffusjon

- Kapillærledning
- Overflatekryping

I likhet med konveksjon er følgende transportmekanismer ikke inkludert:

- Transport ved gravitasjon
- Hydraulisk strøm ved trykkforskjeller
- Elektrokinetiske og osmotiske effekter

Programmet inneholder databaser med europeiske bygningsmaterialer med både faste og fuktavhengige materialparametre.

Programvaren er oversatt og tilpasset norske forhold, og selges i Norge av NTNU og Sintef Byggforsk, med blant annet utvendige klimafilere i TRY-format for 12 norske byer.

TRY-filer

De norske klimafilene er generert ut i fra "MDRY-filer" (Moisture Design Reference Year), som skal representere kritisk fuktbelastning på en konstruksjon med returperiode på 10 år.

TRY-filene inkluderer følgende parametre:

- Skydekkefaktor
- Vindretning
- Vindhastighet
- Årstid
- Nedbør siste time
- Lufttrykk
- Temperatur
- Relativ fuktighet
- Direkte solstråling
- Diffus stråling
- Lys, timegjennomsnitt
- Langbølget stråling, timegjennomsnitt
- Atmosfærisk motstråling, timegjennomsnitt

Tid

Klimadataene er delt inn i timer i løpet av et referanseår. Dersom man kjører beregningene for flere år, vil samme informasjon gjentas hvert år. Imidlertid vil mange verdier (som for eksempel vanninnhold i et materiale) stabiliseres etter et visst antall år.

Innvendig klima

Innvendige klimabetingelser kan angis på fire ulike måter:

- som en gitt/brukerdefinert sinusvariasjon over året
- med utgangspunkt i NS-EN 13788
- med utgangspunkt i NS-EN 15026
- eller, med utgangspunkt i ASHRAE Standard 160P

Dersom sinusvariasjon velges har man følgende 4 forhåndsdefinerte forløp:

- "lav" fuktbelastning gir innetemperaturer på [20 - 22°C] og variasjon av RF på [30 – 60%]
- "normal" fuktbelastning gir innetemperaturer på [20 - 22°C] og variasjon av RF på [40– 60%]
- "høy" fuktbelastning gir innetemperaturer på [20 - 22°C] og variasjon av RF på [50– 60%]

Eventuelt kan det velges et brukerdefinert forløp, konstant temperatur eller utendørsforløp

Materiallegenskaper

Ved beregning bygger man selv opp en endimensjonal bygningskomponent med materialer fra materialdatabasen eller eventuelt egendefinerte materialer i valgte tykkelser

Basisegenskapene som materialdataene baserer seg på er:

- tetthet [kg/m^3]
- porøsitet [m^3/m^3]
- spesifikk varmekapasitet [J/kgK]
- varmekonduktivitet for tørt materiale, [W/mK]
- relativ diffusjonsmotstand for tørt materiale, μ [-]

I tillegg kan man også endre materialenes hygrotermiske egenskaper mer detaljert.

Overgangskoeffisiener

Disse størrelsene angir kobling mellom klimadata og bygningskomponenten:

- Varmeovergangsmotstand for utvendig og innvendig overflate [$\text{m}^2\text{K/W}$]
- Vanndampdiffusjonsmotstand for innvendig eller utvendig overflate, sd-verdi [m]
- Absorpsjon av kortbølget stråling(sol)
- Langbølget strålingsemissivitet
- Absorpsjon av regnvann
- Vanndampovergangsmotstand beregnes av programmet ut fra varmeovergangsmotstanden

Alle overnevnte verdier ligger inne i programmet ved at man velger bygningsdel og overflatebehandlinger.

Orientering og høyde

Orientering og høyde på bygningsdelen velges. Det skilles mellom bygningsdeler som er:

- > 10 m
- 10 m < >20 m
- < 20 m

Retningene som kan velges er: N – NØ – Ø – SØ – S – SV – V – NV. Disse kan også tilpasses med helningsvinkel fra 0 ° til 90 °.

Ut i fra dette, beregner programmet klimadata med intensitet for slagregn og stråling, som videre er grunnlag for fuktbelastningen på valgt konstruksjon.

I følge brukermanualen på programvarens norske nettside egner verktøyet seg for vurdering av:

- *Uttørkingstid for byggfukt*
- *Kondensfare i bygningskomponenter*
- *Virkning av slagregn mot utvendige overflater*
- *Innvirkning fra ombygging eller rehabilitering*
- *Hygrotermiske forhold i ytterkonstruksjoner ved variasjoner i klima eller ved ekstreme klimaforhold*

(WUFI.no 2010)

3. Metode

Metodene som er utført er casebaserte på et bygg; murbygningen i Bygdøy Allé 4, som tidligere beskrevet i kap. 1.4.

3.1. Skadeanalyse av teglfasader

Registreringsnivået er på nivå 3 etter NS 3424 (1995), hvor analysen er begrenset til å analysere én bygningsdel – teglsteinsveggene fra 1. til 3. etasje. Formålet er å avdekke fasadenes skadesituasjon for vurdering av innvendig isolering.

Det er tidligere utført en tilstandsanalyse for hovedbygningdeler av Multiconsult i desember 2013. De registrerte skadene på fasadene er ikke utbedret.

3.1.1. Oppbygging av vegg

Definering av veggens oppbygging ble gjort både for vurdering av skadesituasjonen mht. innvendig isolering og som grunnlag for fuktanalyser i WUFI 1D. Det ble søkt etter å finne om veggen var bygd opp med hulerom eller ikke. Det ble også søkt etter variasjoner i veggtykkelse.

Tegningsanalyse og studering av veggens forband

Byggets tegningsgrunnlag og prosjektdokumenter ble brukt for å få oversikt over teglveggens tykkelse og oppbygging samt variasjoner i veggliv, fasader og etasjer. Studering av veggens forband ble gjort for å definere veggens oppbygging. Det ble søkt etter sammenheng mellom forband og veggoppbygging.

Oppmåling av veggtykkelser

Oppmåling av veggens tykkelse er gjort gjennom vinduer i bygningens tre hovedetasjer i de ulike fasaderetninger. Dette ble gjort for å finne ut om teglveggene med høy sannsynlighet er bygd opp likt i alle (tre) etasjer og for å avgjøre om veggene med høy sannsynlighet er massive eller bygd opp med hulerom.

3.1.2. Skaderegistrering

Sjekklisten under er brukt ved befaring for registrering av vanlige skader på murverk (angitt i NBI-blad 742.302)(1992). Listen er tilpasset formålet og begrenset til å omfatte skader som *skyldes* fukt- og frostpåkjenninger, eller *påvirker* denne typen skader. Undersøkelsen er utført ved visuell observasjon fra bakkenivå og dokumentert ved fotografering.

	Skadetype	Årsak
Teglstein	Tynne avskallinger (forvitring)	Frostpåkjenning
	Tykke avskallinger	Frostpåkjenning
	Riss og sprekker i murstein	Teglproduksjon, eller lokale spenningskonsentrasjoner
Mørtelfuger	Riss og sprekker	Lav heftfasthet mellom mørtel og stein
	Avskallinger og forvitring	Lav mørtelfasthet Frostpåkjenning Saltsprengning Utvasking av bindemidler
Murverk/ Slemming	Avskalling av slemming	Frostpåkjenning
	Skjolding/Striper	Lokale vannstrømmer, dårlige beslag
	Saltutfelling	Lokal oppfukting, ved f.eks lekkasjer
	Kalkutslag	Lokal oppfukting, ved f.eks lekkasjer
	Moser/alger	Fuktpåkjenning, manglende uttørking
	Riss/sprekker	Setninger, nedbøyninger
	Rustflekker	Armeringskorrosjon
	Mekaniske skader	Støt, mekanisk slitasje
Innvendig Overflate	Lekkasjer inn i bygningen, høyt fuktinnhold i tegl	Vanngjennomtrengning

3.1.3. Termografering

Utvendig termografering av bygget er gjort ved bruk av *InfraCAM FLIR SYSTEMS*. Hensikten var å kontrollere overflatetemperaturer for å finne ut om veggene er bygd opp på antatt måte ut i fra tegningsgrunnlag og for å bekrefte eller avkrefte om skadesituasjonen har sammenheng med tykkelse og temperatur på ulike deler av veggen og variasjoner i veggiv(pilastre/hjørner). Det ble også søkt etter eventuelle uoppvarmede rom.

Forutsetninger:

Emissivitet, $\epsilon = 0,9$

$T_{\text{Inne}}: 24 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_{\text{Ute}}: -3 \text{ }^\circ\text{C}$

3.1.4. Fuktinnhold i tegl

Målingen av fuktinnhold (RF %) i tegl ble gjort på to ulike steiner, plassert nært hverandre på samme fasade (fasade nordvest). Den ene målingen var *med* og den andre *uten* slemming for å se hvilken betydning slemmingen kunne ha for fuktnivået i teglsteinen.

Måling av RF (%) i tegl ble gjort ved hjelp av Protimeter MMS, i to borede prøvehull med diameter $\varnothing=16$ mm og en dybde på ca. 40 mm inn i steinene. Målingen ble gjort 24 t etter boringen, med 2 målinger per hull med 10 minutters ventetid i mellom. Middelerdi av de to målingene for hver av prøvene ble brukt som resultat.

3.2. Testing av teglkvalitet

Testing av teglsteinens kvalitet var ønskelig både for som forutsetning for fuktberegninger og for vurdering av innvendig isolering.

Det ble undersøkt om det var mulig å få utført fryse-tine-testing av fasadens teglkvalitet i forbindelse med denne oppgaven. Testmetoden er tidkrevende og utføres av Sintef Byggforsk i Trondheim. Pga. kostnadsbegrensninger ble det ikke vurdert.

I forbindelse med avtalt møte med Finn E. Madsø angående betydning av teglkvalitet ved innvendig isolering, ble en annen testmetode for teglkvalitet kjent. Metoden innebærer veiing og absorpsjonstesting som gir svar på steinenes fukttekniske egenskaper, som videre kan brukes som indikator på frostmotstand. Denne metoden var det mulig å utføre på Multiconsults laboratorium.

Det var ønskelig å ta ut steiner fra de fire væreksponerte fasadene, for videre vurdering mht. innvendig isolering. Det lot seg ikke gjøre i forbindelse med denne oppgaven.

Det lot seg imidlertid gjøre å ta ut tre steiner fra innvendig ubehandlet side i et ventilert kjellerrom i byggets nederste underetasje.

3.2.1. Uttak av tegl og vurdering av brenningsgrad



Figur 17 Bildet viser de tre steinene som ble tatt ut. (MWB)

Etter uttak ble steinene tatt med til Sivilingeniør Finn Madsø AS sitt kontor i Oslo. Her ble prøvesteinene veid og målt for å finne dimensjoner (l x b x h), volum og bruttodensitet.

Klang-test og visuell observasjon ble gjort iht. til NS 420 for å anta steinenes brenningsgrad. Klang-test ble utført ved banking med metallgjenstand i steinene. Visuell observasjon ble gjort for å definere steinenes farge.

Testing av steinenes fukttekniske egenskaper ble utført på Multiconsults laboratorium på Skøyen. Prosedyren for testing er iht. testemetode beskrevet i Murkatalogen, Anvisning M1. (2001)

3.2.2. Prosedyre for testing

Minuttsuget, s_1 ble målt på steinens liggeflate ved å holde 5 mm av steinen neddykket i vannbad i et minutt. Deretter ble vektøkningen (i kg oppsugd vann) dividert på bruttoareal (m^2) uten fradrag av kantskader.

Vannabsorpsjonen ble målt etter at steinen lå helt neddykket i vann i 24 timer. Vannabsorpsjonen (i vekt-%) ble bestemt som et forholdstall mellom volumet av totalt oppsugd vann i forhold til tørr stein og steinens nettovolum.

Porefyllingstallet (p_f) ble bestemt ved vannabsorpsjon dividert på tilgjengelig porevolum. Tilgjengelig porevolum (p_e) eller total oppsugd vannmengde (volum-%) ble funnet ved ytterligere 5 timer koking helt neddykket i vann.

Etter koking sto steinene i vannbad til temperaturen hadde sunket til romtemperatur før veiing. Nettovolumet (kg/m^3) ble bestemt ved hydrostatisk veiing av teglsteinene helt neddykket i vann (gram), som underlag for bestemmelse av netto densitet (ρ_c) (kg/m^3).

FM-tall ble funnet av formel (1) i kap. 2.7.2.

3.2.3. Kriterier for testing

Ut i fra erfaringstall fra prøver og analyser iht. Murkatalogen, anvisning M1 benyttes som en indikator på steinenes frostmotstandsevne med følgende kriterier:

FM < 0,25	tilfredsstillende for utendørs bruk som marktegl
0,25 < FM < 0,55	tilfredsstillende for utendørs bruk i fasader i norsk klima
0,55 < FM < 0,70	usikker frostmotstandsevne
FM > 0,70	vanligvis ikke tilfredsstillende for utendørs bruk i fasader i norsk klima

(Murkatalogen 2001)

3.3. WUFI- simuleringer

Analysen ved bruk av WUFI 1D Pro 1.4. ble gjort:

- dels for å forklare dagens skadesituasjon, og
- dels for å finne ut om ytre del av teglveggen tåler innvendig isolering uten økt fare for frostskafer i fasadene

I eksisterende situasjon ble programmet brukt til å sammenligne vanninnhold (middelverdi gjennom året) i ytterste teglstein og frostdybde i veggen (maksverdi gjennom året) i

- bygningens fire himmelretninger
- to ulike oppbygninger av veggen (ytterpunkter av oppbygging av en 2-steins vegg)
- to ulike oppbygninger av pilastre
- deler av vegg som ligger over 10 meter fra bakkenivå

Videre ble de "verste" tilfelle fra eksisterende situasjon – med dimensjonerende vanninnhold, sett nærmere på. Den ytterste teglsteinen ble delt inn i tre finere ytre sjikt på 1 cm for å sammenligne vanninnholdet der hvor frostskafer lettest kan oppstå. Det verste tilfellet ble valgt for videre analysering av hvordan isolering påvirker:

- vanninnhold i ytre sjikt (middelverdi gjennom året)
- vanninnhold i ytre sjikt (maksverdi gjennom året)
- frostdybde i veggen (maksverdi gjennom året)

Tilfellet med høyest vanninnhold i ytterste stein (verst fuktbelastning) i eksisterende situasjon ble analysert med isolering (opp til dagens forskriftskrav til varmetap i vegg).

Det ble søkt å finne et *kritisk vanninnhold* mht. frostskafer i massivteglsteinen ved de ulike isoleringstykkelene. Dette ble gjort for å se om materialets porer kunne bli mettet ved økt isolering.

Med kritisk vanninnhold menes den mengden vann steinen trenger for å fylle materialets porer.

Når vi vet vanninnholdet i volum-%, kan andel vann i porer finnes ved:

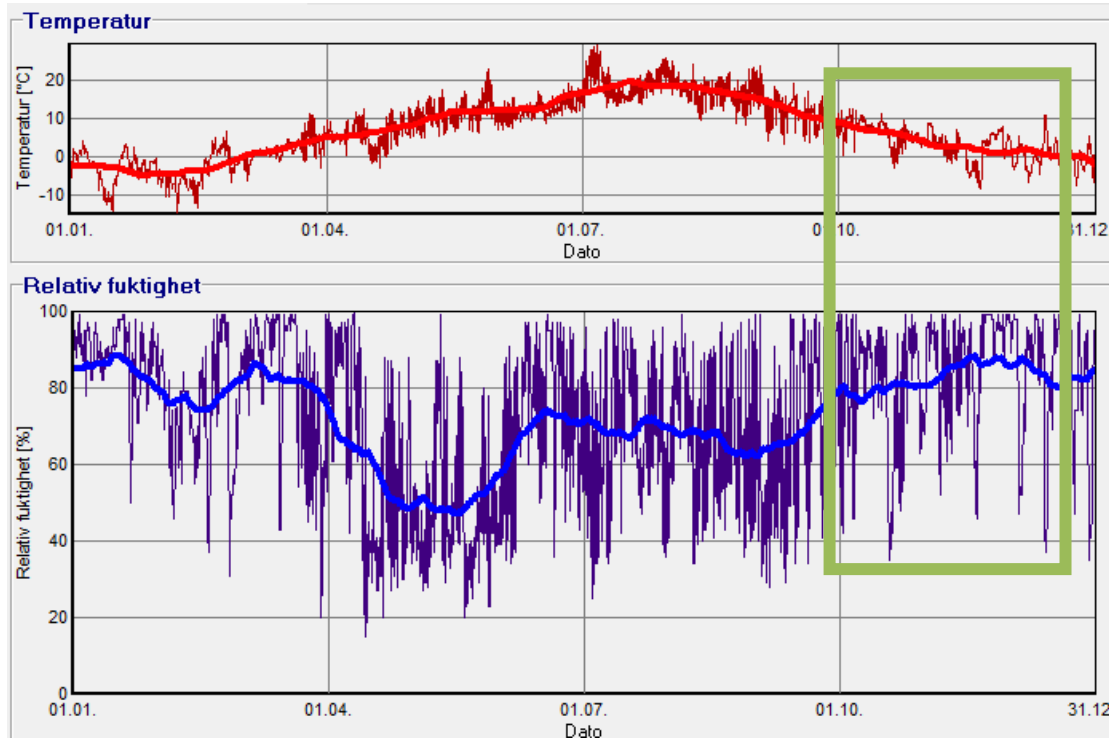
$$\text{Andel vann i porer} = \frac{\text{vanninnhold (\%)}}{\text{tilgjengelig porevolum (\%)}} \quad (2)$$

(Murkatalogen 2001)

3.3.1. Forutsetninger for analyse av eksisterende situasjon

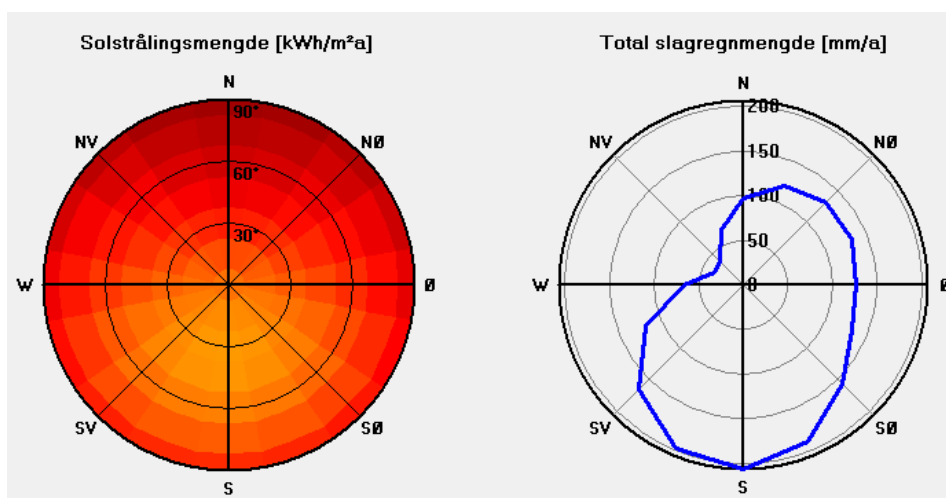
Uteklima

Utvendig klima for målestasjon på Blindern, Oslo er valgt som nærmeste klimafil for Bygdøy Allé, Oslo.



Figur 18 Utvendig klima, temperatur og relativ fuktighet i uteluft gjennom året (WUFI)

Av Oslo-klima i WUFI, vil den verste frostperioden være fra midten av januar til slutten av februar. Den verste perioden med tanke på nedbør kombinert med frost vil likevel være på høsten, fra rundt 1. oktober til midten av desember (markert med grønn ramme).



Figur 19 Stålingsmengde og slagregnmengde i ulike himmelretninger (WUFI)

Fuktbelastning på de ulike fasader vil variere med solstråling, vindretning og nedbør. WUFI har beregnet solstråling og slagregnmengde på de fasader som er lagt inn i beregningen.

Inneklima

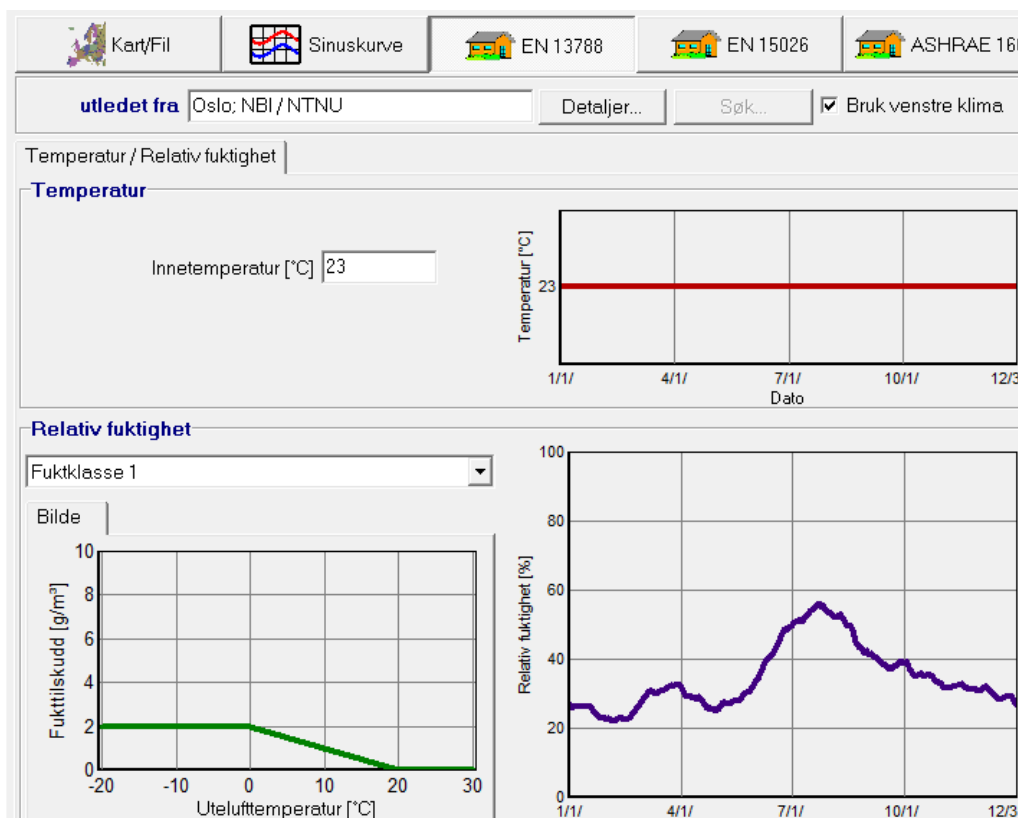
At bygningen er et kontorbygg innebærer at inneklimaet er relativt tørt. At temperaturen er brukerstyrt innebærer at en innetemperatur på rundt 23-25 °C mesteparten av året ikke er usannsynlig.

WUFI 4.1 har alternativer for innklima fra to EN-standarder; 13788 og 15026.

15026 har variabel innetemperatur, med laveste fuktbelastning: "normal fuktbelastning" (30 - 60 % RF). Det resulterer i at relativ fuktighet er over 40 % mesteparten av året, noe som virket noe høyt for et kontorbygg. Samtidig er temperaturen 20 grader hele vinteren som virker noe lavt da folk kan fyre som de vil.

EN 13788 har konstant temperatur hele året, med fuktclasser ned til fuktklasse 1. Med fuktklasse 1 og 23 grader er RF(%) rundt 30 % på vinteren. Med tanke på både innetemperatur og fuktbelastning høres dette mer fornuftig ut.

For de utførte analysene (kontroll av vanninnhold i de ytre deler av teglsteinssjiktet og frostdybde i vegg) ble fuktklasse 1 og konstant temperatur på 23 °C valgt.



Figur 20 Innvendig klima etter EN 13788

Oppbygging av bygningsdeler og materialegenskaper:

Tabellene under viser materialegenskaper for valgte materialer i WUFIs database:

Ytre pusslag/slemming: *Kalksementpuss*

Basisverdier	
Romdensitet [kg/m ³]	1900,0
Porøsitet [m ³ /m ³]	0,24
Spes. varmekapasitet tørr [J/kgK]	850,0
Varmekonduktivitet tørr [W/mK]	0,8
Vanndampdiffusjonsmotstand [-]	19,0
Tilnæringsparameter	
Varmekonduktivitetspåslag [%/M.-%]	8,0

(Antatt)

Figur 21 Materialegenskaper, kalksementpuss (WUFI)

Murstein: *Massivtegl, historisk*

Basisverdier	
Romdensitet [kg/m ³]	1800,0
Porøsitet [m ³ /m ³]	0,31
Spes. varmekapasitet tørr [J/kgK]	850,0
Varmekonduktivitet tørr [W/mK]	0,6
Vanndampdiffusjonsmotstand [-]	15,0
Tilnæringsparameter	
Varmekonduktivitetspåslag [%/M.-%]	15,0

Forutsetning for valg av massivteglmateriale var en middelvei av testet densitet ved kvalitetstest av teglstein. (Beskrevet i kap. 4.2)

Figur 22 Materialegenskaper, massivteglstein (WUFI)

Mørtelfuger og innvendig puss: *Kalkpuss*

Basisverdier	
Romdensitet [kg/m ³]	1600,0
Porøsitet [m ³ /m ³]	0,3
Spes. varmekapasitet tørr [J/kgK]	850,0
Varmekonduktivitet tørr [W/mK]	0,7
Vanndampdiffusjonsmotstand [-]	7,0
Tilnæringsparameter	
Varmekonduktivitetspåslag [%/M.-%]	8,0

(Antatt)

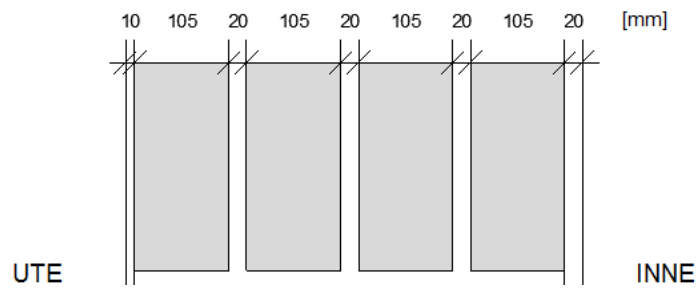
Figur 23 Materialegenskaper, kalkpuss (WUFI)

Figurene under viser valgte oppbygginger av vegg og pilaster for beregning av eksisterende situasjon. (forutsetning for oppbygging av vegg er beskrevet i kap. 4.1.1.)

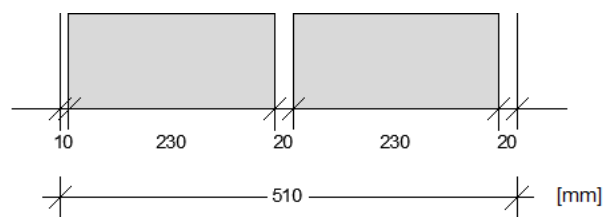
Tilfellene hadde følgende inndeling av materialsjikt og tykkelser, hvor:

Grå sjikt = massivteglstein

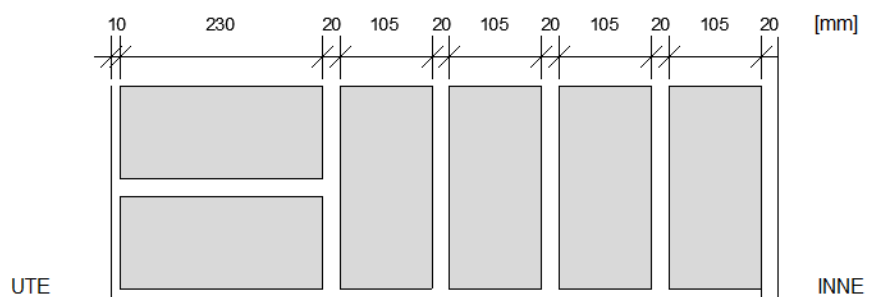
Hvite sjikt = puss og mørtelfuger



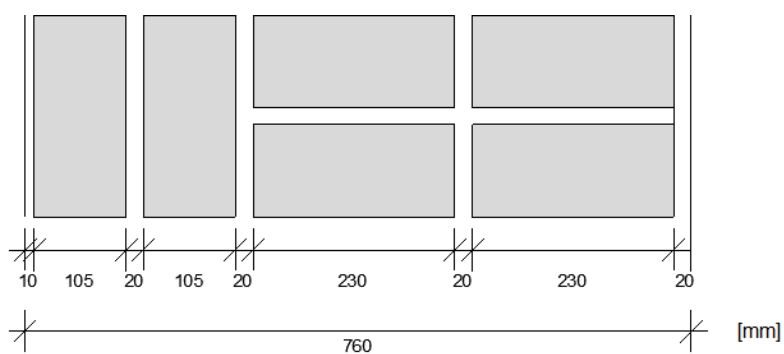
Vegg A



Vegg B



Pilaster A



Pilaster B

De fire tilfellene ble analysert i bygningens fire hovedretninger og er videre i oppgaven kalt:

- Vegg A_NV
- Vegg A_NØ
- Vegg A_SØ
- Vegg A_SV
- Vegg B_NV
- Vegg B_NØ
- Vegg B_SØ
- Vegg B_SV
- Pilaster A_NV
- Pilaster A_NØ
- Pilaster A_SØ
- Pilaster A_SV
- Pilaster B_NV
- Pilaster B_NØ
- Pilaster B_SØ
- Pilaster B_SV

WUFI skiller mellom konstruksjonsdeler som er *over* og *under* 10 m fra bakkenivå. To av fasadene, SØ og SV har én etasje som ligger over 10 m. Innvirkningen av pilastre og steinenes retning (Vegg A eller Vegg B) er neglisjert. Dette gir to nye tilfeller, de er videre kalt:

- Vegg A_SØ_10
- Vegg A_SV_10

Overgangskoeffisienter og stråling

Alle fasadene er valgt til å være vindavhengige, og er beregnet med programmets overgangskoeffisienter for yttervegg. Fasadenes utvendige overflatesjikt ble valgt til å være: "grå puss, eldret" med følgende strålingsegenskaper:

Kortbølget strålingsabsorpsjonstall = 0,6

Langbølget strålingsemissivitet = 0,9

Tid

Alle beregningene er gjort for en periode på 10 år, slik at vanninnholdsmengder ble stabilisert. Resultater er hentet fra siste beregnede år.

3.4. Isoleringstilfeller

Følgende isoleringstilfeller ble valgt for sammenligning og analyse:

Innvendig isolering med mineralullstykkelsene:

- 50 mm
- 70 mm
- 100 mm
- 150 mm

3.4.1. U-verdiberegninger

U-verdier for uisolert vegg og de ulike isoleringstilfellene er beregnet iht. NS-EN ISO 6946, ved bruk av formelen:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R + R_{si} + R_{se}} \quad [W/(m^2K)] \quad (3)$$

hvor

R_T = summen av de ulike sjiktene varmemotstand

$$R = \text{varmemotstand for konstruksjonen} = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (m^2K/W)$$

d = materialsjiktets tykkelse (m)

λ = materialets dimensjonerende varmekonduktivitet (W/(mK))

R_{si} = Innvendig overgangsmotstand = 0,13 m²K/W

R_{se} = Utvendig overgangsmotstand = 0,04 m²K/W

Varmeovergangsmotstander er iht. tabell 24 i NBI 471.008 for horisontal varmestrøm.

(NBI 471.008, SINTEF Byggforsk 1998)

Materialenes varmekonduktivitet og sjiktene tykkelser er de samme som beskrevet i kap 3.3 og kap 3.4.2.

3.4.2. Forutsetninger for WUFI-simuleringer

Det ble benyttet samme inndataverdier for beregningsperiode(år), uteklima, inneklima, overgangs-koeffisienter og tegl- og pussmaterialer som i eksisterende tilfelle.

I tillegg ble følgende materialegenskaper fra WUFIs materialdatabase lagt til grunn:

Isolasjonsmateriale: Mineralull

Basisverdier	
Romdensitet [kg/m ³]	60,0
Porøsitet [m ³ /m ³]	0,95
Spes. varmekapasitet, tørr [J/kgK]	850,0
Varmekonduktivitet tørr [W/mK]	0,04
Vandampdiffusjonsmotstand [-]	1,3
Tilnæringsparameter	

Figur 24 Materialegenskaper, mineralull (WUFI)

4. Resultater

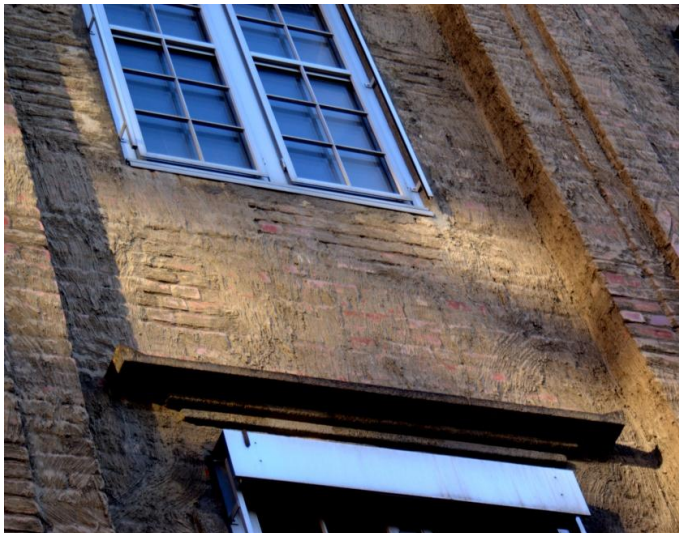
4.1. Skadeanalyse av teglfasader

4.1.1. Oppbygging av vegg

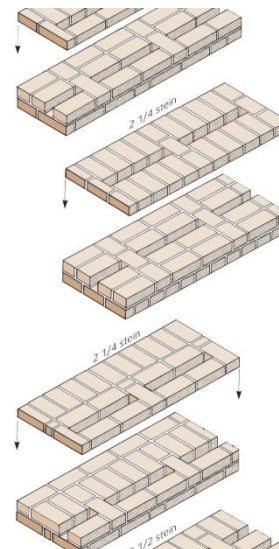
Tegningsanalyse og studering av forband

Verken tegninger eller prosjektbeskrivelser viser tegn til at veggene er bygd opp med hulerom. Oppmåling av veggtykkelser på plantegninger fra 1. til 3. etasje viser at veggene er ca. 50 cm og har variasjoner i vegglivet med vertikale pilastre. Pilastertykkelsene tilsvarer lengden på en stein (ca. 23 cm).

Studering av veggens forband og sammenligning med forband til en trondhemshulmur, viste at en mulig oppbygging kunne være $2 \frac{1}{4}$ trondhemshulmur med hulerom på $\frac{1}{4}$ steintykkelse.



Figur 25 Forband, fasade sydvest (MWB)



Figur 26 Forband, Trondhemshulmur (NBI 723.308, SINTEF Byggforsk 2013)

Oppmåling av vegger



Figur 27 Oppmåling gjennom ventil i underetasje (MWB)

Bildet viser oppmåling av vegg i underetasje gjennom en ventil. Total veggtykkelse her er 67 cm, hvorav 17 cm utgjør ytre vange av naturstein + mørtelfuge, mens tresteinsvangen av teglstein er på 50 cm inkludert mørtelfuger.

Med teglstein med lengde på ca 230 mm gir det tykkelse på fugen = $(50 - 23 + 23)$ cm = 4 cm

Det er imidlertid teglveggene i 1.-3. etasje er de som er relevante for denne oppgaven. De har ikke noen åpning/ventil slik som underetasjen. Derfor måtte oppbyggingen antas.



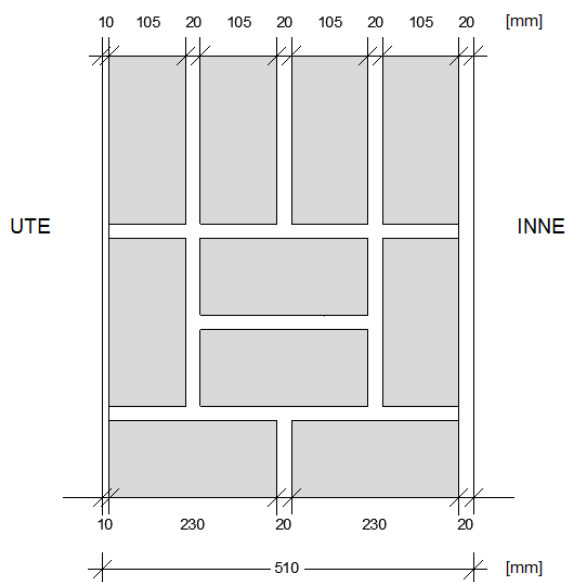
Figur 28 Oppmåling av vegg 2. etasje (MWB)



Figur 29 Innvendig puss (MWB)

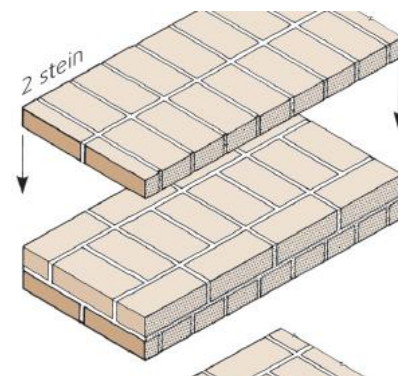
Teglveggene i de tre etasjene ble målt til å være omtrent 54 cm i alle fasader hvorav 1 cm er utvendig slemming og 2-3 cm er innvendig puss.

Oppmålingen av tykkelser gjennom vegg i underetasjen viser at teglveggene kan være bygd opp med noe tykkere mørtelfuger. Dersom veggene i etasjene over er bygd opp på samme måte, kan man anta at teglveggene er massive. Tykkelsene kan i så fall stemme med en 2-steins teglvegg i alle tre etasjer.



Figur 30 Antatt veggoppbygging (MWB)

Ved fuktanalyse (i WUFI) er følgende (figur til venstre) oppbygging og dimensjoner av vegg valgt (noe forenklet da alle mørtelfuger = 2 cm), samt at kun to av disse tilfellene vist ble analysert i WUFI.

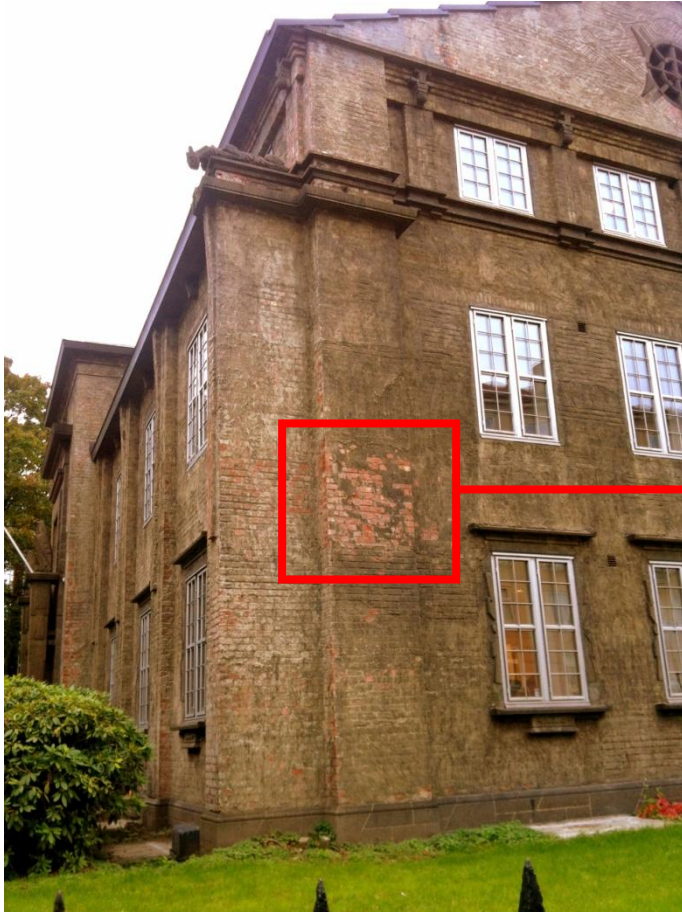


Figur 31 Forband 2 steins massivmur (NBI 723.308, SINTEF Byggforsk 2013)

4.1.2. Skaderegistrering

Tabellen under viser registrerte skadetilfeller, beskrevet med omfang og plassering. Fotodokumentering av skadene finnes i Vedlegg 2.

	Skadetype	Årsak	Registrert	Plassering, fasade	Dokumentering
Teglstein	Tynne avskallinger (forvitring)	Frostpåkjenning	X	Fasade nordvest, nærmere bestemt på pilaster nær nordvendt hjørne	Foto 01
	Tykke avskallinger	Frostpåkjenning	X	Fasade nordvest, nærmere bestemt på pilaster nær nordvendt hjørne	Foto 02
	Riss og sprekker i murstein	Teglproduksjon, eller lokale spenningskonsentrasjoner			
Mørtelfuger	Riss og sprekker	Lav heftfasthet mellom mørtel og stein			
	Avskallinger og forvitring	Lav mørtelfasthet Frostpåkjenning Saltsprengning Utvasking av bindemidler	X	Fasade nordvest, nærmere bestemt på pilaster nær nordvendt hjørne Høyt oppe mot gesims, nordvendt hjørne	Foto 03 Foto 04
Murverk/ Slemming	Avskalling av slemming	Frostpåkjenning	X	Pilastre i alle fasader Hjørner og høyt oppe mot gesims i alle fasader Spesielt utbredt på pilastre og hjørner mot nord	Foto 05 Foto 06
	Mørke striper	Lokale vannstrømmer, dårlige beslag	X	Under takbeslag i fasade nordvest og sydøst	Foto 07 Foto 08
	Saltutfelling	Lokal oppfukting, ved f.eks lekkasjer	X	Høyt oppe mot gesims, nordvendt hjørne	Foto 09
	Skjolding/kalkutslag	Lokal oppfukting, ved f.eks lekkasjer	X	Rundt vindusbeslag og under gesims	Foto 10
	Moser/alger	Fuktpåkjenning, manglende uttørking	(X)	Moser/alger er ikke registrert, men rester av klatreplanter er registrert på begge fasader mot nord (NV og NØ)	Foto 11
	Riss/sprekker	Setninger, nedbøyninger			
	Rustflekker	Armeringskorrosjon			
	Mekaniske skader	Støt, mekanisk slitasje			
Innvendig Overflate	Lekkasjer inn i bygningen, høyt fuktinnhold i tegl	Vanngjennomtrengning			



Bildene viser området med verste skader registrert (fasade nordvest, på pilaster nær nordvendt hjørne).

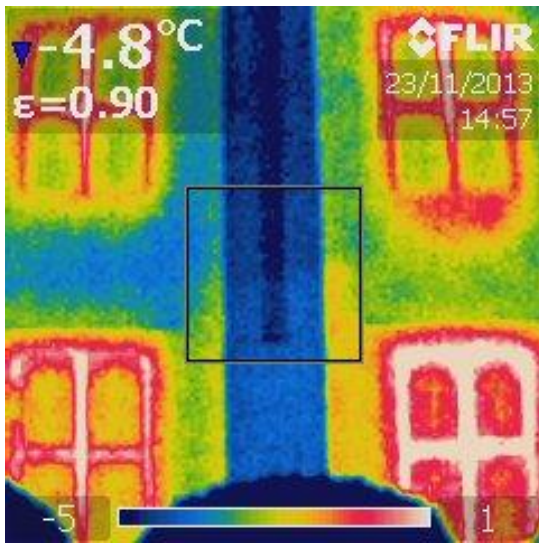
Figur 32 Avskalling av slemming, fasade nordvest (MWB)



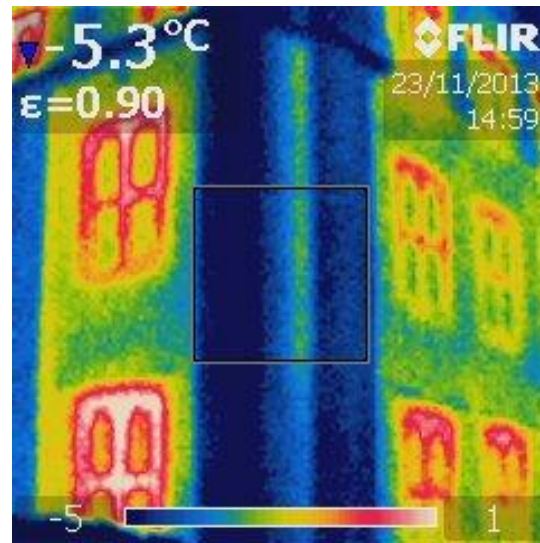
Figur 33 Verste registrerte skadeområde (MWB)

4.1.3. Termografering

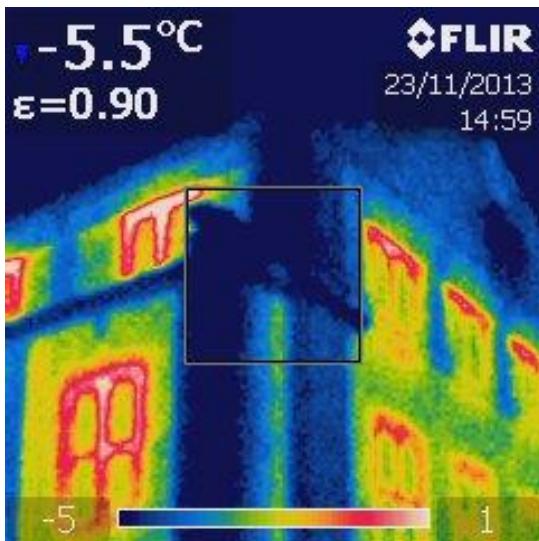
Termografbildene viser forskjeller i overflatetemperaturer (varmestråling) i ulike deler av teglveggene. Temperaturskalaen nederst på bildene angir fargekoder.



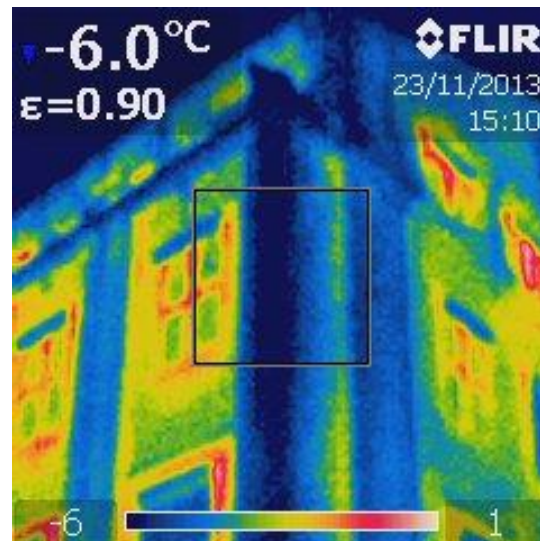
Figur 34 Pilaster, fasade nordøst (MWB)



Figur 35 Pilaster, nordvendt hjørne (MWB)



Figur 36 Pilaster, nordvendt hjørne, høyere oppe (MWB)



Figur 37 Pilaster, sydvendt hjørne, høyt oppe (MWB)

Analysen viser at pilastre og hjørner har kaldere overflater enn omliggende vegger.

4.1.4. Fuktinnhold i tegl



Figur 38 Måling 1 (MWB)

Måling av RF = 84,2 % i tegl med slemming.



Figur 39 Måling 2 (MWB)

Måling av RF = 81,2 % i tegl uten slemming.

4.2. Testing av telgkvalitet



Figur 40 Prøvesteiner (MWB)

Bildet viser de tre teglsteinene etter testing. Steinene ligger i rekkefølgen 1-3-2 fra venstre til høyre.

Vi kan se at den midterste steinen (nr.3) har en dypere rødfarge enn stein 1 og 2.

Tabellen under viser måleresultater fra den fukttekniske testingen og testing av steinenes klang.

Stein-prøve	Densitet		Kant-skader	Fuktegenskaper			FM-tall	Klang/Farge
	(Brutto)	(Netto)		Minuttsug	Vann-absorpsjon	Porefyllings-tall		
	(kg/m ³)	(kg/m ³)						
1	1751	1867	6,24	1,82	14,02	0,959	0,693	Høy klang. Teglørød
2	1749	1844	5,15	1,90	14,31	0,966	0,722	Ren til dempet klang. Lys teglørød
3	1977	2041	3,12	0,65	8,72	0,910	0,360	Høy klang. Dyprød, vinrød

Klang-test og visuell observasjon iht. til NS 420, viser at brenningsgraden til prøvestein 1 og 2 tilsvarer klasse B, mens prøvestein 3 tilsvarer brenningsgrad A.

Fukttesting viser at det er stor forskjell på kvaliteten til prøvestein 3 i forhold til 1 og 2. Stein 1 og 2 har relativt like fuktegenskaper og FM-tall. Stein 3 har høyere densitet og lavere absorpsjonsegenskaper, som igjen gir lavere (gunstigere) FM-tall.

Prøvestein 1 og 2 har gjennomsnittlig FM-tall på 0,71, og kan ikke karakteriseres som frostbestandig iht. oppsatte kriterier.

Prøvestein 3, med FM-tall på 0,36, kan karakteriseres til å ha god frostmotstandsevne. Selv om porefyllingstallet er høyt (0,91), er de øvrige parametrene så vidt gunstige at FM-tallet blir relativt lavt (gunstig).

For fullstendig resultattabell med formler, se Vedlegg 3.

4.3. WUFI – simuleringer eksisterende situasjon

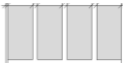




Tabellene under viser en samlet sammenligning av de ulike tilfeller i eksisterende situasjon.

Parametrene som er sammenlignet er vanninnhold i ytterste teglstein i (kg/m³) og frostdybde inn i veggen (cm).

Veggoppbygging

Vanninnhold i ytterste teglstein

Frostdybde

	Middelverdi over året			Avstand fra utv. overflate	
	[kg/m ³]			[cm]	
	Vegg A_NV	3,8	Vegg A_NV	16,2	
	Vegg A_NØ	19,0	Vegg A_NØ	17,0	
	Vegg A_SØ	14,0	Vegg A_SØ	16,9	
	Vegg A_SV	14,0	Vegg A_SV	16,2	
	Vegg B_NV	3,5	Vegg B_NV	16,0	
	Vegg B_NØ	11,0	Vegg B_NØ	17,5	
	Vegg B_SØ	10,0	Vegg B_SØ	16,6	
	Vegg B_SV	9,5	Vegg B_SV	17,5	
	Pilaster A_NV	3,7	Pilaster A_NV	22,2	
	Pilaster A_NØ	11,0	Pilaster A_NØ	22,9	
	Pilaster A_SØ	11,0	Pilaster A_SØ	22,2	
	Pilaster A_SV	12,0	Pilaster A_SV	22,2	
	Pilaster B_NV	4,0	Pilaster B_NV	22,8	
	Pilaster B_NØ	20,0	Pilaster B_NØ	23,8	
	Pilaster B_SØ	14,0	Pilaster B_SØ	22,8	
	Pilaster B_SV	17,0	Pilaster B_SV	22,4	
	Vegg A_SØ_10	25,0	Vegg A_SØ_10	16,9	
	Vegg A_SV_10	25,0	Vegg A_SV_10	16,9	

Høyest vanninnhold er markert grønt (MWB)

Analysene viser at alle tilfeller under 10 meter (Vegg A, Vegg B, Pilaster A og Pilaster B) har høyest vanninnhold i fasade nordøst.

Imidlertid har fasadene over 10 meter (Vegg A_SØ_10 og Vegg A_SV_10) det høyeste vanninnholdet.

Det er også forskjell på vanninnhold ved de ulike rotasjoner av ytterste stein. Ytterste stein med løperside vendt ut har høyere vanninnhold enn stein med koppeside vendt ut.

Det er ikke stor forskjell i vanninnhold for pilastre i forhold til vegg.

Frostdybden varierer mellom vegg- og pilaster- tilfeller. Pilastertilfellene har dypere frostdybde.

Vurdering av hvilken av de to tilfellene *Vegg A_SØ_10* og *Vegg A_SV_10* som har høyest vanninnhold.

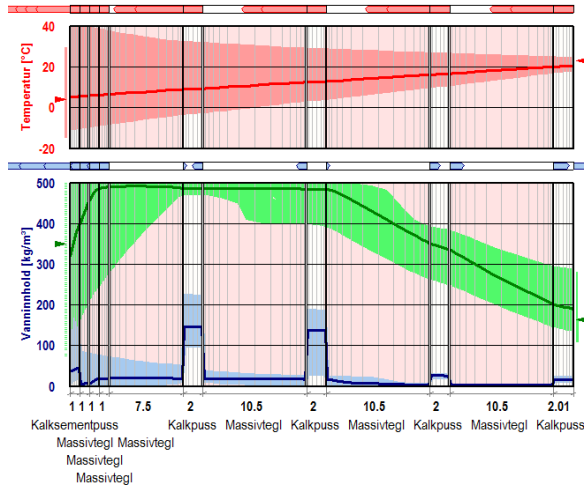
Tabellen under viser en nærmere sammenligning av de to tilfeller med høyest vanninnhold. Ytre del av massivteglsteinen er delt inn i finere sjikt.

		Vanninnhold [kg/m ³] (ila. et referanseår)			
		Ytre deler av massivteglstein			
		sjikt 1 (1 cm)	sjikt 2 (1 cm)	sjikt 3 (1 cm)	sjikt 4 (7,5 cm)
SØ	<i>middelverdi</i>	30	25	25	23
	<i>maksverdi</i>	82	77	74	56
SV	<i>middelverdi</i>	28	25	25	24
	<i>maksverdi</i>	72	66	60	38

Analysen viser at *Vegg A_SØ_10* har høyest vanninnhold. Tilfellet ble valgt for videre analyse med isolering.

4.4. WUFI – isoleringstilfeller

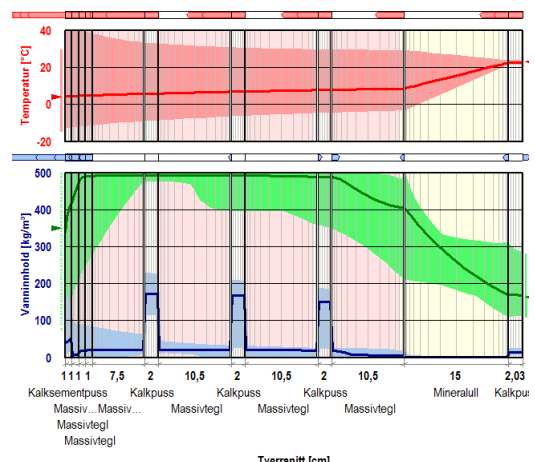
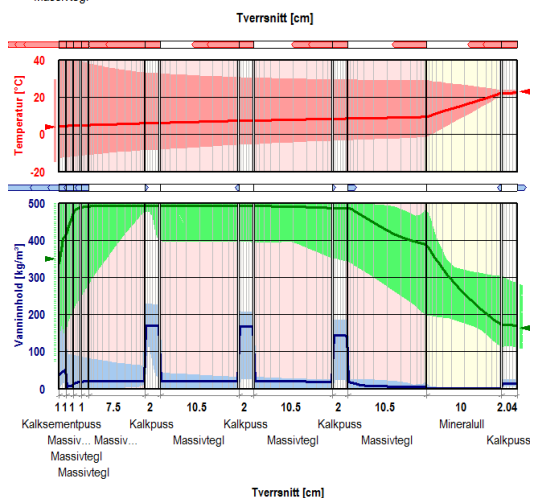
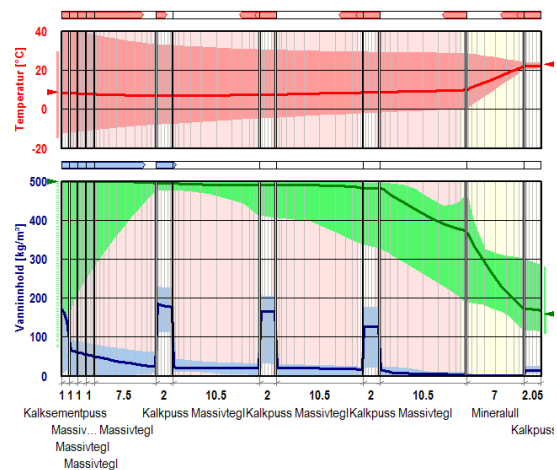
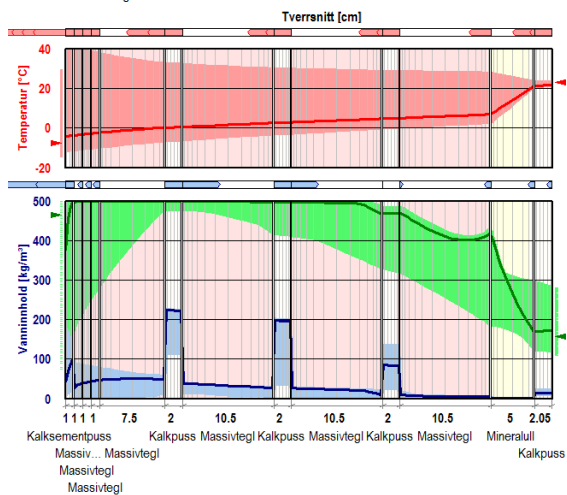
Figurene under viser øyeblikksbilder tatt 1.nov av uisolert vegg(øverst) og samme vegg isolert med de ulike mineralullstykkelsene 50, 70, 100 og 150 mm.



Røde kurver viser spor av høyeste og laveste temperatur igjennom året.

Grønne kurver viser relativ fuktighet (RF %). Disse kurvene er ikke analysert.

Blå kurver viser vanninnhold, og er nærmere analysert i de ytre sjikt av teglsteinen.



Av de temperaturdiagrammene kan vi tydelig se at veggen blir kaldere ved isolering. Av de blå kurvene er det vanskelig å se noen vannøkning i ytre sjikt av massivteglstein.

Tabellen under viser sammenligning av vanninnhold i de ytre sjikt av teglsteinen og beregnede U-verdier for de ulike isoleringstilfellene.

		Vanninnhold i sjikt i løpet av et referanseår [kg/m ³]				U-verdi
		Ytre deler av massivteglstein				W/(m ² K)
		sjikt 1 (1 cm)	sjikt 2 (1 cm)	sjikt 3 (1 cm)	sjikt 4 (7,5 cm)	
Før isolering	<i>middelverdi</i>	30	25	25	23	1,00
	<i>maksverdi</i>	82	77	74	56	
50 mm mineralull	<i>middelverdi</i>	40	35	31	27	0,44
	<i>maksverdi</i>	87	83	79	64	
70 mm mineralull	<i>middelverdi</i>	40	40	32	30	0,36
	<i>maksverdi</i>	88	84	80	66	
100 mm mineralull	<i>middelverdi</i>	45	40	35	25	0,29
	<i>maksverdi</i>	90	85	82	67	
150 mm mineralull	<i>middelverdi</i>	35	37	35	30	0,21
	<i>maksverdi</i>	91	86	82	68	

Analysene viser at det ikke er stor forskjell i vanninnhold i sjiktene, verken som middelverdi eller maksverdi, før isolering sammenlignet med de ulike isoleringstilfellene. Resultatene viser imidlertid en tendens, hvor vanninnholdet stiger ved økt isoleringsgrad.

U-verdiene reduseres ved økt isoleringsgrad. Ved 150 mm mineralull tilfredsstiller veggen minstekrav til U-verdi på 0,22 W/m²K iht. TEK 10 (Se kap. 2.2.)

Kritisk vanninnhold

Tabellen under viser samme resultater som på forrige side, bare med vanninnhold omregnet til volum-%.

		Vanninnhold i sjikt i løpet av et referanseår [volum-%]			
		Ytre deler av massivteglstein			
		sjikt 1 (1 cm)	sjikt 2 (1 cm)	sjikt 3 (1 cm)	sjikt 4 (7,5 cm)
Før isolering	<i>middelverdi</i>	3	2,5	2,5	2,3
	<i>maksverdi</i>	8,2	7,7	7,4	5,6
50 mm mineralull	<i>middelverdi</i>	4,0	3,5	3,1	2,7
	<i>maksverdi</i>	8,7	8,3	7,9	6,4
70 mm mineralull	<i>middelverdi</i>	4,0	4,0	3,2	3,0
	<i>maksverdi</i>	8,8	8,4	8,0	6,6
100 mm mineralull	<i>middelverdi</i>	4,5	4,0	3,5	2,5
	<i>maksverdi</i>	9,0	8,5	8,2	6,7
150 mm mineralull	<i>middelverdi</i>	3,5	3,7	3,5	3,0
	<i>maksverdi</i>	9,1	8,6	8,2	6,8

Tabellen under viser andel vann i porer beregnet ved hjelp av formel (2) kap. 3.3. med tilgjengelig porevolum = 31 % for valgt teglsteinsmateriale i WUFI.

		Andel vann i porer (%)			
		Ytre deler av massivteglstein			
		sjikt 1 (1 cm)	sjikt 2 (1 cm)	sjikt 3 (1 cm)	sjikt 4 (7,5 cm)
Før isolering	<i>ved maks vanninnhold</i>	26,5	24,8	23,9	18,1
50 mm mineralull	<i>ved maks vanninnhold</i>	28,1	26,8	25,5	20,6
70 mm mineralull	<i>ved maks vanninnhold</i>	28,4	27,1	25,8	21,3
100 mm mineralull	<i>ved maks vanninnhold</i>	29,0	27,4	26,5	21,6
150 mm mineralull	<i>ved maks vanninnhold</i>	29,4	27,7	26,5	21,9

Analysen viser at andel vann i porer ved maks vanninnhold i løpet av året, er langt nær kritisk vanninnhold (metning) tilsvarende 100 %. Andelen vann økes ved økt isoleringsgrad, men i følge analysen er økningen beskjeden.

5. Vurdering og analyse

5.1. Skadeanalyse av teglfasader

5.1.1. Oppbygging av vegg

Vurdering av massiv vegg i forhold til trondhemshulmur:

Et eventuelt hulerom på ¼ steintykkelse sammenlignet med en massiv vegg ville med være fordelaktig for varme- og fukttransport, da luftrommet ville fungert som et isolerende sjikt og kappilær fuktvandring ville bli stoppet og tørket ut pga. konveksjon i hulerommene.

Det at veggene ble antatt å være massive er med andre ord konservativt med tanke på vurdering av dagens skadesituasjon og fuktanalyser. (Fuktanalysene i WUFI 1D ville imidlertid ikke fått med seg fordelene mht. fuktvandring da programmet ikke beregner konveksjon).

5.1.2. Skaderegistrering

Som en helhetlig vurdering av skadesituasjonen, er fasadene jevnt over i god stand. Dersom slemmingen er original kan det antas at bygget har tålt klimapåkjenninger i nesten 100 år uten å bli påført store skader. Likevel har noen områder av bygget større skadekonsentrasjoner.

Avskalling av slemming er registrert i størst grad på pilastre, hjørner og høyt oppe mot tak.

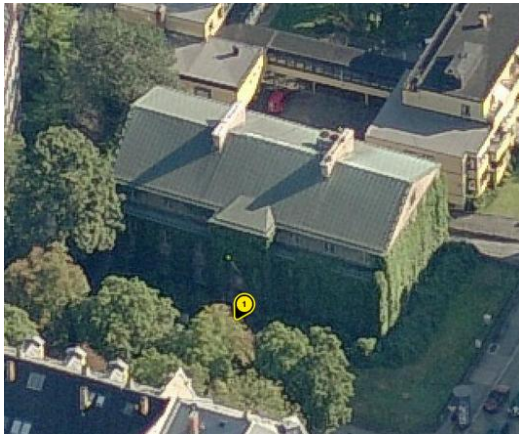
Det området med flest registrerte skader er på pilaster nær nordvendt hjørne. Her er avskallingen av slemming betydelig, samt at frostskafer på teglstein og forvitring mørtelfuger er registrert.

Vurdering av mulige årsaker

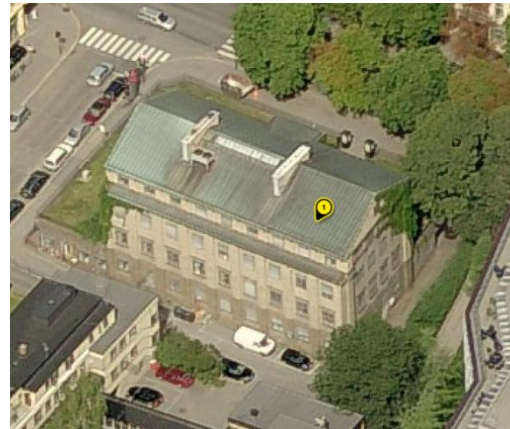
Rester av klatreplanter

Klatreplanter skal utgangspunktet gi fasaden klimatisk beskyttelse og skal dermed beskytte mot frostskafer. Imidlertid holder den fasaden skyggefull, noe som gir en fuktig fasade med jevn temperatur, - og dermed gode vekstforhold for moser og alger. Moser og alger holder på fuktigheten og kan føre til større fare for frostskafer. (NBI 742.302, SINTEF Byggforsk 1992)

Ved søking etter kart og bilder av bygget på ble disse bildene oppdaget.



Figur 41 Skråfoto av bygget sett fra nord (Skråfoto, Gule sider)



Figur 42 Skråfoto av bygget sett fra syd (Skråfoto, Gule sider)

Bildene viser at bygningens nordfasader har vært dekt av klatreplanter som kan ha forårsaket større fuktbelastning, og dermed større fare for frostskafer i teglet. Det er imidlertid usikkert når bildene er tatt og hvor lenge plantene var der.

En teori om at årsaken til de verste skadeområdene på bygget har sammenheng med klatreplanene, kan bety at fasadenes verste fuktbelastning er fjernet.

Ekstremvær

En annen mulig årsak til skadene kan være ekstremvær som tok plass på Sør- og Østlandet, høsten 2000. Delrapport i forskningsprosjektet *Klima 2000*, beskriver at kraftige og lange regnværsperioder førte til skader på bygninger som ikke før hadde vært utsatt for fuktskader. (Kvande & Waldum 2002)

Tiltak

En forutsetning for innvendig etterisolering er at de mest kritiske skadene utbedres.

Kalkutslag og saltutfelling skjer grunnet dårlige beslag og jevn tilførsel på vann. Selve skjoldingen har kun estetisk betydning, men dårlige fungerende beslagsløsinger bør utbedres for å unngå videre oppfukning av fasadene.

Frostskafer og forvitrede fuger kan anses som kritiske skader. Enkeltsteiner med store frostskafer bør byttes ut for å hindre oppfukning av murverket. Omfuging bør gjøres på områder hvor fugene har forvitret for å unngå vanninntrengning og oppfukning av tegl.

Tilbakeføring av slemming bør også gjøres for å holde fugene tette og dermed unngå fuktig murverk. Materialer med like egenskaper som den opprinnelige bør benyttes. Organiske, damptette overflatebehandlinger frarådes da det vil hindre veggens uttørkingsmuligheter utover og skape større fare for frostskafer. (NBI 742.302, SINTEF Byggforsk 1992)

5.1.3. Termografering

Termograferingen viser at pilastre og hjørner er kaldere enn resten av vegglivet, noe som kan forklare skadesituasjonen ved at disse områdene er mer utsatt for frostpåkjenning, som igjen øker faren for frostskafer.

5.1.4. Fuktinnhold i tegl

Fuktinnholdet i tegl ble målt til å være 84 % (RF) med slemming, og 81 % (RF) uten. Målingene viser med andre ord ikke er stor forskjell på fuktinnholdet til stein med og uten slemming. Målingene kan tyde på at slemmingen ikke nødvendigvis har en veldig regnbeskyttende effekt for teglstein, men at den heller ikke er damptett og stenger fukt inne.

Imidlertid må det tas hensyn til at dette kun er to målinger, som gjør måleresultatene usikre.

5.2. Testing av telgkvalitet

At testingen ble gjort av steiner fra innvendig side av yttervegg i underetasje, betyr at en vurdering om testresultatene er representative for de væreksponte fasadene, vil være viktig for konklusjonen.

Det *kan* antas at de prøvesteinene har noe dårligere kvalitet enn fasadens steiner, dersom man baserer seg på en teori om at sortering av steinene ble gjort av murerne under muring, hvor hardbrent, dyprød teglstein ble plassert ytterst i fasaden, og lysere steiner lengre inn. Dette er imidlertid en usikker teori å basere vurderingen på.

Dersom man vurderer prøvesteinene til å være representative for teglstein i fasadene, må konklusjonen bli at teglsteinene *ikke* har tilfredsstillende frostmotstandsevne mht. innvendig etterisolering, da 2 av 3 steiner har for lav frostmotstandsevne.

Dersom det er aktuelt med innvendig etterisolering bør kvalitetskontroll av tegl i fasaden for et representativt antall prøvestein (f. eks. 3 tilfeldig utvalgte steiner fra hver av de fire fasadene), for kontroll av om FM-tallet ligger under 0,55 for flertallet prøvestein, og ingen over 0,7.

Imidlertid må skadesituasjonen og fasadens regnbeskyttelse tas med i vurderingen. Dersom registrerte skader utbedres, og slemmingslaget holdes intakt, kan det antas at fasadens fuger holdes tette og at slemmingen er regnbeskyttende nok.

I så fall, vil anbefaling om test av fasadens teglkvalitet i hovedsak gjelde dersom isoleringen skjer med over 50 mm mineralull. For tykkelser under det, kan det antas at fukt- og temperaturendringene i ytre del av veggen ikke bli så stor at skadesituasjonen forverres.

Vurderinger av resultatene for prøvetestet stein er diskutert med Finn E. Madsø.

5.3. WUFI – simuleringer eksisterende situasjon

At fasade nordøst i har høyest vanninnholdet i alle under 10 m, kan skyldes kombinasjonen av slagregnmengden i fasade nordøst er nesten like høy som slagregnmengdene i sydfasadene, mens nordfasadene har betydelig lavere uttørkning.

Tilfellene over 10 m har likevel høyere fuktbelastning, noe som kan forklares ved høyere slagregnmengder jo høyere bygningsdelen er plassert. De to tilfellene hadde relativt likt vanninnhold, men ved finere oppdeling av ytre sjikt, hadde fasade SØ litt høyere vanninnhold enn fasade SV, noe som kan skyldes litt lavere uttørking av fasade SØ.

Det ble registrert forskjeller i vanninnhold ved de ulike roteringer av ytterste stein. Ytterste stein med løperside vendt ut hadde høyere vanninnhold enn stein med koppside vendt ut. Dette gjelder både for vegg og pilaster. Årsaken kan ligge i at vanninnholdet ble lest av som en middelvei over sjikt med to ulike tykkelser. Det at sjiktene med kopper vendt ut beregnes som en middelvei av et *dypere* sjikt kan være årsaken til at verdiene ble lavere, dersom man antar at ytre sjikt uansett ville hatt høyere vanninnhold enn dypere inn i veggen. Om det er reelle forskjeller ved rotering av stein er ikke videre analysert.

Analysene viser ikke stor forskjell i vanninnhold for pilastre i forhold til vegg. Dette skyldes trolig at WUFI beregner tilfellene som en endimensjonal vegg med 3-steins tykkelse, og får ikke med seg de ekstra slagregnpåkjenninger som vil virke på pilastrene da de har hjørner på begge sider og stikker ut fra veggens plan.

Pilastertilfellene har dypere frostdybde enn veggtilfellene. Igjen er pilastrene beregnet som en tykkere vegg, ikke utstikkende pilastre. Dette resulterer i at et ekstra sjikt med tykkelse lik lenden av en stein, fungerer som et isolerende lag, og gjør at veggen blir kaldere.

Analysemetoden viser:

- Ikke at pilastre blir mer slagregnutsatt enn vegg
- At vegg blir kaldere ved økt tykkelse
- At fasade nordøst har høyere vanninnhold enn sydfasadene, til tross for at slagregnmengden fra syd er høyere
 - Som igjen viser at uttørking av fasadene har betydning for fuktbelastningen

I forhold til skadesituasjonen som viser at pilastre og hjørner er mer utsatte for frostskafer enn resten av veggen, får ikke WUFI med seg dette. Det skyldes i programmets endimensjonalitet.

5.4. WUFI – isoleringstilfeller

I forhold til hovedproblemstillingen om skadesituasjonen forverres ved økt isoleringsgrad på veggen, kan ikke resultatene av WUFI-simuleringene benyttes for å få et direkte svar. Analysene av vanninnhold i ytre sjikt av teglsteinen viser at vanninnholdet i sjiktene øker ved økt isolering av veggen, noe som viser en tendens til at økt isolering kan føre til økt fare for frostskafer.

Likevel viser ikke beregningene noen kritisk økning. Det vi kan se er en beskjeden økning, selv når hele teglveggen har minusgrader ved 150 mm mineralull innvendig, stiger vanninnholdet kun med ca. 1 volum - % fra uisolert situasjon.

Grunnen til at simuleringene ikke viser et kritisk vanninnhold i de ytre sjikt av teglsteinen som kunne ha blitt knyttet opp mot teglkvalitet og kritisk andel vann i porer, er at inndelingen av finere sjikt ikke gir opphoping av *innestengt* vann i de ulike sjiktene, som i en reel situasjon der frostskafer oppstår. Ved avskalling av tegl dannes sjikt av is i ytre deler av steinen som gjør at vann blir innestengt og sprenges ut ved frysing til is. WUFI har to separate resultat-diagrammer for vanninnhold og temperaturer, og beregner ikke med faseovergang fra vann til is. Dermed får man ikke direkte svar på *hvor mye* isolering som gir et kritisk vanninnhold i teglsteinen, som igjen kunne ha blitt knyttet opp mot steinens teglkvalitet og evne til å motstå frostavskallinger.

Klimafilere i WUFI

En annen faktor som er viktig å trekke inn ved vanninnholdsanalyse i WUFI er at de utvendige klimafilene som ligger til grunn i programmet ikke er dimensjonerende for slagregn. Programmet beregner slagregnmengder som varierer med vindretning, høyde og himmelretning på fasade, for ulike byer på grunnlag av klimamålinger. Klimamålingene (MDRY-filene) er imidlertid valgt på grunnlag av dimensjonerende fuktbelastning på 6 ulike konstruksjoner. Ingen av disse konstruksjonene har slagregn som dimensjonerende fuktbelastning. Dette kan bety at slagregnmengdene i WUFI viser noe lave verdier enn det som er reelt. (Geving & Torgersen 1997)

Samlet vurdering

Skadesituasjonen viser at fasadene jevnt over er i god stand. Den viser imidlertid at det er variasjoner i teglkvalitet, da det er registrert noen steiner med frostskafer. Skadeanalysen forteller at frostskafer kun er registrert på områder med avskallet slemming. Slemmingen kan derfor antas å beskytte mørtelfuger mot forvitring og oppfukting og dermed redusere faren for frostskafer. På grunnlag av dette vil det være en forutsetning for innvendig isolering at skadeområdene utbedres og slemmingen tilbakeføres for å unngå utvikling av skadene.

Dersom man antar at klatreplanene har vært medvirkende årsak til høy fuktbelastning som igjen har ført til frostskafer, kan det antas at årsaken til skadene er fjernet. Det bør likevel dimensjoneres for at ekstremvær kan oppstå i framtiden.

WUFI-analysen forteller at økt isolering fører til kaldere vegg, og viser tendens til økt vanninnhold i ytre sjikt. Analysen kan ikke gjenskape en reel frostskaferituasjon hvor økt frostpåkjenning vil føre til økt isdannelse i ytre sjikt av teglstein som igjen vil medvirke til frostsprengning og avskalling av stein. Dermed kan ikke kritisk isoleringstykkelse bestemmes ut i fra beregningen.

Ut i fra testingen av teglkvalitet er det vanskelig å si om prøvesteinene er representative for fasaden, men med skadesituasjonen tatt i betraktning kan det konkluderes med følgende: Ved innvendige isoleringstykkelser større enn 50 mm mineralull bør teglstein fra de eksponerte fasadene kvalitetstestes til å ha tilfredsstillende frostmotstandsevne for norske klimaforhold.

Dersom man velger å isolere med større tykkelser uten test av fasadenes teglkvalitet, kan det på grunn av registrerte variasjoner i teglkvalitet i fasadene, antas at det vil medføre øket sannsynlighet for skade. Konsekvensen vil bli økt skadeomfang og økt behov for vedlikehold av fasadene.

Dersom innvendig isolering med mer enn 50 mm mineralull er ønskelig, *kan* det la seg gjøre uten øket sannsynlighet for skade dersom tiltaket kombineres med en utvendig pussløsning som er mer klimabeskyttende enn slemmingen som er der i dag.

Delrapport "Erfaringar med puss som vern ved regnpåkjenning" fra Klima 2000, beskriver en tresjikt pussløsning med (ikke organisk, men dampåpen) silikatmaling i ytterste sjikt som en anbefalt løsning av NBI, basert på testing av regntett puss på murfasader. Pussløsningen skal gi større sikkerhet mot kraftig regnpåkjenning og opprissing av pusslag. (Kvande & Waldum 2002)

6. Konklusjon

Hvordan kan teglveggenes isoleringsevne forbedres uten øket sannsynlighet for skade?

Delt inn i delproblemstillinger

- Hva forteller dagens skadesituasjon?

Dagens skadesituasjon forteller at teglfasadene jevnt over er i god stand, men at frostskafer er registrert på enkelte steiner. Det betyr at det er variasjon i tegl kvalitet på steinene. Ved en eventuell isolering må utbedringstiltak for skadene vurderes.

- Hvilken betydning har tegl kvaliteten?

Teglkvaliteten har betydning ved at veggene blir kaldere ved innvendig isolering og ved at økt isoleringstykkelse gir økte frostpåkjenninger og økt fare for frostskafer. Jo bedre teglkvaliteten er på fasadens steiner desto bedre mulighet har de til å motstå skader under ekstreme klimapåkjenninger med kombinasjon av slagregn og frost. Dersom det antas at steinene som ble testet er representative for fasadene, må konklusjonen bli at innvendig isolering vil føre til økt sannsynlighet for skade.

- Hvilken betydning har fuktbelastning?

Fuktbelastning har størst betydning av klimatiske faktorer for frostskafer i tegl, da skader ikke oppstår med mindre fuktbelastningen er høy nok til å fylle steinens tilgjengelige porer. Det var ikke mulig å finne kritisk fuktinnhold i teglets porer ved hjelp av fuktanalyser i WUFI ved ulike isoleringstilfeller. Dermed kunne ikke en konkret isoleringsløsning eller kritisk *mengde* isolering bestemmes ved analysemetoden. Fasadenes regnbeskyttende lag må i høy grad være med i vurdering av innvendig isolering uten øket sannsynlighet for frostskafer.

Som en total vurdering på hvordan isoleringsevnen til veggene kan forbedres uten øket fare for skade, er det to muligheter:

Dersom innvendig isolering skal gjøres uten *stor* sannsynlighet for forverret skade, bør isoleringstykkelsen reduseres til et minimum, maks 50 mm, som kan antas å ikke påvirke veggens fukt- og temperaturforhold i *stor* grad.

Dersom isoleringstykkelser større enn 50 mm skal vurderes, må fasadesteinenes tegl kvalitet testes og isoleringen bør vurderes sammen med en regnbeskyttende pussløsning, for å unngå stor sannsynlighet for øket skade.

7. Diskusjon

Casestudie

Oppgaven er case-basert, det vil si at testing og analysering er gjort kun av et bygg. Likevel kan prosedyrer og metoder samt erfaringer fra oppgavens resultater overføres til bruk i lignende prosjekter. En kan se på viktigheten av å bli kjent med veggens oppbygging, overflatebehandling, skadesituasjon og tegl kvalitet for å kunne ta stilling til spørsmål om innvendig isolering.

Skadeanalyse

Skaderegistreringen som ble gjort kan antas å ha dekt de verste skadeområdene i tegl fasadene ut i fra visuelle observasjoner og fotografering ved bruk av speilreflekskamera ved gjentatte besøk på bygget. Imidlertid finnes det nye og bedre metoder for registrering av skader. Sånkalte drone-kamera kan fjernstyres og komme både høyt og tett innpå fasadene. En slik analyse vil dermed kunne dekke skadesituasjoner i lignende bygg på en enda bedre måte.

Testing av tegl kvalitet -testmetoder

Det er delte meninger om hvor vidt testing av enkeltsteiner ved et bestemt antall fryse-tine-vekslinger gir et reelt svar på teglsteinens evne til å motstå frostskafer. Steinene går igjennom ekstreme værpåkjenninger, samt at den typen frostskafer som i all hovedsak skjer i en tegl fasade (tykke avskallinger langs veggivets plan) ikke kan gjenskapes ved disse testene.

Testmetoden ved måling av steinenes fukttekniske egenskaper kan vurderes opp mot værpåkjenninger i norsk klima. Fordelen med denne testmetoden for tegl i verneverdige fasader er at steinene kan settes tilbake, da steinene ikke blir ødelagt under testing. I tillegg er testmetoden relativt enkel med begrenset behov for utstyr.

Begge testmetodene som sier noe om teglets evne til å motstå frostskafer. Men kun en testmetode hvor deler av en teglvegg mures opp og utsettes for sannsynlige klimapåkjenninger, kan gjenskape den typen frostskafer som i hovedsak skjer i teglsteinsfasader. Dette er imidlertid en mer omfattende testmetode, og anses ikke som relevant i tilfeller som dette case-studiet.

Selv om teglsteinens egenskaper på testede enkeltsteiner gir en indikator på frostmotstandsevne og kan si noe om hvor vidt man bør isolere innvendig, gir dette ikke heller et klart svar på *hvor mye* en kan isolere. Konklusjoner om smertegrensen for isolering må gjøres i betraktning av fasadens skadesituasjon, klima og regntetthet.

Utvendige fuktkilder og beskyttelse av fasaden/teglsteinen er en meget viktig faktor når det gjelder steinens evne til å motstå skader. Dette krever kunnskap om tegl og overflatebehandlinger samt jevnlig tilstand og utbedring av registrerte skader.

Testing som ble gjort i dette casestudiet

I dette tilfellet ble tre steiner med nesten samme plassering tatt ut til testing. Uansett om prøvesteinene kan antas å være dårligere enn fasadens steiner, er uansett 3 steiner et statistisk lite holdbart utvalg da eldre teglsteinsbygninger ofte består av teglsteiner med varierende kvalitet. Normalt vil testing av 6 - 10 steiner fra hver fasade(eksponert side) være representativt for et bygg.

WUFI 1D

Svakheter i WUFI 1D ved vurdering av fare for frostskafer:

Programmets endimensjonalitet gjør at de mest kritiske skadeområder, som pilastre og hjørner ikke blir beregnet som mer vind-, regn-, og frostutsatt enn vanlig vegg. Dagens skadesituasjon kan derfor ikke gjenskapes i WUFI-simuleringene og gi svar på om denne blir verre ved isolering av veggene innvendig.

Beregningene viser at teorien stemmer om at vanninnhold i ytre sjikt av veggen øker ved isolering og at veggen blir kaldere ved økt isolering.

WUFI-beregningene kan derimot *ikke* svare på hvor vidt isolering av veggen fører til frostskafer i ytterste teglsjikt. Dermed kunne ikke beregningsresultatene brukes direkte for å svare på problemstillingen.

WUFI kan ikke gjenskape en situasjon hvor vann i sjikt parallelt med fasadens veggiv blir innestengt mellom to is-sjikt. Det er først når vann blir stengt inne og fryser til is at volumutvidelsen sprenger av ytterste lag av steinen. (tykke avskallinger).

WUFI kan derimot gi svar på – og er godt egnet til:

- kondenskontroll mot innvendig tegloverflate og hvilken dampsperrøsning som evt. må brukes på innvendig side dersom kondens mot kald teglvegg er et problem
- kritisk RF i mineralulls-sjikt dersom trestendere skal brukes

Med dette kan WUFI gi svar på er hvor mye isolering man kan ha inne før det er fare for kondens i ulike materialsjikt.

8. Videre arbeid

WUFI

Dersom innvendig isolering skal utføres bør innvendig kondenskontroll i WUFI 1D også utføres som grunnlag for valg av isoleringstykkelse, materialvalg og eventuell dampsperreløsning.

Ved kondenskontroll burde "normal fuktbelastning" velges for innvendig klima-forutsetning, noe som vil være konservativt for kontorbygg, men da har man sikret seg mot eventuell framtidig bruksendring av bygget.

Kondenskontroll og vurdering av innvendige fuktproblematikk er imidlertid utenfor denne oppgavens omfang.

9. Litteratur

- Bjørnland, D. (1994). *Murbyen Oslo. I: Fortidsvern 1-1994*, s. 3. Oslo: FNFB.
- Byggstandardiseringsråd, N. (1995). *Tilstandsanalyse for byggverk: Innhold og gjennomføring*. NS 3424. Oslo.
- Engh, P. H. & Gunnarsjaa, A. (1984). *Oslo: En arkitekturguide*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Flyfotodatabasen, B. (1950). *Oslo Bygdøy Alle*. Byantikvaren i Oslo: Fotograf: Widerøes Flyveselskap. Oslo. Tilgjengelig fra: <http://www.byarkivet.oslo.kommune.no/OBA/resultpage.asp?query=bygd%F8y+all%E9+4&table=flyfoto&language=nor&searchtype=simple>.
- Forskrift om tekniske krav til byggverk. (2010). § 14-5. *Minstekrav*. Kap 14 Energi. Tilgjengelig fra: http://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-03-26-489/KAPITTEL_3-5-2?q=energi%20minstekrav*#KAPITTEL_3-5-2.
- Geving, S. & Torgersen, S. E. (1997). Klimadata for fuktberregninger: Referanseår for 12 steder i Norge og klimadata for konstruksjoner mot grunnen. *Prosjektrapport 227*. Oslo: Institutt for bygg- og anleggsteknikk. 35 s.
- Geving, S. & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger. Håndbok 50*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Gule sider. *Flyfoto: Bygdøy Allé 4*. Tilgjengelig fra: <http://kart.gulesider.no/m/n6Xym>.
- Gule sider. *Skråfoto: Bygdøy Allé 4*. Tilgjengelig fra: <http://kart.gulesider.no/m/nRxKe>.
- Kvande, T. & Waldum, A. M. (2002). Erfaringar med puss som vern ved regnpåkjenning - delrapport frå prosjekt 9 i FoU-programmet Klima 2000. *Prosjektrapport 320*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Kvande, T. & Lisø, K. R. (2007). *Klimatilpasning av bygninger*. Klima 2000. Oslo: Sintef Byggforsk
- Madsø, F. E. (1979). *Tegl som byggemateriale. Fremstilling og egenskaper*. Forelesningsnotat ved Institutt for bygningsmateriallære, NTH, Oslo, s. 45. Oslo: Mursenteret.
- Murkatalogen. (2001). *Tegl og teglmurverk: Materialeegenskaper*. Murkatalogen: Anvisning M1. Oslo: Mursenteret.
- Norges byggforskningsinstitutt. (1995). Rehabilitering av gamle bygårder. *Prosjektrapport 181*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt. 111 s.
- Oslo kommune: Byantikvaren. (2002). Istandsetting av murgårdsfasader. *Byantikvarens informasjonsark nr. 6*. Oslo. 4 s.
- Oslo kommune: Byantikvaren. (2013). *Byantikvarens GULE LISTE*. Tilgjengelig fra: www.byantikvaren.oslo.kommune.no.
- Oslo kommune: Eiendoms- og byfornyelsesetaten. (2003). *Kulturhistoriske verdier i murgårdene*. Tilgjengelig fra: <http://www.eiendoms-og->

byfornyelsesetaten.oslo.kommune.no/brannsikring/brannsikring_av_murgarder/om_murgarder/kulturhistoriske_verdier/.

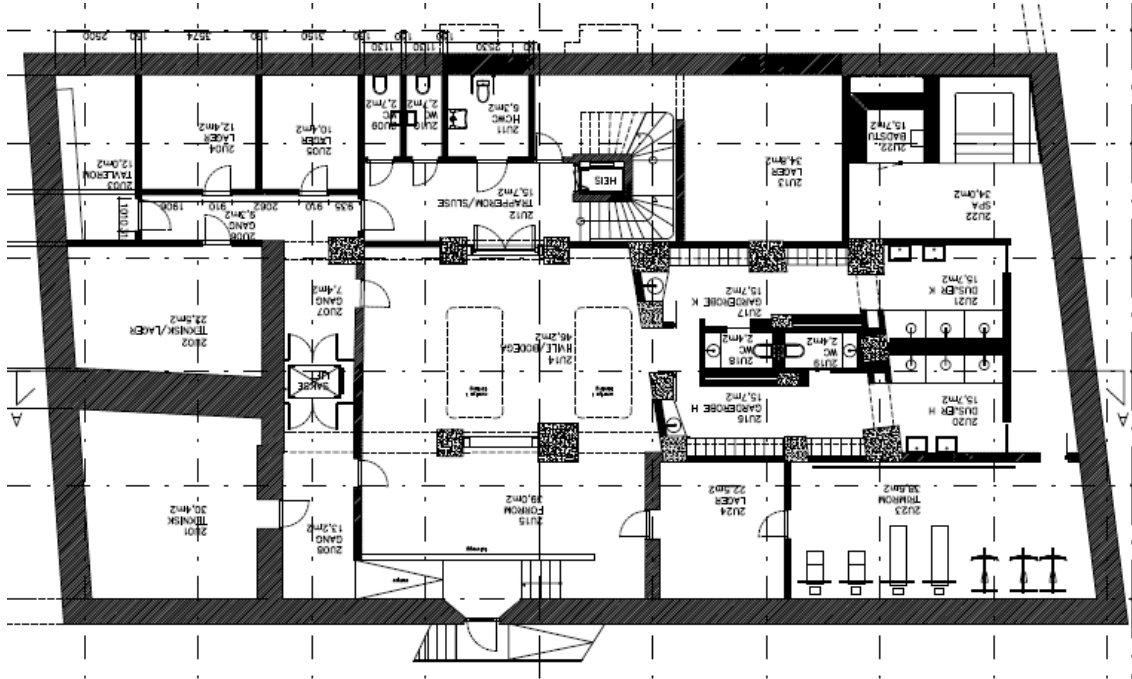
- Sandaker, B. N., Sandvik, M. & Vik, B. (2003). *Materialkunnskap*. Lillestrøm: Byggenæringens Forlag AS.
- SINTEF Byggforsk. (1992). Tilsyn og vedlikehold av utvendige mur-, puss- og betongoverflater. *Byggforskserien: Byggforvaltning 742.302*. Oslo: SINTEF Byggforsk. 8 s.
- SINTEF Byggforsk. (1998). Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946. *Byggforskserien: Byggdetaljer 471.008*. Oslo: Sintef Byggforsk. 8 s.
- SINTEF Byggforsk. (2003). Etterisolering av betong- og murvegger. *Byggforskserien: Byggforvaltning 723.312*. Oslo: SINTEF Byggforsk. 8 s.
- SINTEF Byggforsk. (2005). Fukt i bygninger: Teorigrunnlag. *Byggforskserien: Byggdetaljer 421.132*. Oslo: Sintef Byggforsk. 8 s.
- SINTEF Byggforsk. (2007). Murte teglvegger: Forband, byggemål og modulprosjektering. *Byggforskserien: Byggdetaljer 523.221*. Oslo: SINTEF Byggforsk. 8 s.
- SINTEF Byggforsk. (2010). Bygningsvern: Definisjoner, verneverdier og råd om bygningspleie. *Byggforskserien: Byggforvaltning 612.012* 8s.
- SINTEF Byggforsk. (2013). Eldre yttervegger av mur og betong: Metoder og materialer. *Byggforskserien: Byggforvaltning 723.308*. Oslo: SINTEF Byggforsk. 9 s.
- SINTEF: Arkitektur og byggteknikk. (2004). Fiin gammel aargang: Energisparing i verneverdige hus. Trondheim: SINTEF Bygg og miljø. 64 s.
- Time, B., Kvande, T., Terjesen, K. & Sæter, Ø. (2004). Fukttransport i mineralske bygningsmaterialer – Materialelegenskaper. *Prosjektrapport 369: Sluttrapport fra prosjekt 6 i FoU-programmet «Klima 2000»*. Oslo. 29 s.
- WUFI.no. (2010). *Bruerveiledning for WUFI 1D*. Tilgjengelig fra: <http://www.wufi.no/WUFI1D-4.1-Bruker-v3.1.pdf>.

Vedlegg

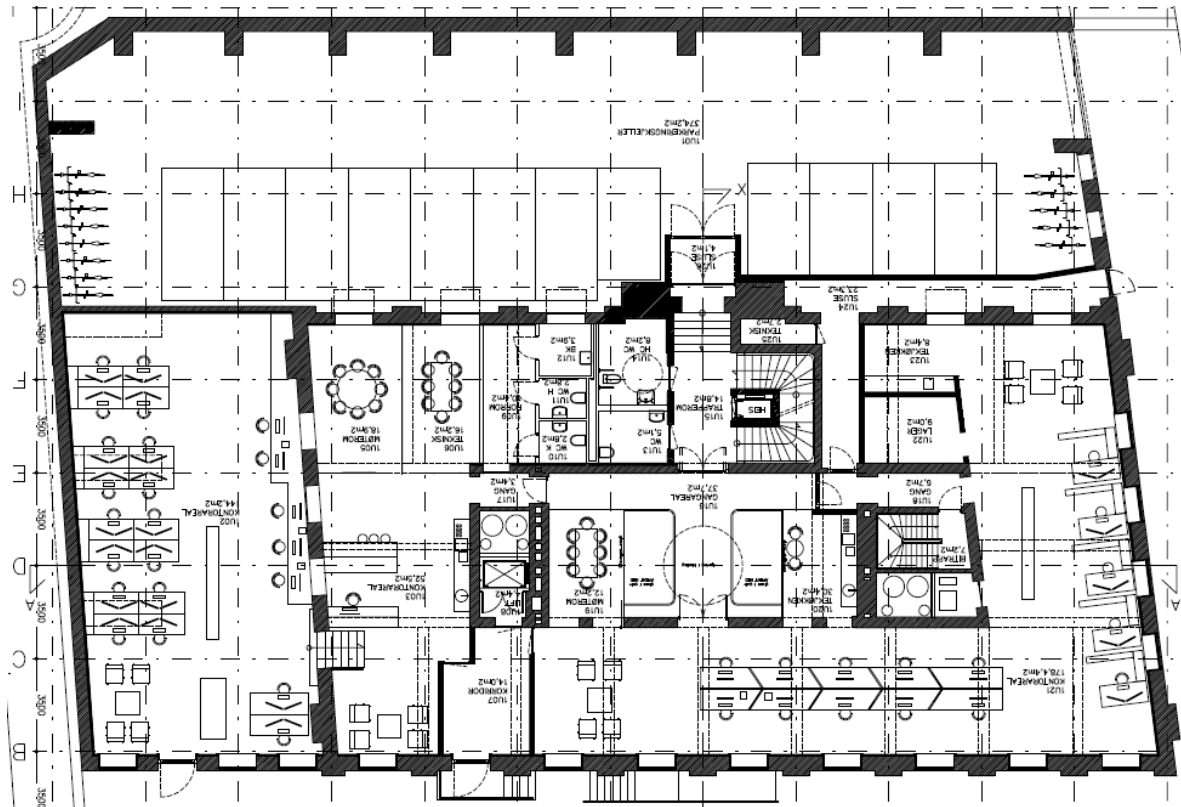
Vedlegg 1	Planer, snitt og fasader.....	1
	Planer.....	1
	Snitt	4
	Fasader	5
Vedlegg 2	Fotodokumentasjon av skader	7
	Foto 01.....	7
	Foto 02.....	7
	Foto 03.....	8
	Foto 04.....	8
	Foto 05.....	9
	Foto 06.....	10
	Foto 07.....	11
	Foto 08.....	11
	Foto 09.....	12
	Foto 10.....	12
Vedlegg 3	Resultater fra kvalitetskontroll av teglstein	13

Vedlegg 1 Planer, snitt og fasader

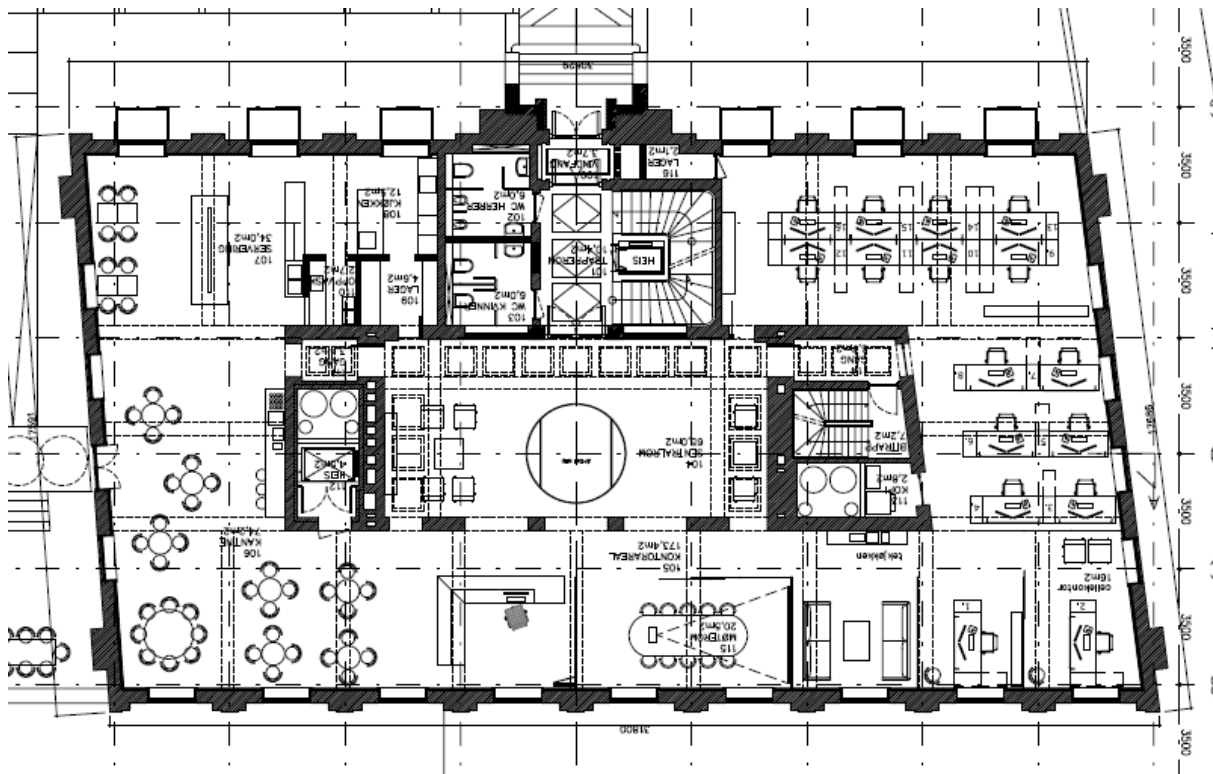
Planer



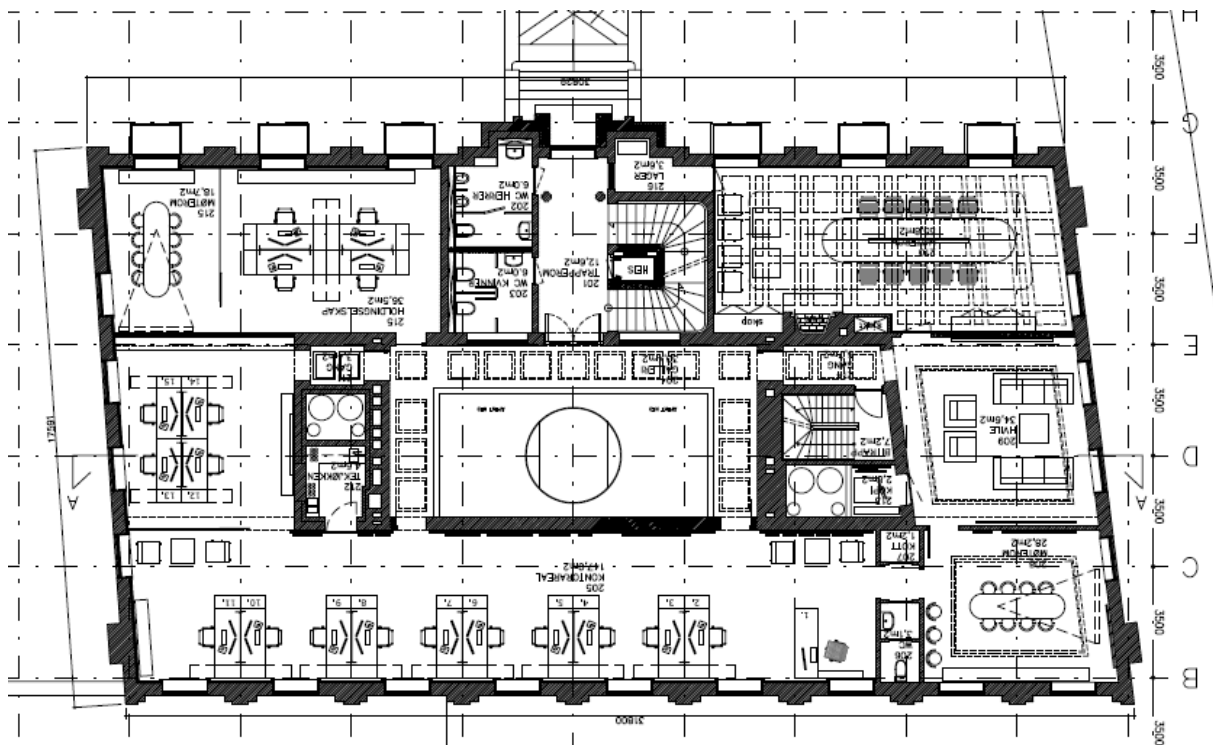
Underetasje U2



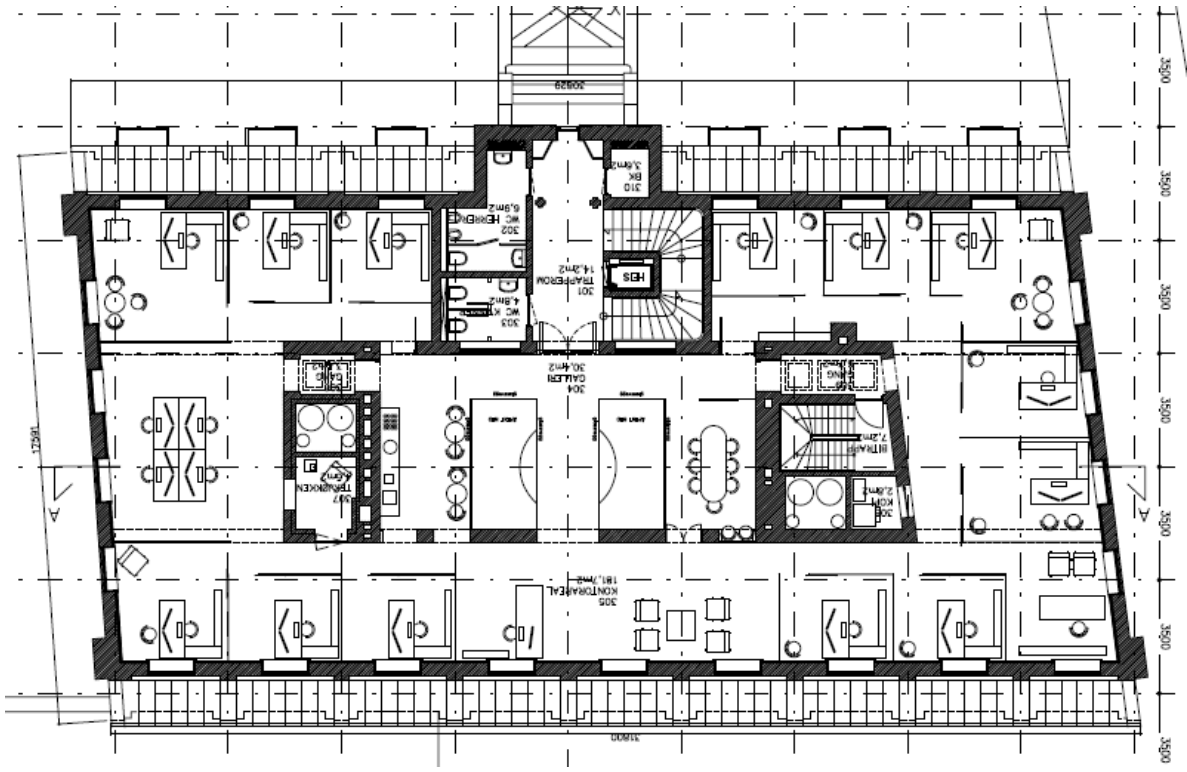
Underetasje U1



1. Etasje



2. Etasje



3. Etasje

Snitt



Snitt A-A



Snitt X-X

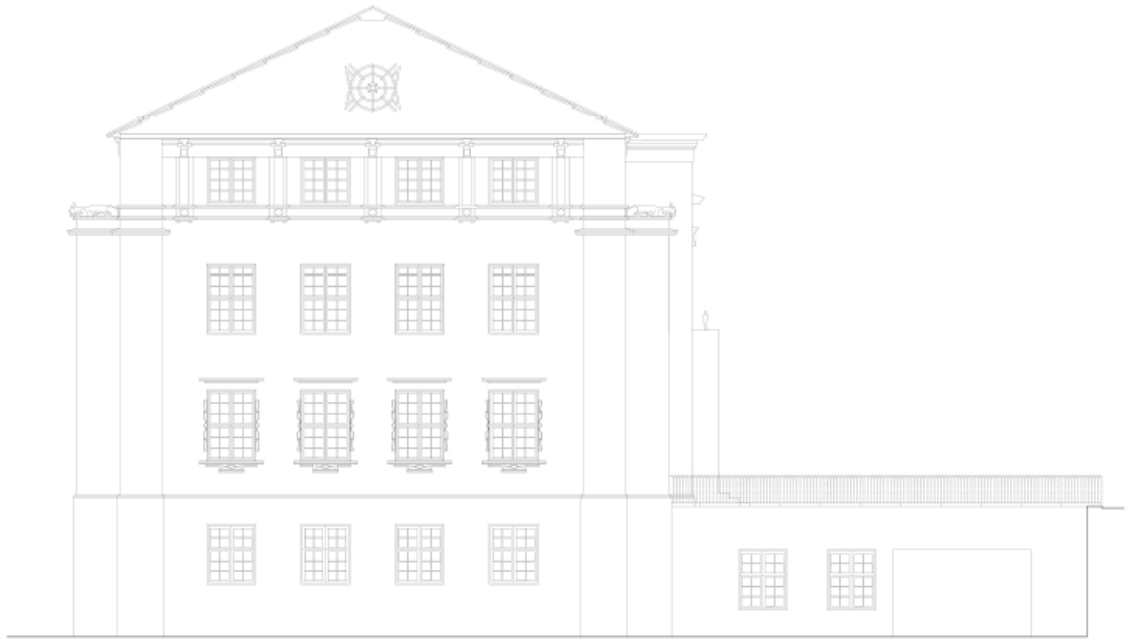
Fasader



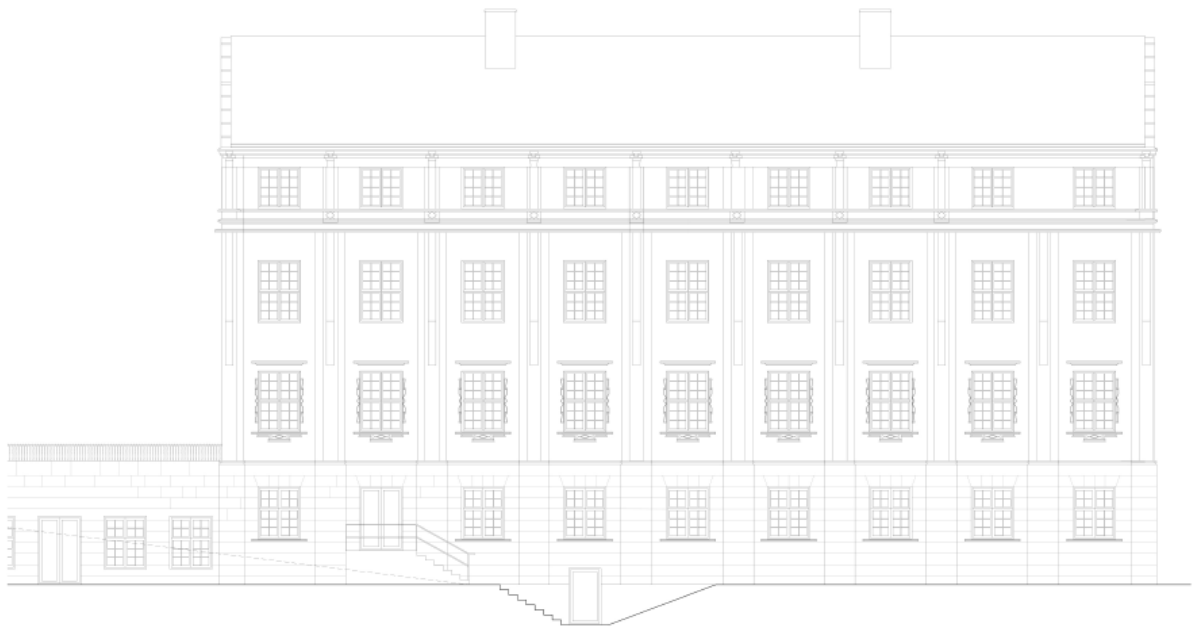
Fasade nordvest



Fasade nordøst



Fasade sydøst



Fasade sydvest

Vedlegg 2 Fotodokumentasjon av skader

Foto 01



Tynne avskallinger/forvitring, fasade nordvest (MWB)

Foto 02



Tykke avskallinger/frostskader, fasade nordvest (MWB)

Foto 03



Forvitring av mørtelfuger, fasade nordvest (MWB)

Foto 04



Forvitring av mørtelfuger, fasade nordvest (MWB)

Foto 05



Avskalling av slemming, fasade sydvest (MWB)

Foto 06



Avskalling av slemming, fasade nordvest (MWB)

Foto 07



Fuktstriper, fasade sydøst (MWB)

Foto 08



Saltutslag, fasade nordvest (MWB)

Foto 09



Kalkutslag, fasade nordøst (MWB)

Foto 10



Rester av klatreplanter, fasade nordøst (MWB)

Vedlegg 3

Resultater fra kvalitetskontroll av teglstein

KVALITETSKONTROLL - TEGLSTEIN / NS 3000

Prøveuttak, sted, dato: Bygdø Allé 4 [1920-21], Oslo 31.10.13. Prøveuttak fra innvendig side av yttervegg i kjeller.

Konstruksjon: 2-stens massiv teglvegg, utv. kosterappet, innv. pusset

Produkt: Massiv teglstein (formstøpt bankestein), B NS 420 x

Prøvested, dato: Multiconsult AS, Skøyen, 07.11.13

Sign.:

Steinprøve	Steinformat			Vannopptak				Volum Fortrengt neddk. V (gram)	Hullutforming		Trykkprøving		
	Lengde l (mm)	Bredde b (mm)	Høyde h (mm)	Tørr P ₀ (gram)	Lufttørr (+20 °C) P ₁ (gram)	1 min. oppsug P ₂ (gram)	24 timer neddk. P ₃ (gram)		+ 5 timer koking P ₄ (gram)	Hull- diameter (min.) (max.) (mm) (mm)	Godstykk. v/ ytre hull (min.) (max.) (mm) (mm)	Trykkflate l _c (mm)	Høyde h _c (mm)
1	231,5	108,0	64,5	2 823,2	2 823,2	2 868,7	3 219,1	3 236,0					
1	231,0	110,0	67,0	2 976,9	2 976,9	3 025,1	3 402,8	3 417,8					
1	226,5	106,5	64,0	3 052,4	3 052,4	3 068,1	3 318,6	3 345,0					
3	Middel	229,7	108,2	65,2	2 950,8	2 950,8	3 313,5	3 332,9	1 540,8				
Steinprøve	Densitet		Kant- skader n 1 - √(l·b·h) (volum-%)	Fuktgenskaper				Trykkfasthet		Kommentarer			
	Brutto P ₀ / (l·b·h) (kg/m ³)	Netto P ₀ / V (kg/m ³)		Likev.fukt W ₀ (P ₁ -P ₀) / P ₀ (vekt-%)	Min.sug S ₀ (P ₂ -P ₀) / (l·b) kg/(m ² ·min)	Vannabs. w (P ₃ -P ₀) / P ₀ (vekt-%)	Poref.tall P _r (P ₃ -P ₀) / (P ₄ -P ₀)	FM-tall s ₀ ^{0,5} · P _r ρ / 1000	Målt f _{ck} F _c / (l _c · b _c) (N/mm ²)		Normalisert f _{ck} δ · f _{ck} (N/mm ²)	Formfaktor δ =	
1	1 751	1 867	6,24	1,82	14,02	0,959	0,693						
1	1 749	1 844	5,15	1,90	14,31	0,966	0,722						
1	1 977	2 041	3,12	0,65	8,72	0,910	0,360						
3	Middel	1 825	1 917	4,84	1,46	12,35	0,945	0,591					