

Fuktopptak i plastisolasjon

Anna Eknes Stagrum

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Tore Kvande, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er forfattet våren 2018 og utgjør besvarelse på faget TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, innen fordypningsretningen bygnings- og materialteknikk for Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Masteroppgaven utgjør 30 studiepoeng, og er utført over en 5-måneders periode.

Arbeidet er en fortsettelse av fordypningsoppgaven som høsten 2017 ble skrevet i forbindelse med faget TBA4521 Bygnings- og materialteknikk, videregående kurs. Oppgaven omhandler fuktinnhold i plastisolasjon mot terreng. Noen resultater fra dette studiet er inkludert i denne masteroppgaven.

Bakgrunnen for oppgaven er å studere fuktopptaket i plastisolasjon ettersom dette har store konsekvenser for dens termiske egenskaper. Studien er basert på ulike forsøk i laboratorium. I løpet av forsøksperioden ble det oppdaget at atmosfæretrykket har stor påvirkning på fuktopptaket i EPS. Dette syntes mine veiledere og jeg var veldig interessant og fokuset på oppgaven ble dermed rettet inn mot dette området.

En presentasjon av viktige funn fra denne masteroppgaven ble forfattet som en artikkel sammen med veiledere Erlend Andenæs og Tore Kvande. Denne ble publisert i Byggeindustrien nr. 8 2018, og er lagt ved som vedlegg G. I tillegg ble det utarbeidet et utkast til en journalartikkel som i praksis er en noe forkortet oversettelse av masteroppgaven, oversatt og redigert av med-veileder Erlend Andenæs. Dette utkastet er lagt ved som vedlegg H.

Jeg ønsker å rette en stor takk til mine veiledere Tore Kvande og Erlend Andenæs for rettleiding og meget god hjelp underveis. I tillegg vil jeg takke Ole Aunrønning og Per Christian Moe fra SINTEF Byggforsk for hjelp til forsøkene i laboratoriet. En takk til Remy Eik-Nikolaisen (SINTEF Byggforsk) for teknisk tegning av illustrasjoner som ble brukt i oppgaven. Jeg vil også takke Sigurd Vaagland for å bidra med fotografering, samt for redigering av forsidebilde.

Sammendrag

Hensikten med denne oppgaven er å finne ut hvor mye fukt som blir absorbert i ekspandert polystyren (EPS) og ekstrudert polystyren (XPS) når de er utsatt for stående vanntrykk og fuktmettet luft. I tillegg er påvirkningen av fuktinnhold på varmekonduktiviteten blitt vurdert. Det skulle også vurderes om standardens prøvemethode er egnet for bestemmelse av fuktopptak. Fuktopptak i plastisolasjon studeres fordi fukt reduserer de termiske egenskapene ved at varmeledningsevnen øker, og dermed er meget viktig å ta hensyn til under prosjektering.

Tre ulike forsøk med EPS og XPS er gjort. I tillegg er et litteraturstudium gjennomført for å avdekke omfanget av relevante studier og for å sammenligne laboratorieforsøkene med andre studier.

Bestemmelse av vannabsorpsjon i isolasjon ved fullstendig nedsenking i vann er gjort i henhold til standard NS-EN 12087:2013. To ulike EPS- og tre ulike XPS-prøvestykker med forskjellig densitet ble i 13 uker utsatt for stående vanntrykk, og veid en gang i uken for å observere utvikling av deres fuktinnhold. Etter 13 uker spente fuktinnholdet i de ulike EPS- og XPS-prøvestykkene over henholdsvis 3,2-6,7 volum% og 0,2-0,3 volum%. En reproduksjon av forsøket som varte i 4 uker, hvor nye EPS-prøvestykker ble utprøvd, resulterte i et fuktinnhold på 2,7-6,1 volum%, som er sammenlignbart med fuktopptaket i den første prøveserien etter samme eksponeringstid.

I tillegg er det gjennomført et forsøk hvor prøvestykker av EPS og XPS er plassert i en lufttett boks med lufttemperatur på omtrent 23°C og med vann i bunnen som forårsaker 100 % relativ luftfuktighet i boksen. Hensikten med dette forsøket er å undersøke fuktopptak i plastisolasjon når det over en lang periode er utsatt for fuktig luft. EPS-prøvestykkenes vekt ble svakt redusert, mens vekten av XPS økte litt etter 13 uker eksponering. Årsaken til dette er uklar.

Varmekonduktiviteten av fuktig plastisolasjon er også studert ved å utføre målinger i henhold til NS-EN 12667:2001 på EPS og XPS som har ligget nedsunket i vann i 13 uker. Den målte varmekonduktivetsverdien til våt isolasjon kontra deklartert verdi økte med 4,7 % (XPS3) til 11,8 % (XPS1).

Ut fra nedsenkingsforsøket ble det oppdaget at EPS med lik trykkfasthet og densitet har veldig stor spredning i vannabsorpsjonsmengde, varierende med over 3 volum%. Årsaken til dette er at produksjonsmetoden medfører variasjoner i porestrukturen fra EPS-plate til EPS-plate og innad i hver enkelt plate. Samme variasjon var ikke å se i XPS.

Det ble oppdaget at graden av fuktopptak i EPS blir sterkt påvirket av atmosfæretrykket. På grunn av dette kan resultater fra målinger gjort på ulike dager vanskelig sammenlignes uten korreksjon for atmosfæretrykk. Dette burde nevnes i standarden.

Det er vanskelig å forutsi fuktoppførselen av den dynamiske prosessen som skjer når plastisolasjon blir brukt på ulike bruksområder. Plastisolasjon vil i mange tilfeller sjeldent være utsatt for stående vanntrykk over lang tid, så standardens (NS-EN 12087:2013) metode er ikke alltid egnet til bestemmelse av forventet fuktopptak. Fuktbelastningen fra nedsenkingsforsøk er imidlertid sammenlignbar med den temporære fuktpåvirkningen som kan skje i praksis.

Abstract

The objective of this thesis is to investigate the moisture accumulation in expanded polystyrene (EPS) and extruded polystyrene (XPS) when exposed to hydraulic water pressure and moist air. The moisture content's effect on thermal conductivity in insulation and the applicability of the standard test method for determining moisture sorption were evaluated. Moisture absorption in plastic insulation was studied because moisture affects the insulation's thermal properties because the thermal conductivity increases. Therefore, it is vital that this is considered during the design phase.

Three different laboratory tests were completed. In addition, a literature study was conducted to reveal the scope of relevant studies and to compare the experiments with other relevant studies.

Determination of water absorption in insulation by total immersion was done according to standard NS-EN 12087:2013. Two different EPS and three different XPS samples with differing densities were immersed in water for 13 weeks and weighed weekly to observe the development of moisture accumulation. After 13 weeks, the moisture content of the various EPS and XPS specimens spanned 3.2-6.7 vol% and 0.2-0.3 vol% respectively. A reproduction of the trial with a 4-week duration and new EPS specimens resulted in a moisture content of 2.7-6.1 vol%. This is comparable to the moisture uptake in the first test series after the same exposure time.

Additionally, an experiment was conducted where EPS and XPS specimens were placed in a sealed box with an approximate temperature of 23°C with water at the bottom, resulting in 100% relative humidity within the box. The purpose of this experiment was to investigate moisture absorption in plastic insulation when exposed to moisture over an extended period of time. The results found that the weight of the EPS-sample decreased slightly, whereas the weight of the XPS-sample increased slightly. The reason for these results is unclear.

The heat conductivity of the moist plastic insulation was studied by performing tests according to NS-EN 12667:2001 on the samples of EPS and XPS that had been immersed for 13 weeks. The results showed that the measured thermal conductivity of the wet insulation varied from the standard value by an increase of 4.7% (XPS3) to 11.8% (XPS1).

The results from the immersion test showed that EPS samples with similar compressive strengths and densities had significant deviations in amount of water absorbed, varying with over 3 vol%. These deviations can be explained by the production method, as it creates variations in the pore structure between the samples and within individual samples. The same type of variation was not apparent in the XPS samples.

The results from these experiments showed the degree of moisture absorption in EPS was significantly affected by the atmospheric pressure. On the basis of these findings, one cannot compare moisture measurements without offsetting for atmospheric pressure. This should be noted in the standard.

It is difficult to predict the moisture performance of the dynamic process that occurs when plastic insulation is used in different fields of utilization. Plastic insulation will in many cases, rarely be exposed to constant water immersion for prolonged periods of time. Therefore, the method described by NS-EN 12087:2013 may not always be suitable for determining the

expected moisture absorption load. However, the moisture load from immersion tests is comparable to the temporary moisture sorption effect that can occur in practice.

Innhold

Forord.....	iii
Sammendrag.....	v
Abstract.....	vii
Innhold.....	1
Figurer	4
Tabeller.....	5
1 Introduksjon.....	7
1.1 Bakgrunn	7
1.1.1 Betydning av fuktinnhold i plastisolasjon	7
1.1.2 Bruksområder	7
1.1.3 Krav og målemetoder	11
1.1.4 Funn fra fordypningsoppgave	11
1.2 Mål og omfang	11
1.3 Begrensninger med oppgaven	12
1.4 Definisjoner	13
2 Teori	15
2.1 Varmeisolering	15
2.2 Ekspandert polystyren	15
2.3 Ekstrudert polystyren	16
2.4 Varmemotstand og varmekonduktivitet i plastisolasjon	17
2.5 Fuktopptak i plastisolasjon.....	21
2.6 Varmekonduktivitet ved fuktopptak.....	21
2.7 Kalkulasjon av varmekonduktivitet til våt isolasjon	23
3 Metode.....	25
3.1 Litteraturstudium	25
3.1.1 Studiets omfang	25
3.1.2 Søkord.....	25
3.1.3 Utvelgelse av artikler for videre studie	26
3.1.4 Sortering av artikler	28
3.2 Laboratorieforsøk og beregninger	29
3.2.1 Prøvestykker	29
3.2.2 Vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking etter NS-EN 12087:2013	30
3.2.3 Lagring i lufttett boks med 100 % RF	32
3.2.4 Bestemmelse av varmemotstand etter NS-EN 12667:2001	32

3.2.5 Kalkulasjon av varmekonduktivitet.....	33
4 Resultater.....	35
4.1 Litteraturstudium	35
4.1.1 Vannabsorpsjon ved nedsenkning etter NS-EN12087:2013	35
4.1.2 Vannabsorpsjon ved nedsenkning etter ASTM C272 og ASTM D2842	35
4.1.3 Andre nedsenkningsforsøk	36
4.1.4 Vannabsorpsjon ved diffusjon og varmekonduktivitetmålinger.....	37
4.1.5 Andre forsøk for å måle fuktopptak	39
4.2 Laboratorieforsøk og beregninger	41
4.2.1 Vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking etter NS-EN 12087:2013	41
4.2.2 Lagring i lufttett boks med 100 % RF	43
4.2.3 Bestemmelse av varmemotstand etter NS-EN 12667:2001	44
4.2.4 Kalkulasjon av varmekonduktivitet.....	45
5 Diskusjon.....	47
5.1 Vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking etter NS-EN 12087:2013	47
5.1.1 Feilkilder under forsøket	47
5.1.2 Er fuktopptaket densitetsavhengig?.....	48
5.1.3 Hvorfor reduseres vekten av EPS-prøvene i løpet av forsøksperioden?	50
5.2 Lagring i lufttett boks med 100 % RF	56
5.3 Varmemotstand etter NS-EN 12667:2001	57
5.4 Påvirkning av fuktopptak på varmekonduktiviteten	57
5.5 Forsøkernes relevans i forhold til praksis og begrensninger med dagens forsøksmetoder	58
5.6 Amerikansk vs. europeisk standard.....	61
6 Konklusjon	63
7 Fremtidig arbeid	65
7.1 Utvide omfang	65
7.2 Supplerende forsøk.....	65
7.3 Varmetapsvurdering	65
7.4 Forbedring av prøvemeter	66
8 Referanseliste	67
Vedlegg A: Søkeord og antall treff	75
Vedlegg B: Målt fuktopptak i EPS og XPS ved nedsenking, forsøk 1	77
Vedlegg C: Målt fuktopptak i EPS ved nedsenking, forsøk 2 (reproduksjon).....	80
Vedlegg D: Målt vekt av EPS og XPS etter fuktig luft-forsøk	82

Vedlegg E: Måling av varmemotstand til EPS, rapport fra SINTEF Byggforsk	85
Vedlegg F: Måling av varmemotstand til XPS, rapport fra SINTEF Byggforsk	86
Vedlegg G: Artikkel utgitt i Byggeindustrien	87
Vedlegg H: Utkast til Journalartikkel.....	88

Figurer

Figur 1: Prinsippskisse av typiske bruksområder til plastisolasjon i bygninger.	8
Figur 2: Fiskemerde med EPS-plater montert inni betongveggen (Foto: Terje Eknes).....	9
Figur 3: Varmeisolering av Betna bru (Foto: Tore Kvande).....	9
Figur 4: Nærbilde av snittflate til EPS (Foto: Sigurd Vaagland)	16
Figur 5: Nærbilde av snittflate til XPS (Foto: Sigurd Vaagland).....	17
Figur 6: Sammenheng mellom densitet og varmekonduktivitet for ulike isolasjonsmaterialer (Domínguez-Muñoz et al., 2010, s. 2161).....	20
Figur 7: Oppsett av forsøk (Illustrasjon: SFI Klima 2050/SINTEF Byggforsk).....	31
Figur 8: Plateapparat med to varmestromsmålere (Illustrasjon: SINTEF Byggforsk).....	33
Figur 9: Sammenheng mellom varmekonduktivitet og fuktinnhold i EPS-isolasjon (Ojanen og Kokko, 1997).....	38
Figur 10: Fuktopptak i EPS1 kombinert med atmosfæretrykk.	41
Figur 11: Fuktopptak i XPS1 kombinert med atmosfæretrykk. Merk skalering av høyre vertikallakse.....	42
Figur 12: Fuktopptak i EPS2.2 (type 2, forsøk 2) kombinert med atmosfæretrykk.....	43
Figur 13: Vektutvikling av EPS2 ved eksponering for fuktig luft.	44
Figur 14: Vektutvikling av XPS3 ved eksponering for fuktig luft.....	44
Figur 15: Sammenheng mellom fuktopptak og atmosfæretrykk. (Bomberg, 1983, s. 237).....	53
Figur 16: Sammenheng mellom fuktopptak og nedsenkingsdybde (Bomberg, 1983, s. 239) .	53
Figur 17: Vannopptak i volum% under normalt trykk og under 60 kPa (Ossa og Romo, 2012, s. 135).....	54
Figur 18: Vanninnhold i EPS under normalt trykk (Ossa og Romo, 2012, s. 135).	55
Figur 19: Vanninnhold i EPS under høyt omsluttende trykk på 600 hPa (Ossa og Romo, 2012, s. 135).....	55
Figur 20: Fuktinnhold i forhold til eksponeringstid og plassering. Verdier basert på studier undersøkt i Stagrum (2017).....	59

Tabeller

Tabell 1: Oversikt over materialegenskaper til EPS og XPS (Byggforskserien 573.344).	15
Tabell 2: Fuktkorreksjoner for EPS og XPS ut fra bruksområde. (NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010, tabell NA.1)	23
Tabell 3: Eksempel på ett søk.....	27
Tabell 4: Oversikt over isolasjonens karakteristikk	29
Tabell 5: Oversikt over tørr masse og utregnet tørr densitet til de ulike typene isolasjon brukt i nedsenkingsforsøk 1 og nedsenkingsforsøk 2 (reproduksjon).	30
Tabell 6: Totalt vannopptak i EPS og XPS i volum% etter 13 uker.	41
Tabell 7: Totalt vannopptak i EPS i volum% etter 28 dager.....	42
Tabell 8: Total vektforskjell i gram etter 13 uker.	43
Tabell 9: Målt tykkelse, varmemotstand og varmekonduktivitet av våte prøvestykker av EPS og XPS.....	45
Tabell 10: Beregnet varmekonduktivitet til tørr og våt isolasjon.....	45
Tabell 11: Fukttinnhold i EPS (volum%), basert på studier undersøkt i Stagrum (2017).....	59
Tabell 12: Fukttinnhold i XPS (volum%), basert på studier undersøkt i Stagrum (2017).	59

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

1.1.1 Betydning av fuktinnhold i plastisolasjon

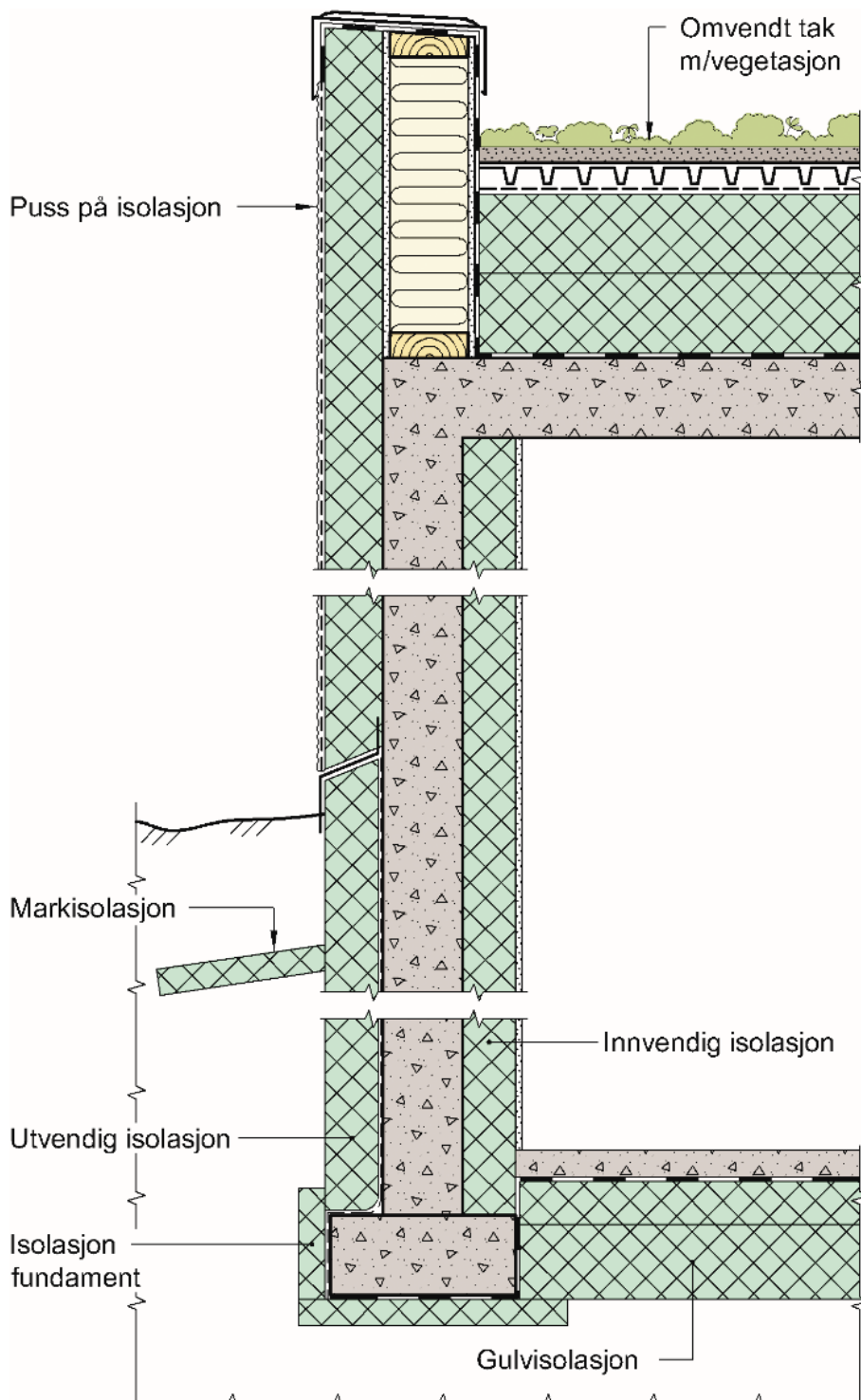
I løpet av de siste årene har fokuset på energieffektive bygninger økt. Dette er naturlig på grunn av den store delen av det totale energiforbruket bygninger er ansvarlig for, som er 40 % innad i den Europeiske Union (European commission, 2017). Derfor er målinger og beregninger av de termiske egenskapene i forbindelse med materialenes bygningsfysiske parametere av stor betydning for dimensjonering av bygninger (Lakatos og Kalmár, 2014). Det er òg blitt strengere krav til varmetap gjennom konstruksjonen (Novakovic et.al, 2017).

For at et bygg skal fungere optimalt med tanke på energibruk og bidra til minst mulig klimautslipp, er det viktig med god teknisk prosjektering og korrekt utførelse. For å øke varmemotstanden til konstruksjonen kreves bruk av isolasjon i de ulike bygningsdelene, samt redusere kuldebroer og infiltrasjonstap (Novakovic et.al, 2017). Her blir isolasjonen en kritisk komponent ettersom den i tillegg til å minimere varme- og kjølebehov, skal opprettholde termisk effektivitet til tross for eksponering for vann, fryse-tine sykluser og vanndamptrykk (Epstein og Putnam, 1977). Fukt er i denne sammenheng en sentral faktor som må vurderes under prosjektering og når materialvalg skal gjøres. Dette kommer av at fukt er en av de vanligste årsakene til degradering av bygninger (Lakatos, 2016). Det antas at hele 3/4 av alle byggskader skyldes fukt eller konsekvenser av fukt. Hvis nok fukt akkumuleres og ikke får mulighet til å tørke ut, vil det dannes et godt miljø for sopp, råte og andre fukt-relaterte problemer (Byggforskserien 421.132).

Fukt kommer inn i bygningsskallet på ulike måter; i form av vanndamp, som vann i væskeform eller i fastform som is. Ettersom luft alltid inneholder vanndamp, vil luftbevegelser i isolasjonsmaterialet og hulrommene overføre vann. Det er viktig å anvende dampsperre på innvendig side av konstruksjonen for å motvirke fukttransport fra innsiden og utover. På utvendig side, er isolasjonslaget beskyttet av taktekning eller utvendig kledning. En forståelse av vanndamptransport er vesentlig for å forhindre ukontrollert kondens (Mattila, 2017). Isolasjonsmaterialet i bygninger kan bli eksponert for vann i væskeform som regn og snø, eller fra vann i bakken. I de fleste anvendelser i vegg mot terreng hvor isolasjonen er i direkte kontakt med vann, er fuktopptak i væskeform dominant. I andre bruksområder som i tak, vil fuktopptaket være en kombinasjon av vanndamp og vann i væskeform (Cai et al., 2017b).

1.1.2 Bruksområder

I bygningsdeler som i stor grad er eksponert for fukt og oppsamling av vann, er det nødvendig å bruke isolasjon som ekspandert og ekstrudert polystyren ettersom det i mindre grad vil ta opp vann. Ekstrudert polystyren (XPS) har en lukket porestruktur som vanskelig blir fylt opp med vann, og fungerer dermed meget bra i fuktige eksponeringssituasjoner. Ekspandert polystyren (EPS) har bedre evne til å ta opp vann på grunn av den delvis åpne porestrukturen (Lakatos, 2016). Figur 1 viser en prinsippskisse av hvor og på hvilken måte EPS og XPS kan bli brukt i et bygg. Bygningstekniske detaljer er utelatt fra skissen.



Figur 1: Prinsippkisse av typiske bruksområder til plastisolasjon i bygninger.
(Illustrasjon: SFI Klima 2050/SINTEF Byggforsk)

Som Figur 1 viser er plastisolasjon vanlig i omvendte tak, i vegg mot terreng, som markisolasjon, gulvisolasjon og i fasadesystem med puss på isolasjon. I tillegg kan plastisolasjon brukes som frostisolasjon i veier for å motvirke telehiv, til frostisolering av vannkummer, samt som rørisolasjon. Andre bruksområder er blant annet som flyteelement i flytebrygger eller i ny teknologi for fiskemerder. Figur 2 viser hvordan EPS-plater er montert inni fiskemerdens betongvegg. Det er i denne sammenheng viktig å ta hensyn til vektøkningen av EPS på grunn av dens økte vannabsorpsjon under høyt vanntrykk (Ossa og

Romo, 2012). Figur 3 viser hvordan EPS er blitt brukt i Betna bru for stabilisering og isolering av terreng ved brohodet.



Figur 2: Fiskemerde med EPS-plater montert inni betongveggen (Foto: Terje Eknes)



Figur 3: Varmeisolering av Betna bru (Foto: Tore Kvande).

Omvendt tak er en type kompakt tak, der isolasjonen er plassert over den fuktsikre takmembranen. Slik plassering av varmeisolasjonen beskytter takmembranen mot større mekaniske påkjenninger enn det som nødvendig tilsyn og vedlikehold utsetter den for. Omvendt tak krever bruk av isolasjon med lavt fuktopptak (XPS) (Byggforskserien 525.207). I norsk klima vil takkonstruksjonen bli utsatt for store mengder vann som medfører at det ikke er til å unngå at isolasjonen blir våt. Ved bruk av en type taktekning hvor fukten kan tørke ut i tørre perioder, vil fukten ikke utgjøre store problemer. Derimot for taktekning som forblir fuktige for det meste av tiden, slik som grønne tak, vil fukt kunne akkumuleres i

isolasjonslaget i ulikt tempo avhengig av uteklimaet, innnetemperatur og materialeegenskaper (Epstein og Putnam, 1977).

Som Figur 1 viser, vil det nederste laget i et grønt tak bestå av en takmembran over betongdekket, under et lag av XPS. Platene av XPS blir dekket av et vanntettende sjikt som normalt består av ett-eller tolags asfalttakbelegg eller 1,5-2,0 mm tykk takfolie (Byggforskserien 544.823). Dette takbelegget ivaretar den vanntettende funksjonen og må ha tilstrekkelig motstand mot gjennomgroing av røtter. Over takbelegget er det vanlig med et beskyttelsessjikt og rotsperre, før et drenerende eller fuktbevarende sjikt, ofte bestående av spesielle dreneringsmatter eller knasteplaster med filt. Hensikten med dette laget er å lede bort overflødig vann slik at ikke for mye vann blir stående i taket, samt å holde tilbake vann som senere kan tas opp i plantene. Øverst legges vekstlag og ønsket vegetasjon.

Figur 2 viser hvordan plastisolasjon kan bli brukt i yttervegg over terreng. Den viser et system hvor både utvendig og innvendig varmeisolasjon er av EPS. Hvis ytterkledningen i fasadesystemet er puss på isolasjon, er denne isolasjonen som regel plastisolasjon. Det egner seg også som utvendig varmeisolering av mur- og betongvegger (Byggforskserien 542.303).

Plastisolasjon er vanlig å bruke i vegg mot terreng. Veggene består vanligvis av betong, mur eller lettklinkerblokker. Minst halvparten av all isolering av betongvegger mot terreng bør fortrinnsvis plasseres på utvendig side. I tillegg er det nødvendig med et vannavvisende og kapillærbrytende sjikt, som kan plasseres mellom vegg og isolasjonen som vist i Figur 1. Det skal forhindre at vann renner inn og suges opp av vegg, men det etterlater isolasjonen på fuktig side av det kapillærbrytende sjiktet. For å få raskere uttørking av betongvegger bør varmeisolasjonen plasseres direkte på betongveggen og med det vannavvisende, kapillærbrytende sjiktet montert utenpå. Da får vanddampen som diffunderer fra betongen mulighet til å tørke både innover og utover, gjennom isolasjonen, og kondensere på kald side. Drenerende masser eller spesifikke drensplater legges utenpå vegg for å hindre vanntrykk og for at fukt kan dreneres bort fra vegg. (Byggforskserien 523.111, Byggforskserien 523.127 og Byggforskserien 523.133)

Det må isoleres under gulv som vist i Figur 1. Hensikten er å hindre at bakken under bygningen fryser, samt å minimere kuldeoverføring fra bakken og minimere varmetap innenfra (Pakkala og Lahdensivu, 2014). Når man bygger golv på grunnen, blir en ringmur støpt oppå et fundament eller såle. Denne løsningen er ikke vist i Figur 1. Rundt ringmuren kreves det frostsikring i form av varmeisolasjon for å hindre frostnedtrengning og for å redusere kuldebrotap (Byggforskserien 521.111). Som ringmursisolasjon er det vanlig å bruke plastisolasjon, både innvendig og utvendig (Byggforskserien 521.112).

Bruk av markisolasjon rundt kjellervegg er en forutsetning i klima med frostmengde over 40 000 h°C, men anbefales alltid i norsk klima av hensyn til telefare og varmetap. Figur 1 viser isolasjon både under fundament og som markisolasjon plassert i bakken utenfor kjellervegg. Bruk av begge deler er vanligvis unødvendig, men er inkludert i figuren for å illustrere mulige bruksområder. Markisolasjon kan plasseres under en eventuell ringmur, hvis fundamentet ikke er varmeisolert under. XPS er anbefalt å bruke her, ettersom det har tilstrekkelig trykkfasthet og beholder mye av varmemotstandsegenskapene ved gjeldende fuktbelastninger. (Byggforskserien 521.111)

1.1.3 Krav og målemetoder

Det finnes mange krav om egenskaper og prøvingsmetoder til isolasjonsmaterialer beskrevet i norske standarder. For EPS er NS-EN 14309:2015 gjeldende. XPS må produseres etter krav i henhold til standard NS-EN 13164:2012+A1:2015. Prøvemålinger på fabrikk er i denne sammenheng viktig for å sertifisere at isolasjonen som produseres er innenfor disse kravene, og at deklart verdi er korrekt. Verdier som produsenter vanligvis oppgir er deklart trykkfasthet, deklart varmekonduktivitet, brannklasse, maks kontinuerlig temperatur og smeltepunkt, samt antall volumprosent fuktinnhold når nedsunken i vann og ved diffusjon.

Hvordan ulike materialer holder på fuktighet avhenger av tid, temperatur og materialeegenskaper. Hvis fukt kommer inn i den termiske isolasjonen i bygningen, vil det forårsake ødeleggelse i bygningsskallet og påvirke isolasjonsevnen ved å øke den termiske konduktiviteten (Lakatos og Kalmár, 2014). Økt konduktivitet resulterer i at materialene får redusert varmemotstand, og dermed blir bygningens termiske virkningsgrad redusert (Lakatos, 2012). Mange vitenskapelige artikler, studier og rapporter beviser dette, i noen tilfeller er det rapportert at varmekonduktiviteten etter fuktopptak har økt hele fem ganger (Mar et al., 2008). På grunn av dette må den deklarte varmekonduktiviteten til isolasjonen omregnes til dimensjonerende verdi ved hjelp av ulike korreksjonsfaktorer. En beregningsmetode finnes i NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010, som sier at varmekonduktiviteten må omregnes på grunn av temperatur, fuktinnhold, aldring og konveksjon. Nasjonalt tillegg viser fuktkorreksjoner etter bruksområde, og tar hensyn til hvilken grad bygningsdelen er utsatt for fukt.

Det finnes mange standardiserte forsøk for å måle påvirkningen fukt har på isolasjon. Disse er blant annet bestemmelse av vannabsorpsjon ved diffusjon etter NS-EN 12088:2013, ved vandampgjennomgang etter NS-EN 12086:2013 og ved nedsenkning etter NS-EN 12087:2013.

1.1.4 Funn fra fordypningsoppgave

Høsten 2017 skrev Stagrum (2017) en fordypningsoppgave i emnet TBA4521 Bygnings- og materialteknikk ved NTNU. Oppgaven omhandlet et litteraturstudium av forsøk gjort på plastisolasjon mot terreng. Fuktinnholdsverdier ble samlet inn og sammenlignet i forhold til eksponeringstid, plassering og densitet. Ut ifra de ulike studiene kunne det virke som lenger eksponeringstid ikke nødvendigvis fører til økt fuktinnhold. Det var ikke mulig å fremlegge en klar konklusjon for å avgjøre om XPS generelt har høyere eller lavere fuktinnhold enn EPS etter lang tids eksponering.

Fuktinnholdsverdiene til plastisolasjonen som hadde vært i bakken ble i fordypningsoppgaven sammenlignet med verdier for fuktinnhold oppgitt i NS-EN ISO 10456:2007 for å avdekke om standardens verdier er relevante sammenlignet med typiske bruksområder for plastisolasjon. På bakgrunn av gjennomgangen ble det konkludert med at EPS og XPS i mange tilfeller har høyere fuktinnhold enn det standarden tilsier. Dette betyr at standarden ikke er representativ med tanke på alle bruksområder, og burde vurderes på nytt.

1.2 Mål og omfang

Oppgaven går ut på å studere fuktopptaket til ekspandert (EPS) og ekstrudert (XPS) polystyren med mål om å finne svar på følgende forskningsspørsmål:

- Hvor mye vann vil EPS og XPS absorbere når det i en langvarig periode er utsatt for miljøer med fuktmettet luft eller stående vanntrykk?

- Hvordan påvirkes varmekonduktiviteten til isolasjonen av dens fuktinnhold?
- Hvor egnet er standardens prøvemethode for bestemmelse av fuktopptak?

Fuktopptaket til EPS og XPS med ulik trykkfasthet og densitet er undersøkt i laboratorium ved fullstendig nedsenking i henhold til NS-EN 12087:2013 og ved eksponering for luft med 100% relativ fuktighet. Prøvingen er gjort over en 13-ukersperiode for å finne tilnærmet langtidseffekt av fukteksponering. I tillegg er varmekonduktivitet til plastisolasjonen som har vært fullstendig nedsunken i vann i 13 uker bestemt etter NS-EN 12667:2001.

Et litteraturstudium er gjennomført for å avdekke omfanget av relevante studier («state of the art») og for å sammenligne laboratorieforsøkene med andre studier. I tillegg er det søkt i litteratur for å avdekke i hvor stor grad prøvemethoder for bestemmelse av fuktinnhold gir relevante verdier for praktiske situasjoner.

1.3 Begrensninger med oppgaven

Denne oppgaven utelater påvirkningen frost har på plastisolasjonen, selv om dette er en viktig del av dimensjoneringen for termisk isolasjon. Is leder varme fire ganger så bra som vann, som igjen leder varme omtrent 20 ganger så bra som luft (Krzewinski og Tart Jr., 1985). Det betyr at is både har stor påvirkning på varmemotstanden til termisk isolasjon og forringer de mekaniske egenskapene.

Fryse-tine sykkluser vil betydelig øke vannabsorpsjonen i plastisolasjon. Når vann i porestrukturen i isolasjonen fryser og ekspanderer, kan det ødelegge porestrukturen som gir økt mulighet for vannabsorpsjon på grunn av gravitasjons- og kapillærkrefter, samt vandampdiffusjon. Effekten på ekstrudert polystyren er relativt begrenset grunnet dens lave vannopptak. Ekspandert polystyren blir derimot mer påvirket på grunn av den delvis åpne porestrukturen som medfører et høyere fuktopptak (Epstein og Putnam, 1977). Utover dette avsnittet vil ikke denne oppgaven ta for seg frostpåvirkninger.

Hvilken type gass som brukes som ekspansjonsmiddel i XPS har påvirkning på dens termiske egenskaper. Før ble det benyttet KFK-gasser, men på grunn av skaden de gjorde på ozonlaget er de byttet ut med andre gasser som blant annet CO₂ eller hydrofluorkarbondgasser (HFK-gasser). Utfasingen av KFK-gasser har pågått i løpet av 1980-2010. Det er gjort flere studier på hvordan de ulike gassene påvirker varmekonduktiviteten til XPS, samt langtidsvirkningene. Hva de ulike gassene har å si for egenskapene til XPS er ikke blitt behandlet ytterligere i denne oppgaven. Ettersom utfasingen av ekspansjonsmiddel har skjedd såpass nylig, er sannsynligvis en del av den studerte litteraturen basert på forsøk med XPS som inneholder KFK-gasser. Type ekspansjonsmiddel er ikke tatt hensyn til ved sammenligning.

Uttørkingsegenskapene til plastisolasjon er en viktig faktor ved fuktrelaterte situasjoner, og er ikke studert i denne oppgaven. Prøvestykkene ble ikke tørket etter vannabsorpsjonsforsøket ble avsluttet, noe som implisert hvor fort de ulike prøvestykkene tørker, samt om tørkingen fører til massetap, endrede dimensjoner, endring i porestruktur eller krymping i tykkelse.

Påvirkningen av produksjonsprosessen for isolasjonens termiske egenskaper er overfladisk nevnt, men ikke konkret når det gjelder hvilke faktorer under produksjon som fører til akkurat et spesielt resultat. Overflatebehandlingen av XPS, som innebærer hva den eventuelt tynne filmen på overflaten av XPS kan bestå av, er ikke ytterligere diskutert.

Hva som er realistisk fuktpåkjenning i en brukssituasjon er nevnt, men ikke videre undersøkt. Fuktopptak fra laboratorium i forhold til fuktopptak i praksis er så vidt diskutert, men en grundig studie er ikke blitt gjort. Det finnes mange forsøk som omhandler vannabsorpsjon i isolasjon, som blant annet «soil immersion test». Dette er et forsøk hvor isolasjonsprøvestykker blir lagt i fuktig jord. Dette forsøket er ikke like utbredt som nedsenking i vann-prøvemeter, men det later til å gi en bedre prognose for det fuktopptaket isolasjon som skal ligge i bakken vil få (Cai et al., 2017a).

1.4 Definisjoner

Termisk isolasjon:

Også kalt varmeisolasjon. Isolasjonen er brukt i bygg og andre situasjoner hvor konstruksjonen behøver høyere termisk motstand mot kulde eller varme. Begrepet inkluderer mange ulike typer isolasjon som passer til forskjellige bruksområder. (Byggforskserien 573.344). Når begrepet «isolasjon» er benyttet senere i denne rapporten, er det «termisk plastisolasjon» det dreier seg om.

Ekspandert polystyren (EPS):

Plastisolasjon som produseres av polystyren fra råolje. Produksjonsprosessen hvor polystyrengranulatene ekspanderes og «sveises» sammen gjør materialet porøst og gir en delvis åpen porestruktur. EPS har høy fuktmotstand og mister i liten grad varmemotstanden når materialet blir fuktig. EPS er dermed vanlig å bruke i fuktutsatte situasjoner. (Byggforskserien 573.344)

Ekstrudert polystyren (XPS):

Plastisolasjon som produseres ved at smeltet polystyren tilsettes en ekspansjonsgass. Produksjonsprosessen gir XPS en lukket porestruktur som gjør materialet meget fuktmotstandsdyktig. (Byggforskserien 573.344)

Varmekapasitet:

Energimengden som tas opp eller avgis ved temperaturendring. (Byggforskserien 573.344)

U-verdi (W/m²K):

Hvor mye varme per tidsenhet, målt i Watt (W), som kan strømme gjennom et areal på 1 m² ved en konstant temperaturforskjell på 1 K mellom omgivelsene på varm og kald side av konstruksjonen. (Byggforskserien 471.010)

Varmemotstand, R (m²K/W):

Temperaturforskjell dividert med varmestromtetthet ved stasjonære forhold. Uttrykk for varmeisolasjonsevnen til et materialsjikt. (Novakovic et.al, 2017)

Varmekonduktivitet, λ (W/mK):

Også kalt termisk konduktivitet eller varmeledningsevne. Varmestromtetthet i materialet ved en temperaturgradient på 1 K/m. (Novakovic et.al, 2017)

Deklarerte verdier:

Verdier fastlagt ved definerte betingelser med hensyn til temperatur og fuktnivå. Deklarert varmemotstand (R_D) og deklareret konduktivitet (λ_D) blir oppgitt av produsenten. (Novakovic et.al, 2017)

Dimensjonerende verdier:

Deklarerte verdier omregnet til dimensjonerende verdi (R_d) og (λ_d) for å ta hensyn til avvik i bygningskonstruksjonen og bruksområde. (Novakovic et.al, 2017)

2 Teori

2.1 Varmeisolering

Termisk isolasjon er et materiale som forsinket varmetransporten gjennom en bygningsdel grunnet sin høye varmemotstand (Al-Homoud, 2005). I Norge er det nødvendig med varmeisolering for å oppnå påkrevde energibesparelser i bygningen. Det finnes mange typer isolasjon med forskjellige egenskaper og for ulike bruksområder. Mest vanlig som varmeisolasjon i vegg og tak er mineralull framstilt av stein eller glass. I tillegg finnes blant annet lettklinker, skumglass og celluloseisolasjon. Det jobbes kontinuerlig med å fremstille nye, mer energieffektive isolasjonsmaterialer. Ett eksempel er vakuumisolasjonspaneler som er et porøst materiale med en lufttett ytterhud, hvor mesteparten av luften er pumpet ut slik at varmeledning via luftmolekyler blir minimert (Byggforskserien 573.344).

Ekspandert polystyren (EPS) og ekstrudert polystyren (XPS) er plastisolasjon som normalt blir brukt i fuktekspnerte bygningsdeler, blant annet i vegg mot terreng og i flate tak. Det er viktig at isolasjonen blir installert korrekt for at det skal minimere bygningens energitap (Whalen, 2002). En oversikt over relevante materialeegenskaper til EPS og XPS er vist i Tabell 1. Verdiene er hentet fra Byggforskserien 573.344, og er innenfor det spennet de vanligvis ligger på.

Tabell 1: Oversikt over materialeegenskaper til EPS og XPS (Byggforskserien 573.344).

Materiale	Deklartert varmekonduktivitet (W/mK)	Densitet (Kg/m ³)	Spesifikk varmekapasitet J/(kgK)	Vanndamp-motstandsfaktor μ	Trykkfasthet kN/m ²
EPS	0,035-0,041	10-50	1450	60	60-300
XPS	0,034-0,037	20-65	1450	150	200-700

2.2 Ekspandert polystyren

Ekspandert polystyren (EPS) produseres ut av små kuler med polystyren som lages av råolje. Disse små kulene, granulatene, dannes ved at styrenmolekylene blir polymerisert ved å tilsette små mengder av for eksempel pentan. Pentan (C₅H₁₂), et naturlig hydrokarbon, fungerer som esemiddel og får styrenmolekylene til å ekspandere. Dette betyr at EPS vanligvis kun består av karbon og hydrogen. Polystyrenkulene som leveres til fabrikkene kan bli produsert i ulik kvalitet. Den generelle kvaliteten inneholder ingen spesielle tilsetningsstoffer, mens den modifiserte kvaliteten kan inneholde små mengder av et «selvslukkende additiv» som for eksempel brom. For det meste er det EPS med generell kvalitet som blir brukt i Skandinavia. (Lindqvist et al., 2011 og Byggforskserien 573.344).

Første steg i prosessen for produksjon av EPS er ekspansjon av polystyrenkulene i en forskummer som har en temperatur på 100 °C. I løpet av denne prosessen blir kulene varmet opp, får en myk struktur og ekspansjonsmiddelet forårsaker at de utvider seg opptil 60 ganger sin opprinnelige størrelse. Deretter blir kulene avkjølt, det utvikles et vakuum i cellene grunnet kondens av gjenværende ekspansjonsmiddel, og luft diffunderer inn i cellene for trykkutjevning. Etter kort lagring blir kulene varmet opp ved vanndamp. Resterende ekspansjonsmiddel gjør at kulene ekspanderer videre, klebes sammen i kontaktflatene, og støpes ut i blokker, plater eller kontinuerlig på bånd. (Lindqvist et al., 2011 og Byggforskserien 573.344).

Denne produksjonsmetoden gjør at EPS har en delvis åpen porestruktur. 85 % av porene er lukket (Ozkan, 1994), noe som innebærer en oppbygning bestående av ekspanderte perler sintret sammen og lukkede celler mellom boblene (Byggforskserien 573.344). Normalt består EPS av 1,5-2 volum% polystyren og 98-98,5 volum% luft (Papadopoulos, 2005). Volum av permeable porer mellom de sintrede boblene reduseres med økt densitet (Gnip et. al, 2006). Densiteten til EPS ligger vanligvis mellom 10 og 50 kg/m³.

Egenskaper, prøvingsmetoder og krav til bruk av EPS er beskrevet i standard NS-EN 13163:2012+A2:2016. Figur 4 viser et nærbilde av snittflaten til EPS, hvor en kan se den porøse strukturen.



Figur 4: Nærbilde av snittflate til EPS (Foto: Sigurd Vaagland)

2.3 Ekstrudert polystyren

Ekstrudert polystyren (XPS) blir produsert ved at smeltet polystyren tilsettes en ekspansjonsgass. Dette kan være HFK-gasser (gasser som består av hydrogen, fluor og karbon), CO₂ eller pentan (C₅H₁₂). Massen ekstruderes deretter ved at den blir presset ut gjennom en dyse, det skjer en trykkavlastning og massen ekspanderer. Materialet blir presset ut i sammenhengende lengder, deretter blir det avkjølt før det kuttes opp i ønskede dimensjoner. Prosessen gir XPS en lukket porestruktur, og ofte en tynn plastfilm på overflaten (Byggforskserien 573.344). Ser man på XPS gjennom et mikroskop vil en se et snitt av veldefinerte, uniforme porer med kontinuerlige vegger. Poreveggene består av hydrofobe polystyren-polymer. Denne kombinasjonen av uniform struktur og hydrofobe egenskaper gjør at XPS har et lavt fuktopptak (Owens Corning Foam Insulation, 2011).

XPS er et porøst materiale, og består av fast stoff med mange små porer. Disse porene inneholder luft eller andre gasser, blant annet karbondioksid. CO₂ brukt som ekspansjonsgass utgjør 3-7% av volumet til den ferdige XPS-en, og de resterende gassene utgjør rundt 1-6 volum% (Papadopoulos, 2005). Bruk av HFK-gasser i XPS bidrar til å øke R-verdien

(varmemotstanden), ettersom disse gassene har høyere varmemotstand enn luft (Al-Homoud, 2005).

Historisk ble XPS produsert med ekspansjonsgassene klorfluorkarboner (KFK) og hydroklorfluorkarboner (HKFK) som ga veldig gode isolerende evner på lang sikt. På grunn av «Ozone Depletion Potential» (ODP), altså den negative påvirkningen KFK- og HKFK-gasser har på ozonlaget i atmosfæren, ble disse gassene regulert av «Montrealprotokollen», og ble forbudt å bruke i de fleste i-land i løpet av 1990-årene (Vo et al., 2011). Fullstendig utfasing har skjedd fram til 2010. Erstatningen av disse gassene med de som blir brukt i dag (CO₂, CO₂/etanol eller HFK-gasser) har ført til en raskere forringelse av isolasjonens termiske egenskaper (Costeux, Vo og Hood, 2010).

I tillegg til økning av varmekonduktiviteten vil diffusjon av karbondioksid påvirke platens styrke. Trykkfastheten til isolasjonsplater med karbondioksid øker betydelig i løpet av de første månedene etter produksjon. Grunnen til dette er at diffusjonen av karbondioksid ut av porestrukturen er mye raskere enn penetrasjon av luft inn. I begynnelsen vil dette føre til et undertrykk i porestrukturen, og når dette trykket etterhvert stabiliseres, vil styrken til platen øke (Nurmikolu og Kolisoja, 2006).

Krav for bruk av XPS samt prøvingsmetoder og egenskaper er beskrevet i standard NS-EN 13164:2012+A1:2015. Figur 5 viser nærbilde av snittflaten til XPS. En kan se at strukturen er mer uniform og har et helt annet kutt enn for EPS.



Figur 5: Nærbilde av snittflate til XPS (Foto: Sigurd Vaagland)

2.4 Varmemotstand og varmekonduktivitet i plastisolasjon

Isolasjon blir brukt i konstruksjoner for å forbedre de termiske egenskapene ved å øke varmemotstanden (R) i bygningsdelen, slik at varmeledningsevnen gjennom materialene blir lavere (Al-Homoud, 2005). Dette gjør at en får en lavere U-verdi. Varmemotstanden avhenger

av varmekonduktiviteten (λ) og tykkelsen (d) av materialet. Sammenhengen mellom varmemotstand (R) og U -verdi er følgende:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [m^2/W] \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{R} \quad [m^2/W] \quad (2)$$

Varmekonduktiviteten (λ) til plastisolasjon avhenger av fire medvirkende faktorer (Vo et al., 2011):

- Varmeledning gjennom fast stoff - λ_s
- Varmeledning gjennom gass - λ_g
- Overføring av strålingsenergi - λ_r
- Varmeoverføring ved konveksjon - λ_c

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_c \quad (3)$$

Materialers varmekonduktivitet blir bestemt ved målinger under definerte betingelser, med den forenklete betraktning at de er homogene. Alle former for varmetransport (varmeledning, stråling og konveksjon) blir inkludert og varmegjennomgangen beregnes som ren varmeledning (Novakovic et.al, 2017).

Varmeledning skjer ved overføring av bevegelsesenergi mellom molekylene i et stoff når temperaturen ikke er konstant gjennom stoffet. Kinetisk energi overføres gjennom støt fra varmere molekyler til kaldere, mer energifattige molekyler. Dette beskrives av Fouriers varmeledningslov, som gjennom et materiale eller bygningsdel kan uttrykkes slik (Pedersen, 2017):

$$q = \frac{\lambda}{d} (T_2 - T_1) \quad [W/m^2] \quad (4)$$

Her er q varmestrømmen gjennom materialet, d er tykkelsen på materialet, λ er materialets varmekonduktivitet, og T_2 og T_1 er temperaturene på henholdsvis varm og kald side. Denne ligningen er kun gjeldende hvis en antar stasjonære forhold og et homogent materiale. Ut ifra dette kan man uttrykke varmemotstanden (R), og en kan se at varmeisoleringssevnen til et materiale blir dårligere jo høyere λ -verdien er (Novakovic et.al, 2017 og Pedersen, 2017). For alle isoleringsmaterialer med lukkede porer, vil varmeledningen øke når temperaturen øker. Dette er på grunn av at konduktiviteten avhenger av hvor fort molekyler vibrerer. Ved høye temperaturer vil de vibrere fortere, og dermed lede varme bedre (Koru, 2016, Abdou og Budaiwi, 2005).

På mikroskopisk nivå, avhenger varmeledningen av ulike faktorer. Disse er blant annet porestørrelse, diameter, og hvordan fibre og partiklene er plassert i forhold til hverandre. I tillegg er type gass og gasstrykk, bindemiddel og innvendig motstand mot varmestråling, samt strukturelle defekter i materialet, vesentlig for varmeledningsevnen (Al-Ajlan, 2006 og Vo et al., 2011).

Varmekonduktiviteten til materialene er på makroskopisk nivå resultatet av de ulike måtene varme strømmer gjennom den komplekse porøse strukturen på. Dette skjer som sagt ved varmeledning gjennom det faste stoffet, gjennom gass, gjennom porene og ved strålingsutveksling i de tilstedeværende mediene (Litovsky og Kleiman, 2005).

I isolasjonsmaterialer er varmeledning ved konveksjon vanligvis raskere enn varmeledning gjennom fast stoff. De små luftporene i materialet kan normalt ikke danne konveksjonsceller. Hvis det skjer, vil fluidets viskøse effekt gjøre de ineffektive. Hensikten med isolasjon er å gjøre hver enkelt luftlomme så liten at konveksjon forhindres så mye som mulig (McFadden, 1988). I EPS-materialer som blir utsatt for lavt gasstrykk og har lav permeabilitet, under normale forhold, er derfor bidraget fra naturlig konveksjon neglisjerbart. Dette kan verifiseres av studie gjort av Litovsky (1996). Det samme gjelder for XPS. Varmeledning ved strålingsutveksling står for omtrent 20-30% av den totale termiske konduktiviteten, og endres ikke med tiden.

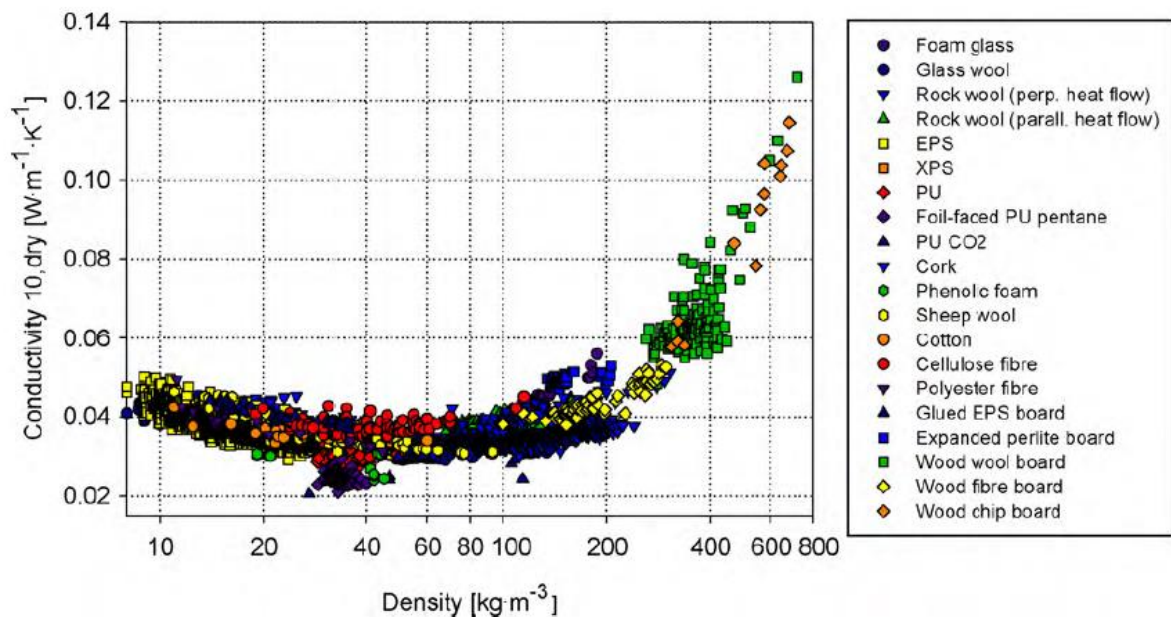
Varmeledning gjennom gass står for omtrent 60-70 % av den totale varmekonduktiviteten til EPS og XPS, ettersom gass okkuperer 90-98 volum % av plastisolasjon (Whalen, 2002 og Vo et al., 2011). Som nevnt har ekspansjonsgassene som før ble benyttet i XPS (primært KFK-gasser) blitt byttet ut med gasser (blant annet CO₂) som ikke skader ozonlaget. Utsiftingen har ført til dårligere termiske egenskaper. Varmkonduktiviteten som før spente over 0,026-0,028 W/mK er i dag økt til mellom 0,034 W/mK og 0,040 W/mK (Costeux et al., 2010). Dette er på grunn av akselerasjonen av gassdiffusjon i porene. Hvor raskt dette skjer avhenger av permeabiliteten til luft og ekspansjonsgassen gjennom faststoffet av polymeren, hvor dette igjen er et produkt av løseligheten og diffusiviteten. Diffusjonen av de tunge molekylene med lavere varmekonduktivitet som ble brukt tidligere, var en treg prosess som tok flere tiår. Diffusjon av karbondioksid derimot, skjer i løpet av de første månedene etter produksjon, samtidig som luft med høyere varmekonduktivitet diffunderer inn. Dette gjør at isolasjonen mister en del av varmemotstanden nesten umiddelbart.

Muligheten for bruk av andre typer ekspansjonsgasser er derfor blitt studert. For eksempel ved bruk av enkelte hydrofluorkarbondgasser (HFK-gasser) med lavere permeabilitet enn karbondioksid tillates mesteparten av gassen å bli værende i isolasjonen i en lengre periode, opptil 100 år (Smith et al., 2014). Dette gjør at varmekonduktiviteten forholdes lav og dermed vil varmemotstanden til isolasjonen forringes saktere, slik at det kan gi energibesparelse lenger. En annen måte å redusere gasskonduktiviteten er å redusere porestørrelsen til den er mindre enn det som trengs for at luftmolekyler skal ha fri passasje (70nm). På den måten vil ikke luftmolekylene kolliderer med hverandre. Dermed minimeres den kinetiske energien, og følger varmetransporten (Vo et al., 2011).

Med andre ord, hvis ekspansjonsgassen har en varmekonduktivitet lavere enn luft, vil isolasjonsevnen til XPS endres som en funksjon av tid. Denne endringen i varmemotstand vil være raskere for ekspansjonsgasser som CO₂, butan- og pentangasser og for noen av HFK-gassene. Å vite permeabiliteten til ekspansjonsgassene og luften inni polymeren, densiteten og porestrukturen til plasten er ofte tilstrekkelig for å estimere endringen av varmemotstanden over tid (Smith et al., 2014).

Varmeledning gjennom fast stoff står for 10 % av den totale varmekonduktiviteten til isolasjonsmaterialet. Varmeledningsevnen avtar med avtakende densitet ned til en viss verdi. Dette er på grunn av at i isolasjon med høyere densitet vil det være mindre porevolum og mindre innhold av luft. Det betyr at varmestrøm gjennom isolasjonen vil være styrt av varmeledningen av det faste stoffet, og konveksjon av luft blir mer eller mindre betydningsløs (Hoursten et al., 1996, Lakatos og Kalmar, 2013, Mar et al., 2008, Yucel et al., 2009). En studie av Domínguez-Muñoz et al. (2010) hvor varmekonduktiviteten til mange ulike isolasjoner med ulik densitet ble målt og sammenlignet, viser at ved veldig lave densiteter, øker varmeledningsevnen når densiteten minker. Se Figur 6. Dette er på grunn av den

langbølgede strålingsutvekslingen i porene. Som figuren viser vil konduktivetsverdien i det høyeste sjiktet av densiteter, øke med densiteten når porøsiteten avtar. Den laveste konduktivetsverdien ble funnet når isolasjonen har densitet mellom 30 og 60 kg/m³.



Figur 6: Sammenheng mellom densitet og varmekonduktivitet for ulike isolasjonsmaterialer (Domínguez-Muñoz et al., 2010, s. 2161)

Varmeledningsevnen til isolasjonsmaterialer med lave densiteter er mer påvirket av temperaturforandringer enn materialer med høy densitet. Dette kan forklares ved forekomsten av større volumandel luft i materialet, som fører til at varmeoverføring ved konveksjon og strålingsenergi spiller en større rolle. I polystyren-isolasjon er derimot denne endringen i termisk konduktivitet i forbindelse med temperatur når densiteten endres marginal, ettersom det skjer en <50 % endring når densiteten endres fra 39.0 til 17.0 kg/m³. Dette kan være forbundet med tilstedeværelsen av store mengder fanget luft mellom det lette isolasjonsmaterialet, som er forventet å øke varmetransporten. Det må likevel nevnes at økningen i varmetransport ikke kun er bestemt av forekomsten av luft, men også på hvilken måte luften er fanget inne i materialet. Dette forklarer den store variasjonen ulike isolasjonstyper med omtrent samme densitet kan ha. (Abdou og Budaiwi, 2004)

Et forsøk gjort av Vo et al. (2011) demonstrerte at optimal størrelse til porer i plastisolasjon er fra 120-180 µm. Denne porestørrelsen reflekterer både varmetransmisjonen og spredningen gjennom polystyrenets vegger. Mindre porestørrelse enn dette vil medføre en økning av strålingskonduktivitet ettersom materialer blir mer transparent for IR-stråling.

Plastisolasjon i tørr tilstand har en deklart varmekonduktivitet som kalkuleres ved hjelp av referansebetingelser for temperatur og fukt. «Verdien gjelder for forventet levetid under normale betingelser» (Byggforskserien, 471.010, s. 1). Når bygningsdelen skal prosjekteres, bestemmes de dimensjonerende verdiene ut fra de deklarete verdiene, målt middelverdi eller tabulerte verdier. Ved bruk av et produkt med deklart varmekonduktivitet oppgitt av produsenten, skal denne brukes ved dimensjonering. De termiske egenskapene til isolasjon avhenger av ulike faktorer. Prosedyren for omregning finnes i NS-EN ISO 10456:2007 og tar hensyn til temperatur, fuktinnhold, aldring, installasjonsdetaljer og eksponeringsforhold.

2.5 Fuktopptak i plastisolasjon

Fukt forekommer i et materiale på tre ulike måter: som vanndamp (i gassfase), som vann (væskeform) og som is (fast-form). Hovedmekanismene for fukttransport er diffusjon av vanndamp og vanntransport i væskeform på grunn av kapillære krefter. Bevegelse av vann i bygningsmaterialer kan tilskrives hovedsakelig tre faktorer: trykkgradienten, tyngdekraften og kapillærkrefter. (Ducoulombier og Lafhaj, 2017)

Overføring av vanndamp er et resultat av damptrykk og luftbevegelse. For de fleste materialer med lukket eller delvis lukket porestruktur, slik som XPS og EPS, er bevegelsen av luft minimal, og kun en liten mengde vanndamp er overført til isolasjonen på grunn av luftbevegelse. Forskjellen i partialtrykket til vanndamp i luften, som er forårsaket av relativ fuktighet og temperaturgradienten i omgivende luft, er drivkraften for vanndampinntrengning i isolasjonen. Så snart vanndampen kommer i kontakt med en kald overflate, enten inni eller i forbindelse med isolasjonssystemet, kan det kondensere til væskeform hvis overflatetemperaturen er under duggpunktet til temperaturen av luften rundt. (Cai, 2017b)

I en situasjon hvor isolasjonen er plassert i vegg, vil forskjellen på relativ fuktighet og temperatur inne og ute, spille en stor rolle for fukttransporten. Om vinteren er innetemperaturen høyere enn utetemperaturen, samtidig som relativ fuktighet er høyere ute. Det vil si at temperaturgradienten og luftfuktighetsgradienten virker motsatt av hverandre. Diffusjon av vanndamp går da fra innsiden av bygningsdelen og utover. En konsekvens av det er at vannpartiklene som diffunderer gjennom porene av materialet blir adsorbent på overflaten av porene og blir dermed stoppet på grunn av adhesjon. Når fuktigheten øker, vil antallet vannpartikler øke, som fører til større grad av adsorpsjon. Porene begynner dermed å bli dekket av et tynt lag med vann. Når dette laget blir tykkere, vil adhesjonskreftene som holder på vannpartiklene reduseres. Noen av partiklene vil bli mer mobile og begynne å spre seg på overflaten. Fuktigheten øker, porene blir nesten mettet og kun kapillær transport av vannpartikler forblir den aktive mekanismen. (Ducoulombier og Lafhaj, 2017)

Når EPS og XPS blir utsatt for vann i væskeform, trenger vann inn fra kantene til senter, gjennom hulrom mellom perlene. Polystyrenet i seg selv absorberer ikke vesentlig mye vann, kun rundt 0,05 % (Sarlin et al., 1986). Om vann trenger gjennom porestrukturen, og ikke bare på utsiden av perlene, avhenger av størrelsen på omslutningstrykket. Når EPS er utsatt for lavt omslutningstrykk, vil vann kun legge seg mellom perlene, og lar en stor del av porene være uten vann ettersom den sveiste sammenkoblingen mellom perlene fungerer som en sperre. Hvis omslutningstrykket er stort, vil vann i følge Ossa og Romo (2012) trenge gjennom porestrukturen og gjennom sammenkoblingene som før var ugjennomtrengelige.

2.6 Varmekonduktivitet ved fuktopptak

Når isolasjon blir utsatt for et fuktig miljø, enten om det er i form av vann eller luft med høy relativ fuktighet, vil den ta opp en viss mengde vann, avhengig av fuktbelastningen. Hovedsakelig skjer dette ved diffusjon og kapillærsug (Byggforskserien 573.344). Det er blitt gjort flere studier for å undersøke fukttransport gjennom en konstruksjon, men som mange nevner er det vanskelig å finne én enkelt parameter for beregninger når både temperatur og fuktbetingelser varierer (Jerman og Černý, 2012).

Flere modeller prøver å beskrive hvordan varmetransport skjer i et plastisolasjonsmateriale ved å kombinere varme-, luft- og fukttransport. Hver modell bruker ulike uavhengige former for potensiell energi som fuktmengde, temperatur og vanntrykk som blir beskrevet ved å

bruke simultane fenomen som diffusjon, konveksjon, kapillærsug og trykkgradient (Abahri et al., 2016).

Termisk konduktivitet til luft er 0,026 W/mK. Når isolasjonen absorberer vann, blir noe av luften i porene erstattet med vann (til hvilken grad avhenger av eksponeringssituasjonen). Varmekonduktiviteten for vann er 0,6 W/mK. Det vil si at vann leder varme omtrent 20 ganger mer effektivt enn den luften den erstatter. Dette bidrar til at når isolasjonen tar opp vann vil materialet få en betydelig dårligere varmemotstand. Materialer med åpen cellestruktur eller porøse materialer (som mineralull og delvis EPS) påvirkes i mye høyere grad enn materialer med lukket porestruktur (XPS) ettersom ikke like mye vann vil trenge gjennom porene i sistnevnte. Hvis isolasjonen er i et kaldt miljø, vil det fryste vannet inni isolasjonen kunne overføre over 100 ganger mer varme enn luften ville gjort. (Dechow og Epstein, 1978 og Szodrai og Lakatos, 2014)

I tillegg til at vannet fyller porene, blir fibre og celleveggene i materialet dekket av vann slik at de blir tykkere i tverrsnitt og får dermed større varmestrømslinje. Denne blir enda mer effektiv der fibre har kontakt med hverandre. Når isolasjonen er tørr, er arealet for å overføre energi mindre, kun en linje eller ett kontaktpunkt hvor fibre møtes, slik at varmeledningen blir lavere. Vannet som dekker fibre sørger for en menisk rundt hvert kontaktpunkt mellom fibre. Dette øker arealet hvor varme kan transporteres betydelig. Vann kan også sørge for økt konduktivitet langs fibre fra kontaktpunkt til kontaktpunkt. Selv om fuktopptaket ikke alltid er høyt nok til at vannmengden fyller porene mellom fibre, kan vannet fylle de små luftcellene i skumplasten. (McFadden, 1988 og Mar et al., 2007)

Isolasjon utsatt for fuktig luft vil ha et visst fuktopptak som vil påvirke konduktiviteten. Varmeledning skjer da på grunn av gassovertføring av en blanding av «passiv» gass (luft) og «aktiv» gass (vanndamp), som strømmer fra varm til kald side. De motsatte overflatene av en pore som er vertikalt på den utvendige temperaturgradienten, betraktes. Partialtrykket til den passive gassen vil være lik trykket av den samme gassen i vakuum gjennom hele porevolumet. Partialtrykket til den aktive gassen, ved en gitt temperatur, vil på den varme siden av poren være større enn på den andre siden av poren. Dette fører til transport av gassmolekyler ved diffusjon fra delen av poren med høyt partialtrykk til delen med lavt partialtrykk. På grunn av at vanndamptransport er ledsaget av varmeabsorpsjon inn i poren og kondensasjon er forbundet med varmeavgivelse til faststoff-fasen, resulterer dette i en netto varmeoverføring gjennom poren. Vanndampmolekyler som kondenserer på motsatt overflate kan returnere til original side av poren på grunn av ulike fenomener som kanaldannelse og tyngdekraften. Når fuktinnholdet i materialet er lavt, er kun en fraksjon av porens overflateareal dekket med kondensen til den aktive gassen. Dette betyr at med tanke på varmekonduktiviteten for et materiale med lave fuktinnhold vil bidraget fra varmefluksen som skyldes strømning av gass gjennom poren være begrenset av hvor stor del av overflatearealet til poren som er dekket av vann, og dermed materialets fuktinnhold. Dette er på grunn av det begrensede antall steder på porens overflate hvor vanndamptransport som fører til varmeledning, kan skje. (Mar et al., 2007 og Szodrai og Lakatos, 2014) Hvis partialtrykket av vanndampen inni det fuktige materialet eller på overflaten er større enn lufttrykket, vil tørking, også kalt desorpsjon, skje (Szodrai og Lakatos, 2014).

Deklarert varmekonduktivitet gjelder for tørr tilstand. Ved prosjektering av varmeisolering skal det tas hensyn til forventet fuktinnhold i isolasjonen ut ifra bruksområde. Da regnes det med en dimensjonerende varmekonduktivitet etter NS-EN ISO 10456:2007, der prosjekterende må multiplisere den deklarererte varmekonduktiviteten med en

korreksjonsfaktor. Fuktkorreksjonsfaktorer for ulike bruksområder for EPS og XPS er listet opp i Tabell 2.

Tabell 2: Fuktkorreksjoner for EPS og XPS ut fra bruksområde. (NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010, tabell NA.1)

Materiale	Bruksområde	Fuktinnhold, ψ (Volumandel) Volum%	Korreksjonsfaktor F_m
EPS	I fuktbeskyttet bygningsdel	0	1,00
	Drensplate utenpå vegg mot grunnen	(0,02) 2 %	1,08
	Horisontalt i grunnen, utendørs, drenert min klasse WD(V)10	(0,1) 10 %	1,49
XPS	I fuktbeskyttet bygningsdel	0	1,0
	Drensplate utenpå vegg mot grunnen	0	1,0
	Horisontalt i grunnen, utendørs, drenert min klasse WD(V)3-FT1	(0,03) 3 %	1,08
	Horisontalt i grunnen, utendørs, udrenert min klasse WD(V)3-FT1	(0,05) 5 %	1,13
	Over membran i omvendte tak. Tekking med: - Singel og isolasjon i ett lag, klasse WD(V)3-FT1	(0,01) 1 %	1,03
	- Betongheller på klosser, isolasjon i to lag, klasse WD(V)3-FT1	(0,02) 2 %	1,05
	- Betongheller på singel. Høyst 10 mm puss på isolasjon. Permanent skygge, klasse WD(V)3-FT1	(0,03) 3 %	1,08
	- Betong og heller direkte på isolasjon eller i sand, beplantning, klasse WD(V)3-FT1	(0,05) 5 %	1,13

2.7 Kalkulasjon av varmekonduktivitet til våt isolasjon

En fremgangsmåte for å beregne varmekonduktivitet til våt isolasjon er beskrevet av Lakatos (2016). Laboratoriemetoden denne studien baseres på, er isolasjonens fuktopptak ved høy relativ fuktighet, og ikke absorpsjon ved fullstendig nedsenking i vann. Ettersom det resulterer i at isolasjonen inneholder en viss mengde vann likevel, er kalkulasjonsmetoden beskrevet anvendelig for denne oppgaven.

Vanninnholdet (ω) i prøvene blir regnet ut ved hjelp av følgende formel:

$$\omega = \frac{m_w - m_d}{m_d}, \quad (5)$$

hvor m_w er massen av våt prøve etter n døgn (i metode referert til som m_n) og m_d massen av tørr prøve (i metode referert til som m_0). Varmekonduktiviteten av de våte prøvestykkene kan dermed beregnes som en funksjon av vanninnholdet (ω), en hjelpekonstant Z og den deklarererte varmekonduktiviteten av tørt materiale (λ_d). For plastisolasjon er $Z = 2$.

Varmekonduktivitet til vått prøvestykke kan uttrykkes på følgende måte:

$$\lambda_w = \lambda_d \times \left(1 + \frac{\omega \times Z}{100}\right). \quad (6)$$

3 Metode

3.1 Litteraturstudium

3.1.1 Studiets omfang

Målet med litteraturstudiet var å finne artikler som omhandler fuktopptak i plastisolasjon, og påvirkningen dette har på isolasjonens termiske egenskaper. Ettersom forfatter tidligere har skrevet en oppgave om lignende tema (Stagrum, 2017), var det mulig å bruke noe av litteraturen funnet i den perioden som utgangspunkt for videre søk. De relevante artiklene ble plukket ut, og referanselistene ble gjennomgått på utkikk etter aktuelle studier. Disse ble funnet ved hjelp av Google Scholar, kategorisert etter innhold og relevans, samt forfatter fikk en pekepinn på hva som eksisterer og eventuelle egnede søkeord. I tillegg ble de aktuelle standardene for oppgaven funnet.

En ti-trinns prosedyre for litteratursøk av O'Brien og Mc Guckin (2016) ble gjennomført. Denne består av

- 1) Definere søkeord
- 2) Bestemme synonymer for søkeordene
- 3) Kontrollere for ortografi og bruk av passende endinger
- 4) Identifisere relevante databaser
- 5) Utføre testsøk
- 6) Bestemme om det skal utføres et vidt eller smalt søk for nøkkelord
- 7) Påse at alle ord er stavet riktig
- 8) Kombiner søkeordene på en logisk måte
- 9) Utfør testsøk igjen
- 10) Tilpass syntaksen til søket etter de spesifikke databasene.

Denne prosedyren resulterte i mange treff som måtte gjennomgås for å finne relevante artikler. Videre metode går ut på kvalitativ vurdering av tittel, nøkkelord og eventuelt abstrakt for manuell utvelgelse.

Det første systematiske søket ble gjort i februar 2018. Fem vitenskapelige databaser (Oria, Google Scholar, WebOfScience, Scopus, og ScienceDirect) ble benyttet for å finne relevant litteratur. Tilsammen ble det gjort 90 individuelle søk.

3.1.2 Søkeord

Fokuset for litteratursøket var å finne studier basert på plastisolasjon (EPS og XPS). Ettersom det finnes lite litteratur på norsk, ble søket gjort ved bruk av engelske søkeord. Det er mange måter å skrive plastisolasjon på. Denne oppgaven er konsentrert rundt de to typene ekspandert (EPS) og ekstrudert (XPS) polystyren. Begge benevnelser er hensiktsmessig å anvende. For å oppnå et bredt søk, må synonymer formuleres. Plastisolasjon («plastic insulation») og termisk isolasjon («thermal insulation») uttrykker ønskede felt for søket.

Følgende overordnede søkeord ble dermed brukt:

- EPS
- “Expanded polystyrene”
- XPS
- “Extruded polystyrene”
- “Plastic insulation”
- “Thermal insulation”

- “Insulating material”
- “Polystyrene insulation”

Antall treff på disse søkeordene brukt alene ga veldig mange treff på samtlige søkemotorer. Søket måtte derfor spesifiseres. Ettersom fuktopptak i isolasjon, først og fremst gjort ved laboratorieforsøk, samt det termiske aspektet ved isolasjonens oppførsel var betydningsfullt for denne oppgaven, var det hensiktsmessig å inkludere søkeord som omfatter dette. Hver av de ovennevnte søkeordene ble kombinert med følgende:

- “Water absorption”
- “Water sorption”
- “Moist”
- “Moisture”
- “Moisture content”
- “Wetting”

- “Thermal conductivity”
- “Thermal performance”

- “Testing methods”
- “Laboratory test”
- “Immersion test”

Ettersom langtidseffekt av vannabsorpsjon var interessant å finne litteratur om, ble i tillegg følgende spesifisering benyttet:

- “Long term water absorption”
- “Long term water sorption”

Se vedlegg A for en fullstendig oversikt over kombinasjoner av søkeord og antall treff.

3.1.3 Utvelgelse av artikler for videre studie

Litteraturstudiet var avgrenset til hovedsakelig engelske vitenskapelige artikler, konferanseartikler og vitenskapelige rapporter. Hver kombinasjon av søkeord ble gjort i fire trinn som vist ved eksempel i Tabell 3. Hvis søkemethoden resulterte i et antall artikler som var overkommelig å behandle, ble alle artiklene gjennomgått. Manuell utvelgelse av artikler ble deretter gjort ved først å vurdere tittelen. Om tittelen virket relevant, ble introduksjonen til artikkelen lest og en kvalitativ vurdering av nøkkelordene ble gjort. I tilfeller hvor dette virket aktuelt, ble artikkelen lastet ned og lagt i en mappe.

Tabell 3: Eksempel på ett søk

Trinn	Beskrivelse	Søkeord	Metode
1.	Overordnet søk	“Expanded polystyrene” OR EPS	<i>Bibliometrisk Ti-trinns prosedyre</i>
2	Avgrensning	“water absorption” OR “water sorption”	<i>Bibliometrisk + kvalitativ vurdering av titler og nøkkelord</i>
3.	Spesifisering	“Testing methods” OR “Laboratory test” OR “Immersion test” OR “Long term”	<i>Bibliometrisk + kvalitativ vurdering av titler og nøkkelord</i>
4.	Manuell utvelgelse	Relevante artikler utvalgt for videre studie	<i>Manuell kvalitativ utvelgelse titler, nøkkelord og abstrakt</i>

Det første overordnede søket ble gjort i Oria, søkemotoren til NTNU universitetsbibliotek. Oria kjører søk i flere ulike vitenskapelige databaser, og det kom dermed opp mange treff, selv på de mest spesifiserende søkeordene. De første 100 ble likevel gjennomgått, for å få en oversikt over hva som eksisterer av artikler om temaet.

Ved bruk av søkemotoren Google Scholar ble søket avgrenset til å utelate «patenter» og «sitater». Antall treff ved bruk av denne søkemotoren ble for mange til å undersøke alle, men ettersom artiklene ble sortert etter relevans, ble de 100 første gjennomgått. På denne måten ble for eksempel 15 relevante artikler funnet ved å bruke EPS som overordnet søkeord og de ovennevnte spesifiserende søkeordene.

Søket ble begrenset til «topic» ved bruk av databasen «Web of Science». For å avgrense søket ble de spesifiserende søkeordene skrevet i feltet «search within results for...». Dette resulterte i et lite nok antall på trinn 3 for å gjennomgå alle artiklene. Med noen av kombinasjonene var det mulig å gjennomgå alle etter kun første avgrensning (trinn 2). Ved å bruke applikasjonen «beslektede artikler», hvor en kan finne flere artikler som omhandler noe av det samme, samt «sitert av», ble enda flere relevante artikler funnet.

Ved bruk av databasen «Science Direct» ble det avgrenset til artikler hvor tittel, abstrakt og nøkkelord inneholder de bestemte søkeordene. Avgrensning førte i mange av tilfellene til et antall artikler det var mulig å gjennomgå, mens det på noen av kombinasjonene var nødvendig med spesifisering. Flesteparten av artiklene som disse søkene resulterte i, var allerede funnet ved bruk av de andre databasene, og førte ikke fram til mange nye funn.

Litteratursøket i “Scopus” ble utført ved å skrive de spesifiserende søkeordene inn i feltet for «search within results...». Først de avgrensende søkeordene i trinn 2, deretter ble de spesifiserende søkeordene i trinn 3 søkt innenfor der igjen. Ettersom søket ble sortert etter relevans, ble de første 100 artiklene for søkene som etter spesifisering resulterte i over 100 treff, gjennomgått.

3.1.4 Sortering av artikler

Etter systematisk litteratursøk i de ulike databasene, ble artiklene lest. Forfatter, tittel, årstall og utgivelsesland ble notert i et regneark i Excel. Etersom det mest relevante for oppgaven var å finne studier og eksempler på forsøk som har blitt gjort på fuktopptak i plastisolasjon, ble dette hovedsakelig vurdert. Dermed ble artiklene sortert etter om de omhandler ulike forsøk som «nedsenkingsforsøk», konduktivitetsforsøk, forsøk med isolasjon i fuktig luft, langtidsforsøk, samt hvilken standard forsøkene ble gjort etter. Om studiet omhandlet andre typer fuktforsøk, ble dette notert, samt om studien nevner sammenheng mellom fuktopptak og atmosfæretrykk. Det ble bemerket om artikkelen inneholdt bra teori eller andre nyttige opplysninger. I tillegg var det relevant å merke seg om studiet sammenlignet densitet med termiske egenskaper og grad av fuktopptak. Et lite sammendrag til hver artikkel ble skrevet, og inkludert i regnearket. Det ble også notert dato for når artikkelen ble lest og hvorvidt artikkelen blir brukt som referanse i oppgaven. Informasjonen fra regnearket ble senere bearbeidet om til kapittel 4.1 Resultater fra litteraturstudium.

Etter forklaringsproblemet som oppsto i forbindelse med sammenhengen mellom atmosfæretrykk og fuktopptak, ble det nødvendig å gjennomgå litteraturen for å forsøke å finne en mulig årsak. Mange av de allerede leste artiklene, ble gjennomgått på nytt for å se om dette fenomenet ble nevnt. De mest relevante artiklene for dette temaet ble søkt opp på nytt i Google Scholar for å finne beslektede artikler som har sitert de respektive artiklene. Referanselisten til relevante artikler ble også gjennomgått. I tillegg ble det gjort nye søk i databasene. De overordnede søkeordene og avgrensede søkeord som omhandler fuktopptak beskrevet over, samt de spesifiserende emneordene om laboratorieforsøk, ble kombinert med de nye søkeordene «barometric pressure» og «atmospheric pressure». På denne måten ble det funnet fem nye relevante artikler.

3.2 Laboratorieforsøk og beregninger

3.2.1 Prøvestykker

I de praktiske forsøkene ble det brukt fem ulike typer plastisolasjon med tykkelse 50 mm. Intensjonen var å benytte isolasjonstyper som allment blir brukt til de situasjonene som tidligere er nevnt (i flate tak, grønne tak, i vegg, kjellervegg, rundt fundament og som markisolasjon). De ble derfor ikke utsatt for noen form for spesialbehandling i forkant av forsøket, og det ble valgt typer som er allment tilgjengelig og brukt i praksis. Det ble valgt å bruke to typer EPS fra GLAVA og tre typer XPS fra DOW. En fullstendig oversikt over isolasjonens karakteristikk vises i Tabell 4. Informasjonen er funnet i produktdatablad for GLAVA (2013) og DOW (2018). Tomme felt i tabellen betyr at informasjonen ikke var tilgjengelig.

Densiteten til isolasjonen var ikke oppgitt på pakken eller i produktbladet. Derfor ble produsentene GLAVA og DOW kontaktet i forsøk for å få klarhet i dette. GLAVA kunne fortelle at de ikke opererer med en deklarerert densitet, men at det er noe de jevnlig måler. Av de siste målingene de hadde gjort, hadde de målt gjennomsnittverdier på 16 kg/m³ og 24 kg/m³ til henholdsvis EPS type 1/3 og EPS type 2/4. DOW svarte ikke, og det var dermed ikke mulig å oppdrive fabrikkmålt densitet for XPS-prøvene.

Tabell 4: Oversikt over isolasjonens karakteristikk

Type isolasjon	Fabrikk-målt densitet (kg/m ³)	Trykk-fasthet (kN/m ²)	Dimensjoner (mm)	Spesifikasjon	Deklarert varmemotstand R _D (m ² K/W)	Deklarert konduktivitet λ (W/mK)	Krav fuktopptak nedsenket i vann
EPS1/ EPS3	16	80	50x600x1200	GLAVA		0,035	≤2-3 volum%
EPS2/ EPS4	24	150	50x600x1200	GLAVA		0,038	≤2-3 volum%
XPS1		250	50x585x1185	Styrofoam 250 A-N DOW	1,50	0,033	≤0,7 volum%
XPS2		400	50x585x1185	Styrofoam 400 A-N DOW	1,50	0,033	≤0,7 volum%
XPS3		500	50x585x1185	Styrofoam 500 A-N DOW	1,50	0,033	≤0,7 volum%

Alle typene med isolasjon ble kuttet til med båndsgag 12. februar 2018. 50 mm ble firkantkuttet av alle sidene av platene før de ble kuttet til riktig størrelse. Fire prøvestykker av hver type (EPS 1, EPS2, XPS 1, XPS 2, XPS 3) ble kuttet til 200 mm x 200 mm ± 1 mm, merket og lagret i ett døgn i 23 ± 5 grader. Deretter ble de veid til nærmeste 0,1 g. Densiteten ble beregnet ved å dividere den innveide massen med volumet av prøvestykket på følgende måte:

$$\rho = \frac{m(0)}{0,2 m \times 0,2 m \times 0,05 m} \quad (7)$$

Nye prøvestykker med dimensjoner 200 mm x 200 mm ± 1 mm ble 13. april 2018 kuttet til for å bruke til reproduksjon av forsøket. Fire prøvestykker av EPS1 og EPS2 fra samme pakke som det første forsøket ble kuttet til, samt fire prøvestykker av EPS S80 og EPS S150 fra en ny pakke. Disse ble kondisjonert i fire døgn før tørr masse ble veid og densitet regnet ut. Tabell 5: Oversikt over tørr masse og utregnet tørr densitet til de ulike typene isolasjon brukt i nedsenkingsforsøk 1 og nedsenkingsforsøk 2 (reproduksjon).

Tabell 5 viser en oversikt over innveid masse og beregnet densitet til hvert av de fire prøvestykkene av hver isolasjonstype.

Tabell 5: Oversikt over tørr masse og utregnet tørr densitet til de ulike typene isolasjon brukt i nedsenkingsforsøk 1 og nedsenkingsforsøk 2 (reproduksjon).

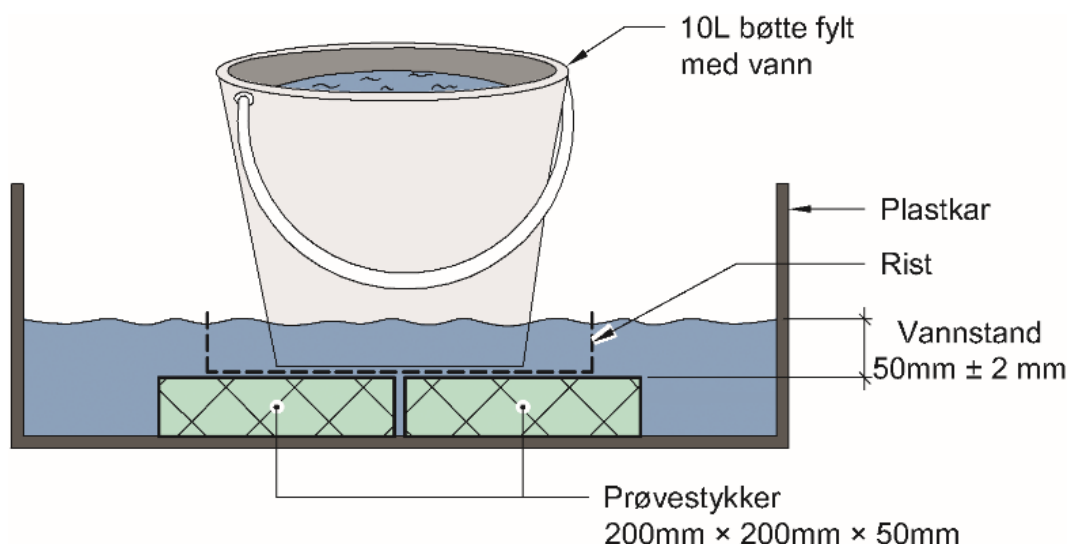
Type	m ₀ (g)				Tørr densitet utregnet (kg/m ³)			
	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4
EPS1.1	34,9	30,0	31,2	32,8	17,45	15	15,6	16,4
EPS2.1	44,9	43,0	44,2	45,9	22,45	21,5	22,1	22,95
EPS1.2	31,7	33	31,6	30,3	15,85	16,5	15,8	15,15
EPS2.2	43,8	44,6	42,8	41,8	21,9	22,3	21,4	20,9
EPS3	48,4	48,4	48,9	48,4	24,2	24,2	24,45	24,2
EPS4	48,7	49,7	47,9	46	24,35	24,85	23,95	23
XPS1	63,6	63,3	62,9	62,9	31,8	31,65	31,45	31,45
XPS2	72,3	71,9	72,2	71,7	36,15	35,95	36,1	35,85
XPS3	81,4	80,7	81,2	81,2	40,7	40,35	40,6	40,6

Fire prøvestykker av EPS1, EPS2, XPS1, XPS2 og XPS3 ble kuttet til 400 mm x 400 mm ± 1 mm. Disse skulle brukes til forsøket hvor de ble lagret i en lufttett boks med fuktmettet luft. Ett prøvestykke av hver type ble kuttet til 500 mm x 500 mm ± 1 mm. Disse ble brukt til bestemmelse av varmemotstand etter 13 uker fullstendig nedsunken i vann. Alle prøvestykkene ble lagret i ett døgn i 23 ± 5 grader før de ble brukt i forsøk.

3.2.2 Vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking etter NS-EN 12087:2013

Metoden som ble brukt er beskrevet i NS-EN 12087:2013 kapittel 7.2.3 *Langtids vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking, metode 2A*.

Tirsdag 13. februar 2018 ble alle prøvestykkene på 200 mm x 200 mm plassert horisontalt i vannkar. Se prinsippsskisse i Figur 7. Tre kar inneholdt seks prøvestykker hver. De to siste ble av plasshensyn lagt sammen med 500 mm x 500 mm prøvestykker, som senere ble brukt til bestemmelse av varmemotstand. En rist ble lagt over for å fordele trykket av lasten over isolasjonen og for å minimere skader påført av lasten. I en av kassene ble det plassert 10 hullteglstein oppå risten som last, i resten av kassene ble to 10 liters bøtter fylt med vann og plassert oppå risten. Hullteglsteinen benyttet som last ble uken etter byttet ut med vannbøtter. Kassene ble forsiktig fylt med vann slik at prøvestykket var 50 mm ± 2mm under vannoverflaten. Temperatur på vannet da kassene ble fylt var på rundt 4-5°C, men denne ble etterhvert lik romtemperaturen. Lufttemperatur er 23 ± 5 °C.



Figur 7: Oppsett av forsøk (Illustrasjon: SFI Klima 2050/SINTEF Byggforsk)

Første veiing skjedde etter tre dager. Bøttene med vann/teglsteinene ble forsiktig løftet av risten før risten ble løftet av. Prøvestykkene ble så satt på en rist i 45 graders vinkel for å tørke i $10 \pm 0,5$ min før de ble veid til nærmeste 0,1 g. Det ble påsett at vekten nullstilte seg mellom hver veiing. Dette krevde at overflatevann fra prøvestykkene på vekten ble tørket bort mellom hver gang. Etter veiing ble prøvestykkene lagt tilbake i kassene med vann, risten og lasten (teglstein/bøtter med vann) ble forsiktig lagt oppå og det ble påsett at ingen av prøvestykkene lå inntil hverandre eller var nær veggene i kassen. Vannstanden ble sjekket til at den fremdeles var på 50 ± 2 mm over prøvestykkene. Hadde vannstanden sunket, ble kassene etterfylt med vann.

Hver tirsdag deretter ble prøvestykkene veid på samme måte. Vannstanden i alle kassene ble sjekket og etterfylt med vann om nødvendig (om isolasjonen lå lavere enn 50 ± 2 mm under vannspeilet). Forsøksperioden var på tilsammen 13 uker.

Vannopptaket (W_{lt}) til isolasjonen ble regnet ut som volum% etter metode 2A beskrevet i NS 12087:2013, ved bruk av uttrykket:

$$W_{lt} = \frac{m_n - m_0}{V} \times \frac{100}{\rho_w} \quad (8)$$

Hvor m_n er massen i kg etter n døgn, m_0 er tørr masse i kg veid før nedsenking, V er volum i m^3 av prøvestykket i forkant av forsøket, og ρ_w er densiteten til vann satt lik 1000 kg/m^3 .

Vannopptaket siden forrige veiing, samt totalt vannopptak, ble kontinuerlig regnet ut ved å finne differansen mellom henholdsvis m_n og m_{n-7} , og m_n og m_0 . Ettersom prøvestykkene ble veid hver 7. dag, var det mulig å se utviklingen av fuktopptaket over tid.

Ettersom det ble oppdaget ved veiing etter 21 dager at massen på alle EPS-prøvene hadde blitt redusert betraktelig siden forrige veiing, ble det utført en ekstra veiing 2 dager etter. Dette ble gjort for å se om utviklingen fortsatte i samme retning. Av samme grunn ble det bestemt å reproducere forsøket ved bruk av nye EPS-prøvestykker. Dette ble gjort på nøyaktig samme måte som det første forsøket, igangsatt 17. april 2018, og pågikk bare i 4 uker (som er forsøksperioden standarden anbefaler).

3.2.3 Lagring i lufttett boks med 100 % RF

Fire prøvestykker av hver type (EPS1, EPS2, XPS1, XPS2, XPS3) ble veid til nærmeste 0,1 g. En firkantet plastkasse ble plassert på gulvet og rengjort. Det ble lagt en teglstein i hvert hjørne og to på midten. To rister ble plassert horisontalt over, slik at det ble minst mulig fall. Deretter ble det fylt opp vann til omtrent 10 mm under ristene. Ristene ble så tørket av med papir slik at overflaten ble helt tørr. Dette ble gjort med den hensikt at isolasjonen ikke skal trekke til seg ekstra fukt fra ristene. Prøvestykkene ble forsiktig plassert vertikalt i boksen med omtrent 10-20 mm avstand slik at det var fri luft på alle kanter. Metallskinner ble lagt forsiktig over alle prøvestykkene for stabilitet og for å motvirke at prøvestykkene skulle velte. En RF-måler ble lagt over. RF-måleren var tilstede for å kunne måle relativ fuktighet under forsøket for å forsikre seg om at det blir 100% RF i boksen uten å ta av lokket. Temperatur i boksen vil være lik som resten av rommet, som er på $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Etter to dager kunne RF-måleren vise at relativ fuktighet på 100 % var oppnådd.

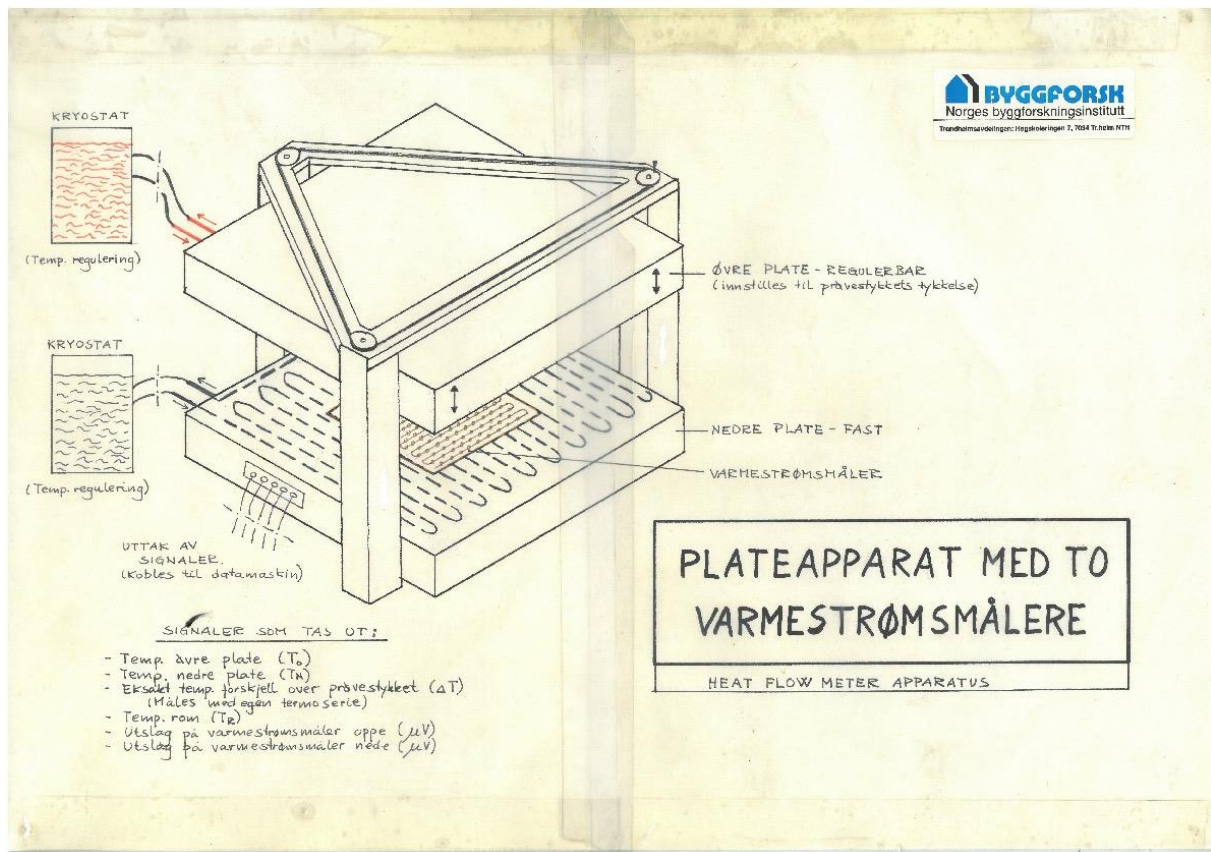
To uker etter igangsettelse, 27. februar 2018, ble lokket tatt av, og metallskinnene ble forsiktig fjernet. Alle prøvestykkene ble veid til nærmeste 0,1 g. Før prøvene ble satt tilbake, ble boksen etterfylt med vann. Det sprutet litt på ristene. De ble derfor tørket av med en tørr klut, før prøvestykkene forsiktig ble plassert vertikalt tilbake i kassen på samme måte som tidligere.

Massen av hvert prøvestykke ble tatt ut av boksen og veid på samme måte hver 14. dag fram til avslutning av forsøket etter 13 uker.

3.2.4 Bestemmelse av varmemotstand etter NS-EN 12667:2001

Bestemmelse av varmemotstand etter NS-EN 12667:2001, metode «5.3 Heat flow meter» ble utført av Per Christian Moe fra SINTEF. Ett prøvestykke av hver av typene (EPS1, EPS2, XPS1, XPS2 og XPS3) à 500 mm x 500 mm som hadde ligget 13 uker fullstendig nedsunket i vann ble benyttet for å forsøke å finne varmemotstanden til vått materiale. I følge standarden skal forsøket gjøres på tørt materiale, som betyr at dette forsøket er litt avvikende fra standardisert metode. Dimensjonene til prøvestykket ble målt nøyaktig i forkant av forsøket, og våt masse ble veid til nærmeste 0,1 gram.

Målingen ble utført ved hjelp av et plateapparat med to varmestrømsmålere («heat flow meter») som vist i Figur 8. Varmestrømsmåleren er en innretning som måler varmestrømmen gjennom prøvestykket ved gitte temperaturforskjeller. Plateapparatet består av en homogen kjerne, en detektor som måler overflatetemperatur og en detektor som måler overflatetemperaturforskjeller. Arealet av innretningen utgjør kun en del av platen som prøvestykket blir lagt oppå. Som figuren viser legges prøvestykket på nedre plate som er fastholdt. Inni platen er det en kryostat som regulerer temperaturen. Under forsøket har nedre plate en temperatur rundt 0°C . Øvre plate er regulerbar og når målingene utføres har den en temperatur på omtrent 20°C .



Figur 8: Plateapparat med to varmemotstandsmålere (Illustrasjon: SINTEF Byggforsk)

Prinsippet for kalibreringen er at apparatet måler varmemotstanden gjennom materialet. Ved hjelp av kjent varmemotstand og varmemotstand til et standard prøvestykke og antagelsen om konstant varmemotstandstetthet av målearealet («metering section») og stabil temperaturdifferanse mellom platene, kan varmemotstand til prøveeksemplaret beregnes. Varmekonduktiviteten beregnes ved hjelp av den målte varmemotstanden, tykkelsen av prøvestykket og gjennomsnittstemperaturen til varm og kald side av prøvestykket.

3.2.5 Kalkulasjon av varmekonduktivitet

Varmekonduktiviteten til prøvestykkene ble i tillegg beregnet etter metode fra Lakatos (2016). Fremgangsmåte er beskrevet i teorikapittelet 2.7 Kalkulasjon av varmekonduktivitet til våt isolasjon. Tørr masse til prøvestykkene ble veid 13.02.18. Prøvestykkenes våte masse ble veid etter 13 uker fullstendig nedsunket i vann, før forsøket for bestemmelse av varmemotstand ble utført. Ved hjelp av disse massene er det dermed mulig å finne en beregnet verdi for varmekonduktiviteten som kan sammenlignes med den målte.

4 Resultater

4.1 Litteraturstudium

4.1.1 Vannabsorpsjon ved nedsenkning etter NS-EN12087:2013

Det er funnet flere studier hvor nedsenkning av plastisolasjon er blitt gjort etter standard NS-EN 12087:2013. Dette forsøket (som nærmere forklart i metodekapittelet) går ut på at prøvestykker av isolasjon blir fullstendig nedsunket i kar med vann, med 50 mm opp til vannspeilet.

Ojanen og Kokko (1997) utførte forsøk basert på denne fremgangsmåten (etter gammel europeisk standard). De brukte tre prøvestykker av EPS med densitet 17,9, 18,0 og 19,8 kg/m³. Forsøket resulterte i et fuktopptak på henholdsvis 4,3, 5,1 og 5,1 volum%. I tillegg til å plassere isolasjonen 50 mm under vannspeilet, testet de påvirkningen av vanntrykk ved å plassere samme type EPS under 350 mm med vann. Dypere nedsenkning medførte en betraktelig økning i fuktopptaket, fra 10-110 % økning.

Mattila (2017) gjorde dette standardiserte forsøket med EPS etter metode 1A, altså at prøvestykket er delvis nedsunket i vann, og utførte veiinger hver 7. dag. Fukttinnholdet varierte for hver veiing, fra 0,1 til 0,2 kg/m³. Artikkelen nevner ingenting om størrelse på prøvestykkene eller densitet, heller ingenting om fuktopptak i volum%.

En studie gjort av Vėjelis og Vaitkus (2006) baseres på resultater av vannabsorpsjon i EPS ved fullstendig nedsenkning i vann. Det ble forsøkt å finne en sammenheng mellom densitet og fuktopptak, og det ble konkludert med at fuktopptaket økte med lavere densitet. I tillegg til den standardiserte tørkemethoden ble to alternative metoder for tørking utprøvd. Densiteten på prøvestykkene var 11-34 kg/m³. Etter forsøksperioden på 28 dager, ble fukttinnholdet beregnet til å være mellom 1,3 og 5 volum%.

Fuktopptak i EPS-plater ble studert av Gnip et al. (2006) for å forsøke å utvikle en prosedyre for å prognostisere langvarig absorpsjon basert på kortsiktig data. 150 prøvestykker med densitet fra 12 til 35 kg/m³ fra ulike produsenter ble testet etter metode 2A og 2B. Fuktopptaket etter 224 dager lå mellom 1 og 6 volum%. Prognoser for økningen av langsiktig fukttinnhold (15 år) ble beskrevet.

4.1.2 Vannabsorpsjon ved nedsenkning etter ASTM C272 og ASTM D2842

Flere artikler beskriver fuktopptaksforsøk gjort etter de amerikanske standardene ASTM C272 og ASTM D 2842, etter eldre og ny versjon. Metoden i ASTM C272 er nokså lik som den etter den norske standarden for bestemmelse av vannabsorpsjon (NS-EN 12087:2013), men forsøksperioden er kun 24 eller 48 timer. Prøvestykkene skal bli kondisjonert i ovn i 24 timer ved $50 \pm 3^{\circ}\text{C}$ eller i 2 timer ved $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ i forkant av nedsenkingen. Etter fuktbelastningen blir prøvestykkene tørket av og umiddelbart veid uten lenger tørkeprosess, og målt opp mot tørr vekt. ASTM D2842 beskriver flere metoder som også baseres på nedsenkingsforsøk. Prøveperioden er på 96 timer. En av metodene i ASTM D2842 går ut på å bestemme vannabsorpsjonen ved å måle oppdriftsendringen etter fullstendig nedsenkning under 5,1 cm vannhøyde i 96 timer.

Dechow og Epstein (1978) beskriver forsøk gjort etter amerikansk standard ASTM D2842 fra 1969 for å finne vannabsorpsjonen i ulike typer plastisolasjon. I følge standarden skal forsøksperioden være 96 timer, men forsøket ble utført i 500 timer (21 dager). Ettersom

samtligge av prøvestykkene fortsatte fuktopptaket etter 96 timer, var det aktuelt å utvide forsøksperioden. EPS-prøvestykkene absorberte fra 0,3 til 7 volum% vann, avhengig av tykkelse, densitet og porevolum. Laveste fuktinnhold tilhørte en EPS-prøve som var 5 cm tykk, med densitet 35,6 kg/m³ og 10 % porer. Den høyeste verdien tilhørte en 3,6 cm tykk EPS-prøve med densitet 21,3 kg/m³ og porevolum på 27 %. 4 cm tykke XPS-prøvestykker med densitet 36,5 kg/m³ og 46,5 kg/m³ absorberte kun 0,3 volum% etter 500 timer.

Isolasjonsmaterialers egenskaper ved vannabsorpsjon ble undersøkt av Forgues (1983) ved å gjøre tre ulike laboratorieforsøk. En av prøvemethodene var etter ASTM D2842, som pågikk i 21 dager i stedet for 96 timer. Resultatene ble sammenlignet med isolasjon som har blitt brukt rundt ringmur i 18 måneder. Det ble konkludert med at fuktopptak i ringmursisolasjon ikke kan prognostiseres eksakt ut ifra ett laboratorieforsøk, men heller flere i kombinasjon.

I en studie omhandlende fuktopptak i plastisolasjon av Cai et al. (2017a), ble laboratorieresultater for EPS og XPS samlet inn. Resultatene fra de studerte forsøkene viser at vannopptaket i XPS etter fullstendig nedsenking etter ASTM C272 og D2842 varierer fra 0,1 til 5,5 volum%. Det ser ut til at prøvestykker med lav densitet tar opp mest vann. Fuktopptaket i EPS-prøvestykkene varierer i enda større grad, fra omtrent 0,5 til 7,8 volum%. I likhet med XPS ser det også her ut til at fuktopptaket er størst for EPS med lav densitet.

4.1.3 Andre nedsenkningsforsøk

Bomberg og Dillon (1984) organiserte forsøk for å studere fuktopptak i tre typer plastisolasjon beskrevet som «closed-cell plastics and cellular glass», i syv ulike laboratorier for sammenligning. Forsøket fulgte ingen bestemt standard, men etter retningslinjer av ASTM. Prøvestykkene ble lagt i vann slik at 10 mm av materialet var under vann og 40 mm over. De ble fjernet fra vannet flere ganger for veiing i løpet av en til sammen 168 timers forsøksperiode. I følge artikkelen skal veiing etter 45 og 180 minutter kunne fastlegge korttids vannopptak, og siste veiing etter 168 timer bestemme langtids-fuktopptaket til isolasjonen. Det resulterte i et fuktinnhold fra 0,06 til 1,97 volum% avhengig av isolasjonsmateriale som ble brukt. I tillegg var det store forskjeller fra de ulike laboratoriene ettersom de ikke utførte forsøkene på nøyaktig samme måte.

Vannabsorpsjonsforsøk ble utført av Ossa og Romo (2012) for å bestemme fuktopptaket i EPS under ulike hydrostatiske trykk. To ulike EPS-prøvestykker, formet sylindrisk med diameter 6,6 cm ble plassert inni et trykkregulert kammer hvor de var nedsunket i 234 dager i et vannløselig medium med gjennomsnittlig temperatur på 23°C. De ble testet under omsluttende trykk på 0, 30 og 60 kPa. Resultatene viste at fuktopptaket var raskest i løpet av de første dagene, og at et høyere omsluttende trykk medførte høyere fuktopptak. Fuktinnholdet nådde etter en langvarig periode asymptotiske verdier rundt 10 volum% og 20 volum% med omsluttende trykk på henholdsvis 30 kPa og 60 kPa.

Pakkala og Lahdensivu (2014) testet over fire år ulike termiske isolasjonstyper for å undersøke fuktopptaket. Metoden la vekt på både immersjon av materialer og frostpåkjenning. Prøvestykkene ble lagt vertikalt fullstendig nedsunket i en vanntank med vannivå 10-20 mm over prøvestykkene. Basert på forsøkene var det klart at fuktopptaket til XPS-prøvestykkene var vesentlig mindre (rundt 0,5 volum%) enn for EPS-prøvestykkene som lå på rundt 3 volum%. For begge typer var fuktopptaket størst den første måneden, før det forholdt seg noenlunde stabilt de resterende 47 månedene. Det mest betydningsfulle resultatet var at nedfrysing av prøvestykkene ikke hadde stor innvirkning på fuktopptaket til XPS-prøvestykkene, men påvirket fuktopptaket til EPS-prøvestykkene veldig mye. Med

frostpåkjenning fortsatte EPS-en å ta opp vann, selv etter 48 måneder. Etter 48 måneder var fuktinnholdet det dobbelte av fuktinnholdet uten frostpåkjenning, og fuktopptaket fortsatte ytterligere. Årsaken til denne oppførselen er antakelig at porestrukturen til EPS ikke er egnet til å motstå spenningen som oppstår av at vannet fryser, blant annet fordi det medfører at sprekker dannes. Videre kan mer vann absorberes inn i EPS-en gjennom sprekker og forårsake sprekker dypere inni prøvestykket, som er grunnen til at absorpsjonen økes for hver fryseperiode.

Sarlin et al. (1986) kuttet ut 50 mm x 1000 mm x 1200 mm prøvestykker av spesialproduserte EPS-plater så nært midten som mulig for å undersøke om trykkforskjeller, indre inhomogeniteter i platen og produksjonsmetode har innvirkning på fuktopptaket. Prøvestykkene med omtrent lik densitet og ulikt indre trykk (varierende fra 500-1150 hPa), ble nedsunket i vann. Fuktopptaket ble bestemt ut i fra oppdriftsendringer. Det viste seg at prøvestykker med lavest indre trykk medførte høyest fuktopptak i volum%. I tillegg ble det lagt vekt på hva mikrostrukturen i EPS-materialet har å si for hvordan fukt transporteres gjennom porene. Dette ble blant annet gjort ved å tilsette farge i vannet som prøvestykkene ble nedsunket i, for i ettertid å studere materialet i mikroskop. Det ble konkludert med at de ovennevnte faktorene påvirkes betraktelig av produksjonsmetode og varierende råmateriale.

Vannabsorpsjon i EPS ble undersøkt av Duškov (1997) ved nedsenkning i vann. Gjennomsnittlig vannopptak til prøvestykkene var 1,54 volum% og 1,56 volum% i løpet av ett år. Det lave fuktopptaket forklares ved at prøvestykkene ble kuttet med varm metalltråd («hot wire») slik at porestrukturen i overflaten ble smeltet igjen som gjør penetrasjon av vann vanskeligere. I tillegg er forholdet mellom overflateareal og volum lite, ettersom de var sylindriske; 200 mm høye og 100 mm i diameter. De gjorde også et forsøk med å lage et undertrykk i isolasjonen, tilnærmet vakuum (-101 kPa) for at vann skulle trekke fortere inn i prøvestykkene. Hvis absolutt vakuum ble oppnådd ville vann trekkes inn i materialet med et trykk på 101 kPa. Det resulterte i et høyt absorpsjonsnivå på mye kortere tid. Prøvestykkene ble deformert og ikke brukbare til nye forsøk, selv kun med et undertrykk på 30 % av vakuum. Undersøkelsen viste at hvis porestrukturen blir ødelagt, vil både deformasjonen av EPS og vannopptaket øke betraktelig.

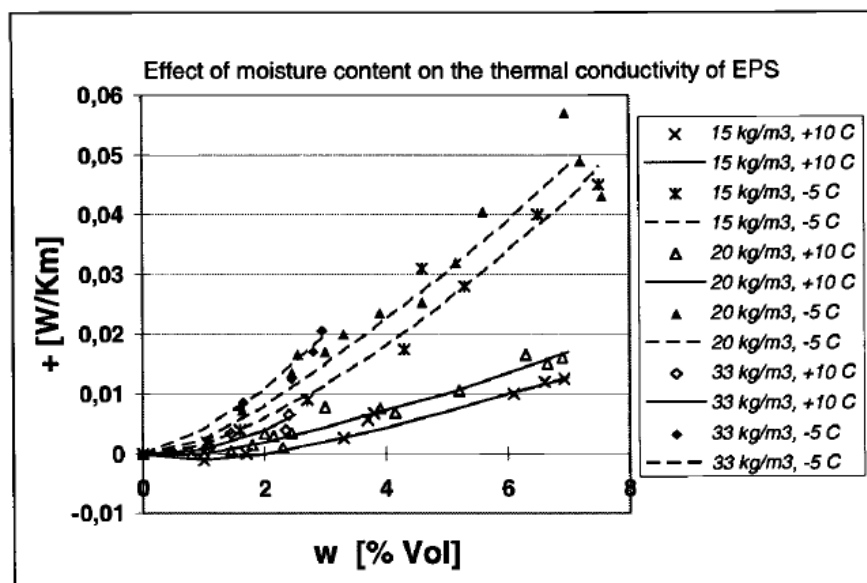
Jerman og Černý (2012) utførte i tillegg til andre målinger, absorpsjonsforsøk for å bestemme fuktdiffusiviteten. Den ble bestemt ved nedsenkingsforsøk hvor oppdriftsendring ble målt, samt ved «kapasitansmetode» («capacitance-method») som baseres på kapillærkrefter. En funksjon av fuktdiffusivitet versus fuktinnhold ble brukt til beregning. I tillegg ble «koppmetoden» («cup-method») utført, basert på endimensjonal vandampdiffusjon under stasjonær og isoterm tilstand. EPS med deklarerert varmekonduktivitet på 0,037 W/mK endte med en λ -verdi på 0,051 W/mK etter befuktingen, og fuktdiffusiviteten økte raskt i takt med fuktopptaket.

4.1.4 Vannabsorpsjon ved diffusjon og varmekonduktivetsmålinger

Mange studier baseres på vannabsorpsjon i plastisolasjon ved diffusjon, for så på ulike måter å måle varmemotstanden til fuktig materiale. I en studie gjort av Lakatos og Kalmár (2012) ble det utført varmekonduktivetsmålinger ved bruk av et varmefluksapparat («Holometrix 2000»). Sorpsjonsegenskapene til ulike typer ekspandert polystyren med forskjellige densiteter ble undersøkt i en Climacell 111 hvor relativ fuktighet varierte fra 25 % til 90 % ved 20°C i 240 minutter. Resultatet ble presentert som fuktopptak i forhold til relativ fuktighet, og en kan se at fuktopptaket har et stort sprang når relativ fuktighet går fra 0 % RF til 30 % RF. Med relativ fuktighet på 30 % og høyere har fuktopptaket en minimal, jevn

stigning. Varmekonduktivetsmålingene viste at λ -verdien økte jevnt med volum% fuktopptak. Omtrent samme forsøk ble utført av Lakatos (2016). Dette resulterte i at endringen av varmekonduktiviteten på grunn av fuktopptaket drevet av ulik relativ fuktighet og temperatur, omtrent er neglisjerbart i tilfeller med XPS.

Ojanen og Kokko (1997) utførte varmekonduktivetsforsøk av fuktig EPS-isolasjon for å undersøke korrelasjonen mellom fuktinnhold og endring i λ -verdi. Varmekonduktiviteten ble målt ved gjennomsnittlig +10°C og ved -5°C. Figur 9 viser økningen av varmekonduktivitet med økt fuktinnhold, samt temperaturen EPS-en ble utsatt for. Omtrent samme prosedyre ble gjort av Sandberg (1986) hvor forsøkene ble utført på EPS og XPS som hadde vært i bakken i 8-16 måneder. Varmekonduktiviteten økte med økt fuktinnhold, og ble målt til i gjennomsnitt å være 1,8 % høyere ved +5°C enn ved -5°C for XPS, og 9 % høyere for EPS.



Figur 9: Sammenheng mellom varmekonduktivitet og fuktinnhold i EPS-isolasjon (Ojanen og Kokko, 1997).

I samme artikkel av Ojanen og Kokko (1997) ble det beskrevet et forsøk som ble gjort for å studere fuktopptaket i to typer EPS ved diffusjon, gjort i henhold til prEN 12088:1997. Forsøket går ut på at EPS-prøvestykket får en kald og en varm side. Varm side skapes ved at prøvestykkene ligger over et vannbad som forårsaker 100 % relativ fuktighet og høy diffusjon av vanddamp oppover. Kald side er i kontakt med en kald plate over. Temperaturforholdene korresponderer dermed med temperaturen til vannbadet og til den kalde platen som ble variert mellom +50°C/+1°C, +25°C/+1°C og +10°C/-10°C. Etter forsøksperioden på 28 dager ble fuktopptaket målt. EPS-prøvestykkene med densitet 18,6 kg/m³ hadde et fuktinnhold på 6,2 volum%, 1,1 volum% og 0,43 volum% ved de ulike temperaturforskjellene. Prøvestykket med densitet 17,1 kg/m³ hadde et fuktinnhold på 5,5 volum%, 1,9 volum% og 0,66 volum%. Dette viser at fuktopptaket var høyere i dette forsøket sammenlignet med nedsenkningsforsøket.

Dechow og Epstein (1978) gjorde i likhet med Ojanen og Kokko, forsøk hvor både temperaturgradienten per cm tykkelse og et miljø med høyt fuktinnhold ble benyttet for å drive vann inn i prøvestykkene. Dette ble gjennomført ved at prøvestykkene à 500 mm x 500 mm ble plassert mellom en kald flate på 1 °C og et vannbad med temperatur regulert mellom 40 og 60°C. I løpet av forsøksperioden på 28 dager ble prøvestykket snudd en gang per dag.

Vannabsorpsjonen hadde en jevn stigning gjennom hele forsøket. XPS endte med et fuktopptak på rundt 2 volum%, mens EPS med høy og lav densitet hadde et fuktopptak på henholdsvis 11 og 25 volum%. Lignende forsøk ble utført av Epstein og Putnam (1977), som fikk resultater i samme sjiktet. XPS endte med et fuktinnhold på rundt 2 volum% og 7 volum%, mens de ulike EPS-prøvestykkene hadde et fuktinnhold mellom 11 og 12 volum%.

En artikkel skrevet av Šadauskienė et al. (2009) presenterer ulike materialegenskaper til ekspandert polystyren, samt innvirkningen av fukt på varmekonduktiviteten. Det ble gjort målinger av varmekonduktivitet etter at EPS var blitt eksponert for fuktig luft. Resultatet av forsøket viser at varmekonduktivitetsverdien til EPS kondisjonert i luft med 80 % relativ fuktighet økte med omtrent 0,001 W/mK, og EPS kondisjonert i 97 % relativ fuktighet økte med 0,002 W/mK.

Et forsøk basert på samme prinsipp om å danne en varm og kald side av et prøvestykke for å skape en temperaturgradient ble gjort av Auracher (1978). I forsøket ble det benyttet et kalorimeter, og innbefattet målinger av varmeledning og diffusjon av fuktige, porøse materialer. Eksperimentet ble gjennomført i løpet av befuktingsprosessen på en måte slik at lokal varmekonduktivitet og lokal diffusivitet kunne bestemmes som en funksjon av kontinuerlig økende fuktinnhold. Resultatene viste at distribusjonen av fuktinnhold i de enkelte porene kan ha vesentlig betydning for varmekonduktiviteten i fuktige, porøse materialer (som EPS). Lignende forsøk ble gjort av Kočí et al. (2017). De forsøkte å drive fukt inn i EPS, for deretter å måle varmekonduktiviteten. Forsøket resulterte i et fuktinnhold på kun 3,3 volum%, som medførte at varmekonduktiviteten til EPS forble praktisk talt uforandret.

Lignende forsøk hvor det genereres en temperaturgradient og ulik relativ fuktighet for å måle varmekonduktivitet i fuktig plastisolasjon er gjort av flere (Levy, 1966, Tobiassen og Ricard, 1979, Bomberg, 1989, Hoffee, 1989, Tobiassen et al., 1986, Lakatos, 2012, Zar og Pintar, 2012, Szodrai og Lakatos, 2014, Alvey et al., 2017). Resultatene er noenlunde like: varmekonduktiviteten til EPS etter vannabsorpsjon ved diffusjon ble påvirket, mens varmekonduktiviteten til XPS ikke ble påvirket i stor grad.

4.1.5 Andre forsøk for å måle fuktopptak

I forbindelse med et prosjekt gjort i samarbeid med «National Research Council Canada» prøvde Bomberg og Kumaran (1995) å finne en prøvemetode for å bestemme langsiktig fuktopptak i plastisolasjon. De utførte forsøk i fire ulike eksponeringssituasjoner: «isoterm eksponering», «tørr kopp» eksponering, «våt kopp» eksponering og «fryse-tine-sykluser» etter 7 dager med «våt kopp» eksponering. I tillegg ble påvirkningen av en temperaturgradient alene og effekten av fukt sammen med temperaturgradient studert.

Ojanen og Kokko (1997) har gjennomført i tillegg til standardiserte forsøk, andre metoder for å se hvordan ulike faktorer påvirker fuktopptak til EPS. De har forsøkt å finne en metode som best mulig kan relateres til virkelige eksponeringssituasjoner. For å se påvirkningen av lufttrykk, ble tre prøvestykker av samme EPS-produkt nedsunket i vann i 28 dager. Prøvestykke 1 ble plassert i et rom under normalt atmosfæretrykk mens prøvestykke 2 og 3 ble plassert i et trykkabinett så trykket kunne reguleres. Det totale trykket ble endret ukentlig mellom normalt trykk og et trykk som tilsvarer 500 mm vannhøyde. Dette korresponderer med den maksimalt mulige trykkendringen som kan forekomme i vanlig luft. Forskjellen var åpenbar: prøvestykke 1, 2 og 3 hadde et fuktopptak på henholdsvis 4,3, 5,4 og 5,8 volum%. Dette tilsvarer en økning av fuktopptak på omtrent 25-35 %. En konklusjon de dermed kom

fram til er at ettersom atmosfæretrykket alltid forandrer seg, er ikke nedsenkningsforsøk fullstendig sammenlignbare. I tillegg ble det gjort et forsøk hvor allerede fuktige EPS-prøvestykker (med vanninnhold på 4-7,5 volum%) ble plassert i våt sand med ulik høyde ned til vannspeilet. Hensikten var å undersøke uttørkingsmulighetene til EPS i bakken. Det viste seg at EPS kan tørke under bakken, ettersom den fuktige isolasjonen etter 4 uker under bakken med 100 mm og 200 mm ned til vannspeilet hadde redusert fuktinnhold til henholdsvis 1,5 volum% og 0,1 volum%.

I forbindelse med å undersøke de viktigste hygrotermiske egenskapene til ulike isolasjonsmaterialer utførte Ducoulombier og Lafhaj (2017) mange forskjellige forsøk. Varmekonduktiviteten ble målt ved «guarded hot-plate»-metoden, spesifikk varmekapasitet ved «calvet-metoden», «tørrkopp»-metoden ble gjort for å bestemme vandampmotstandsfaktoren ved diffusjon, samt vannabsorpsjonskoeffisient ble funnet ved delvis nedsenkning. Alle forsøkene ble gjort i henhold til franske standarder (identisk med europeisk standard som også brukes i Norge). Fremgangsmåte er beskrevet i artikkelen. I tillegg ble det lagd sorpsjonskurver for isolasjonsmaterialer med ulike densiteter, hvor fuktinnholdet ble målt i relativ fuktighet som varierte fra 50 volum% til 97 volum%.

4.2 Laboratorieforsøk og beregninger

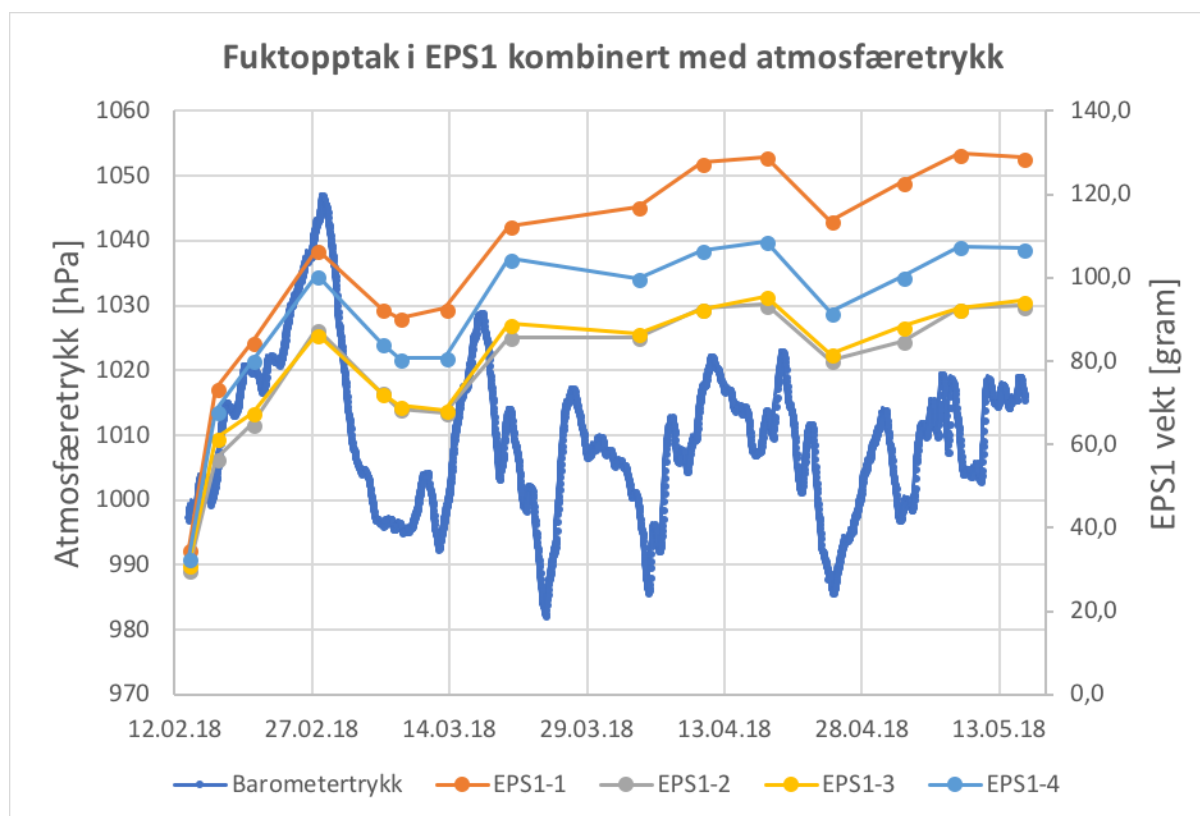
4.2.1 Vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking etter NS-EN 12087:2013

Vannopptaket i plastisolasjonen ble beregnet etter formel (8). Resultatene av forsøket hvor EPS og XPS var nedsenket i vann i 13 uker er listet opp i Tabell 6. Som en kan se er graden av vannabsorpsjon betydelig høyere for EPS-prøvestykkene enn for XPS.

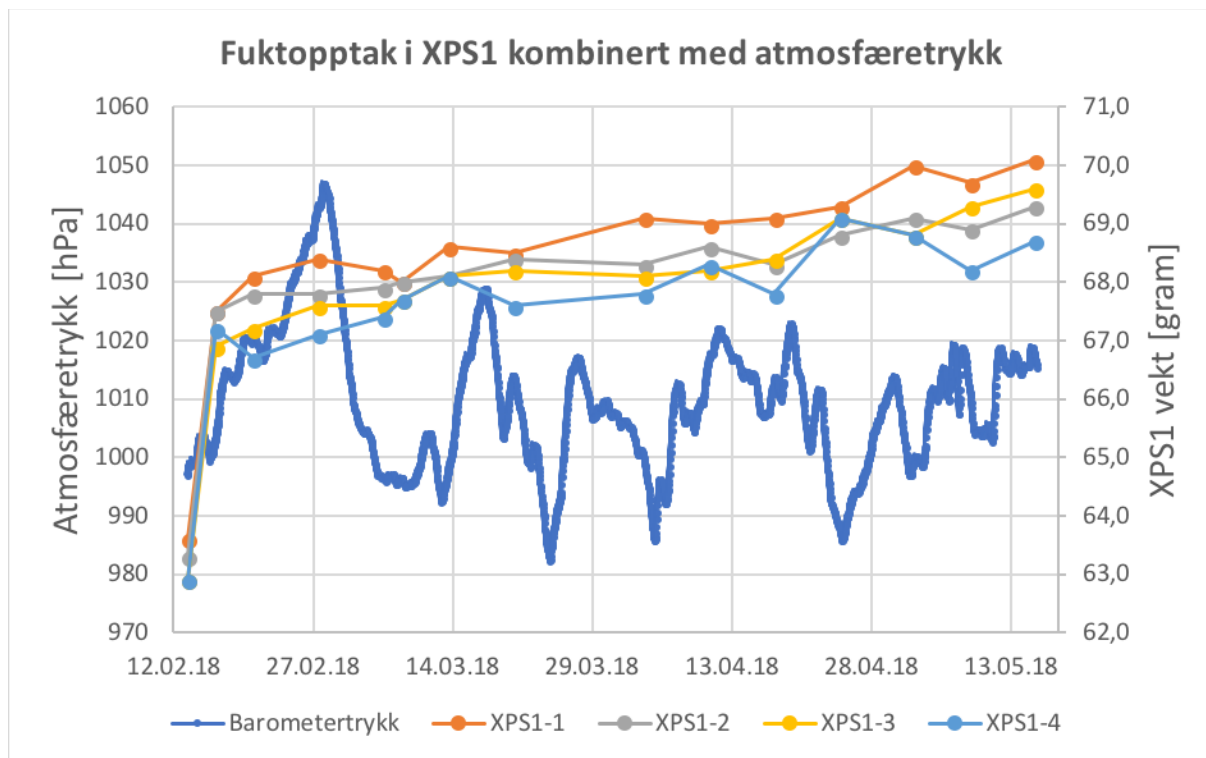
Tabell 6: Totalt vannopptak i EPS og XPS i volum% etter 13 uker.

Type	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4
EPS1	4,70	3,16	3,17	3,72
EPS2	6,07	5,16	6,13	6,74
XPS1	0,33	0,30	0,34	0,29
XPS2	0,19	0,18	0,17	0,18
XPS3	0,18	0,17	0,19	0,20

Figur 10 og Figur 11 viser fuktopptaket i henholdsvis EPS1 og XPS1 kombinert med atmosfæretrykket som forekom i løpet av forsøksperioden. Vi ser at grafen for fuktopptak i EPS1 i **Error! Reference source not found.** varierer veldig fra prøvestykke til prøvestykke, samt korrelerer omtrent perfekt med grafen for atmosfæretrykket. Figur 11 viser ikke samme korrelasjon mellom fuktopptak i XPS og atmosfæretrykket. Som grafen for fuktopptak i XPS viser, tar prøvestykkene opp over halvparten av vannet i løpet av de tre første dagene. Resten av forsøksperioden varierer fukttinnholdet, men har en stigende tendens. Det kan dermed virke som XPS ikke blir påvirket av varierende atmosfæretrykk. Grafene til de resterende typene av EPS og XPS er lagt ved i vedlegg B. Disse grafene viser samme tendenser som **Error! Reference source not found.** og Figur 11.



Figur 10: Fuktopptak i EPS1 kombinert med atmosfæretrykk.



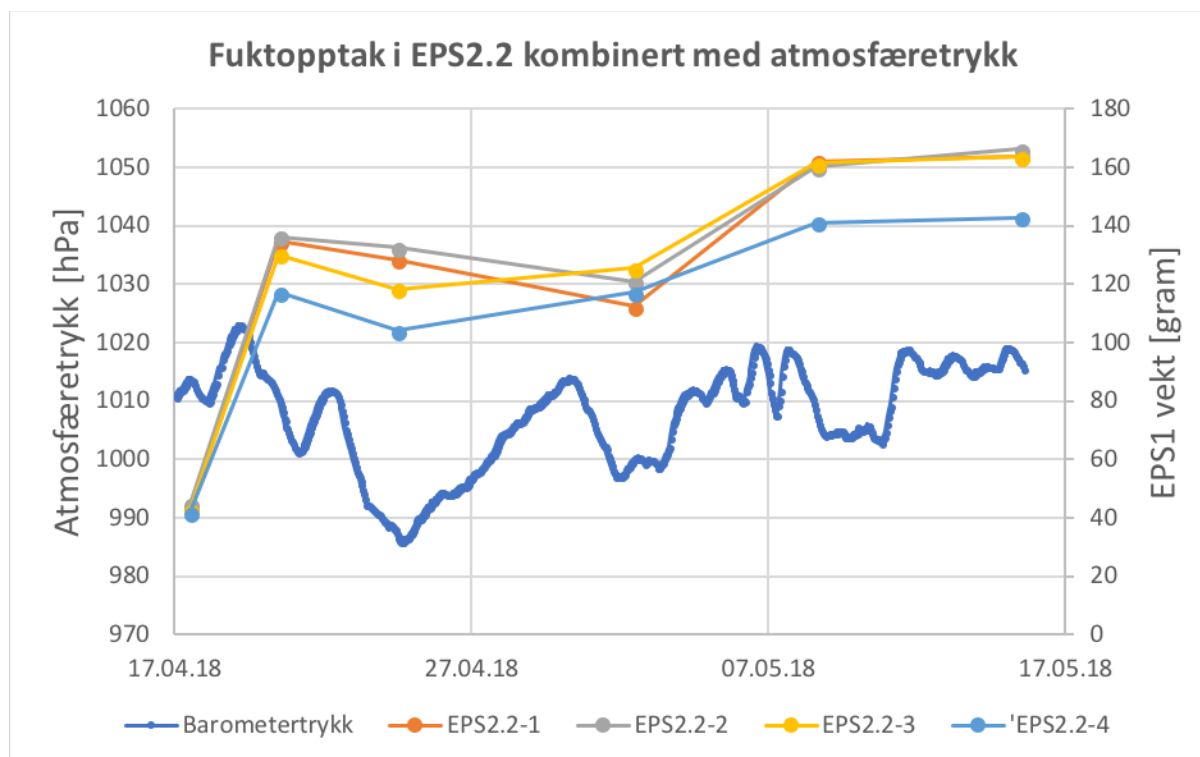
Figur 11: Fuktopptak i XPS1 kombinert med atmosfæretrykk. Merk skalering av høyre vertikalakse.

Vannopptaket i EPS ved reproduksjonen av forsøket etter den 28 dager forsøksperioden vises i Tabell 7.

Tabell 7: Totalt vannopptak i EPS i volum% etter 28 dager.

Type	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4
EPS1	3,40	3,32	3,15	3,74
EPS2	6,00	6,09	6,05	5,05
EPS3	4,32	4,52	4,75	4,21
EPS4	4,48	4,46	4,07	3,87

Figur 12 viser fuktopptak i EPS2.2 (type 2, forsøk 2) kombinert med atmosfæretrykket i løpet den fire uker lange perioden til reproduksjon av forsøket. Det ser ut til at fuktopptaket også her blir påvirket sterkt av atmosfæretrykket ettersom fuktopptaket minker når grafen for atmosfæretrykk har et bunnpunkt. Det er ikke like stor variasjon i fuktopptaket mellom prøveeksemplarene av hver type i dette forsøket sammenlignet med prøvene i forsøket som ble påbegynt i februar. Grafer for de resterende typene fra reproduksjonen av forsøket er lagt ved i vedlegg C. Disse viser noenlunde samme utvikling som graf for EPS2.2 i Figur 12.



Figur 12: Fuktopptak i EPS2.2 (type 2, forsøk 2) kombinert med atmosfæretrykk

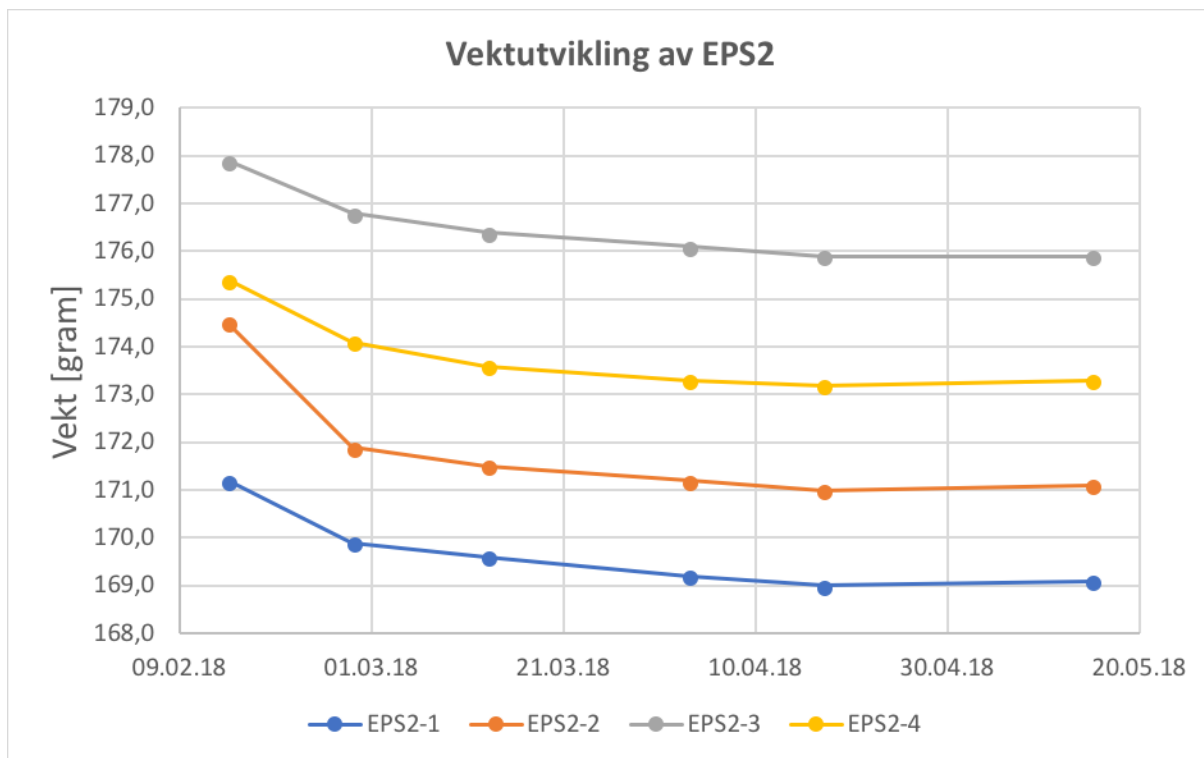
4.2.2 Lagring i lufttett boks med 100 % RF

Som Tabell 8 viser, har alle EPS-prøvestykkene redusert massen med 0,9-3,4 gram etter 13 uker eksponering for vannmettet luft. Alle XPS-prøvestykkene har økt massen med 1,4-3,5 gram, se Tabell 8.

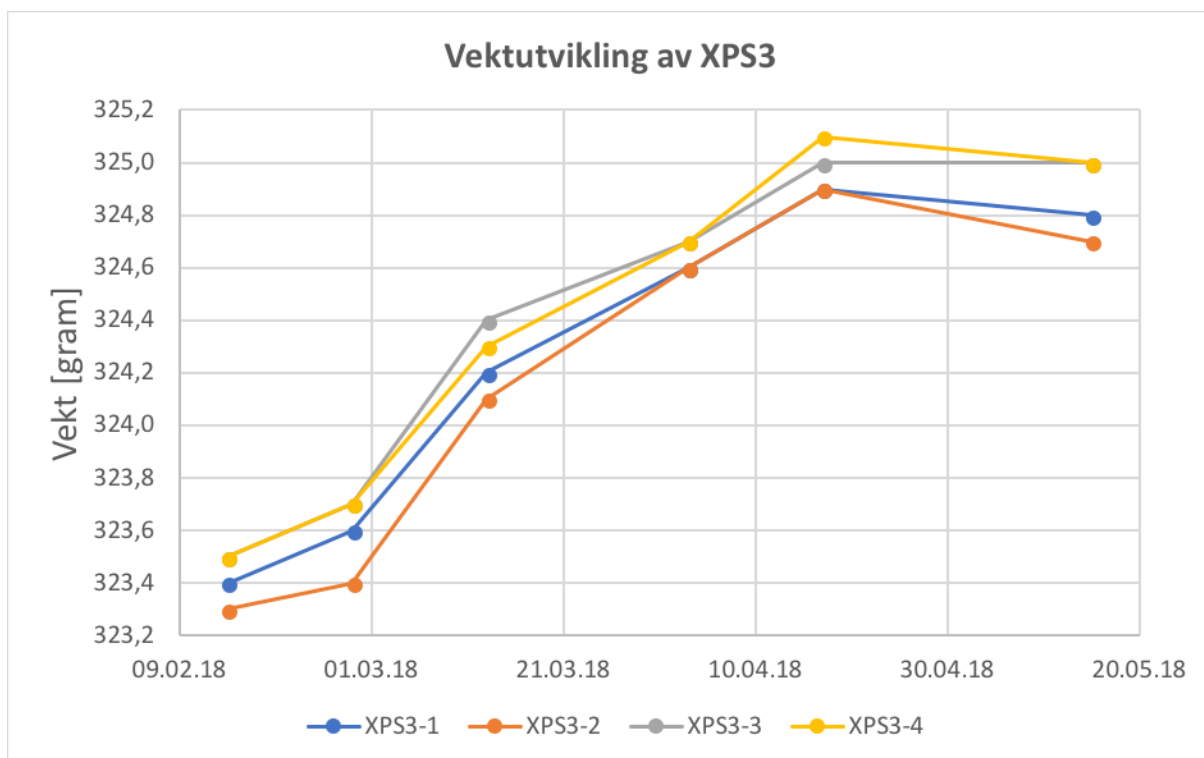
Tabell 8: Total vektforskjell i gram etter 13 uker.

Type	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4
EPS1	-0,9	-1,1	-1,2	-1,9
EPS2	-2,1	-3,4	-2,0	-2,1
XPS1	3,5	3,4	3,5	3,4
XPS2	2,2	2,2	2,2	2,1
XPS3	1,4	1,4	1,5	1,5

Utviklingen av vekten (i gram) til EPS1 og XPS3 er henholdsvis vist av Figur 13 og Figur 14. Se vedlegg D for grafene for vektutviklingen til de resterende typene. Som en kan se ut ifra grafen i Figur 13 har vekten av EPS2 avtatt, mens grafen for XPS3 (Figur 14) er stigende.



Figur 13: Vektutvikling av EPS2 ved eksponering for fuktig luft.



Figur 14: Vektutvikling av XPS3 ved eksponering for fuktig luft.

4.2.3 Bestemmelse av varmemotstand etter NS-EN 12667:2001

Varmekonduktivitetsverdien til de fuktige EPS- og XPS-prøvestykkene bestemt etter metode beskrevet i NS-EN 12667:2001 er listet opp i Tabell 9. Se vedlegg E og F for fullstendig rapport for måling av varmemotstand til EPS og XPS utført av Per Christian Moe ved

SINTEF Byggforsk. Forskjellen mellom deklarerert og målt våt varmekonduktivitet er på det meste 0,006 W/mK. Som forholdet mellom våt og deklarerert verdi viser, er varmekonduktiviteten for vått materiale mellom 4,7 og 18,1 % høyere enn deklarerert verdi.

Tabell 9: Målt tykkelse, varmemotstand og varmekonduktivitet av våte prøvestykker av EPS og XPS

Type	Deklarert varmekonduktivitet, (λ_d) [W/mK]	Tykkelse ved måling [mm]	Varmemotstand (R) [m ² K/W]	Varmekonduktivitet av vått materiale, (λ_w) [W/mK]	$\frac{\lambda_w}{\lambda_d}$
EPS1	0,035	49,6	1,27	0,0391	1,118
EPS2	0,038	50,0	1,19	0,0421	1,108
XPS1	0,033	49,4	1,27	0,0390	1,181
XPS2	0,033	49,7	1,42	0,0350	1,062
XPS3	0,033	49,1	1,42	0,0346	1,047

4.2.4 Kalkulasjon av varmekonduktivitet

Varmekonduktiviteten av vått materiale ble beregnet etter formel (5) og (6) i teorikapittelet 2.7 Kalkulasjon av varmekonduktivitet til våt isolasjon. Resultatene vises i Tabell 10. Som vi kan se, har varmekonduktiviteten til våt EPS økt med omtrent 3,7 %. Det ser ut til at varmekonduktiviteten til XPS ikke har endret seg.

Tabell 10: Beregnet varmekonduktivitet til tørr og våt isolasjon

Type	Vannopptak, beregnet etter NS-EN 12087:2013 [volum%]	Vanninnhold, (ω) [volum%]	Deklarert varmekonduktivitet, (λ_d) [W/mK]	Varmekonduktivitet av vått materiale, (λ_w) [W/mK]	$\frac{\lambda_w}{\lambda_d}$
EPS1	3,26	1,88	0,035	0,036	1,037
EPS2	4,14	1,86	0,038	0,039	1,037
XPS1	0,11	0,04	0,033	0,033	1,000
XPS2	0,06	0,02	0,033	0,033	1,000
XPS3	0,07	0,02	0,033	0,033	1,000

5 Diskusjon

5.1 Vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking etter NS-EN 12087:2013

5.1.1 Feilkilder under forsøket

Plastkarene hvor isolasjonen ble lagt, ble fylt med vann fra en ordinær vannslange. Det er mulig at vanntrykket til tider var for stort slik at små biter løsnet fra EPS-prøvestykkene. Dette kan føre til at vann trenger litt fortere inn mot senter av prøvestykket akkurat der perlene løsnet. Det har antakelig liten påvirkning ettersom at vann trenger inn i porestrukturen gjennom resten av prøvestykket. Dermed utgjør et par løsnede perler liten andel av hulrommene mellom boblene hvor vann kan trenge inn. EPS har heller ingen «beskyttelsesfilm» på utsiden for å hindre fuktinntrengning som eventuelt kunne blitt ødelagt. Det er lite sannsynlig at små deler løsnet fra XPS-prøvestykkene ettersom dens materialstruktur er mye fastere og cellene er «sveist» veldig mye bedre sammen sammenlignet med EPS.

Det var små rifter i noen av prøvestykkene fra før forsøket ble igangsatt, blant annet grunnet transport og eventuelt hardhendt håndtering i forkant. I tillegg ble noen av prøvestykkene skadet på flatsiden av risten som ble lagt over for å fordele lasten av de vannfylte bøttene. I tillegg kan rifter ha oppstått når prøvestykkene ble flyttet og veid, selv om det ble forsøkt å være varsom. Dette kan ha ført til et høyere fuktopptak for EPS ettersom vann kan trenge lettere inn gjennom rifter. Prøvestykke nummer 2 av type EPS3 ble relativt stygt skadet på flatsiden da det ble tatt ut av vannkaret ved andre veiing. Dette kan være en av årsakene til at dette prøvestykket endte opp med et fuktinnhold på inntil 11 gram høyere enn resten. Rifter på XPS-prøvestykkene kan ha skadet «beskyttelsesfilmen» på flatsidene av prøvestykkene. Likevel virker det ikke som de har tatt vesentlig skade av det, ettersom riftene ikke har trengt gjennom hele filmen og fuktopptaket til de respektive prøvestykkene ikke har vært utslagsgivende.

Selv om kuttingen av prøvestykkene ble gjort meget nøye med en båndsag, kan ujevne kutt ha forekommet, samt at varmen fra båndsagen kan ha ført til at noen av sidene ble «brent». Dette kan ha ført til at porestrukturen i overflaten delvis ble smeltet igjen, noe som gjør penetrasjon av vann vanskeligere. Kantene av prøvestykkene vil uansett oppføre seg annerledes enn resten av prøvestykket ettersom de sammensveiste boblene vil bli kuttet av og bryte opp porestrukturen slik at vann lettere kan trenge gjennom. Dette skjer antakelig i høyere grad for XPS siden porestrukturen er beskyttet av en tynn film som er mer fuktavstøtende på flatsidene. Derfor kan forholdet mellom dimensjonene av flatside og kant ha påvirkning på fuktopptaket. Et større flatsideareal vil gi lavere fuktopptak, og større andel kantsider i forhold til flatside vil gi høyere fuktopptak. Likevel vil ikke et prøvestykke med mindre tykkelse gi et lavere fuktinnhold i volum% ettersom vannet som trenger inn, fortere vil nå senter av platen.

Mursteinen brukt som last i det ene vannkaret kan ha tatt opp en del vann ettersom det er et porøst materiale. Det kan ha medvirket til at vannstanden var betydelig lavere enn i de andre kassene før første veiing. Dette kan føre til at trykket vannhøyden over prøvestykkene skaper, kan ha vært litt mindre. Mursteinen etter fuktopptaket vil være tyngre enn i tørr tilstand, så lasten prøvestykkene ble utsatt for har i prinsippet ikke endret seg. Det viste ingen betydelig forskjell på fuktopptaket til de enkelte prøvestykkene som hadde ligget i denne kassen sammenlignet med de andre.

I følge standard NS 12087:2013 skal vekten av lasten over isolasjonsstykkene være så stor at det akkurat motvirker oppdriften av dem. Liten last ble i første omgang lagt over, for så å øke den, slik at man fant den lasten som akkurat holdt prøvestykkene under vann. Det er likevel en mulighet for at denne lasten kan være for stor i noen av tilfellene ettersom det var vanskelig å få det helt nøyaktig og oppdriften av isolasjonsprøvestykkene ble mindre etter hvert som de absorberte vann. Om vekten fra lasten er større enn oppdriftskreftene fra isolasjonen kan det medføre et lavere vannopptak ettersom lasten skaper et høyere trykk som vil presse porestrukturen sammen. Denne effekten kan likevel være avhengig av densitet og porestruktur, og det er vanskelig å si om det spiller noen rolle.

Under første veiing ble vanndråper liggende på overflaten av prøvestykkene, spesielt på XPS-eksemplarene. Dette kan ha medført litt høyere vekt og tilsynelatende høyere fuktopptak enn på de senere veiingene hvor disse dråpene først ble ristet av. Ved første veiing ble den samme risten som lå over isolasjonen under lasten, brukt som underlag ved tørking. Den ble ikke tørket av på forhånd og var derfor våt. Dette kan ha ført til dårligere tørking av prøvestykkene enn de senere gangene siden risten da ble tørket av med en tørr klut før isolasjonen ble plassert oppå. Den dårlige tørkingen ved første veiing kan ha bidratt til et høyere målt fuktinnhold i prøvestykkene sammenlignet med senere veiinger.

Den ene risten som kontinuerlig har stått i karet som ble brukt til tørking av prøvestykkene, har ikke blitt tørket av mellom hver tørkeprosess. Risten og skinnen som prøvene ble tørket på, ble våt. De burde antakelig blitt tørket av mellom hver gang, men det har ikke blitt gjort. Dette kan ha stor påvirkning på tørkeprosessen.

I henhold til standarden skal tørkingen skje ved hjelp av to nettingrister stilt i 45 grader, hvor prøvestykkene skal hvile stående på kortsiden. I det utførte forsøket ble prøvestykkene lagt ned på flatsiden på rister av metall. Dette kan påvirke tørkingsgraden. Skal forsøket gjøres igjen, bør det vurderes å tørke prøvestykkene på kortsiden.

Prøvene ble veid stående på vekta. Det lå alltid litt vann igjen under som rant ut av prøven på de to sekundene det tok å lese av vekten. Dette tilsvarer omtrent 0,1 gram. Resultatet av målt vekt blir det samme, men det kunne vært en mulighet å tørke de liggende slik at ikke like mye vann renner ut av prøven.

5.1.2 Er fuktopptaket densitetsavhengig?

EPS-prøvestykkene har veldig ulik tørr vekt, og dermed ulik densitet. Dette kan være en av årsakene til at de tar opp ulik mengde vann. Resultater fra forsøk gjort i dette studiet viser at EPS1 med lavest densitet tar opp mindre vann enn EPS2 med høyere densitet, både i gram og når volum% betraktes. Dette stemmer ikke overens med andre studier som har konkludert med at jo lavere densiteten er, jo høyere er fuktopptaket (Lakatos og Kalmar, 2012, Pakkala og Lahdensivu, 2014, Cai et al., 2017). I følge Vėjelis og Vaitkus (2006) avhenger fuktopptaket til EPS av porestrukturen i platene. De mener at jo mer åpen porestrukturen er, altså lavere densitet og mindre andel lukkede porer, jo lavere er vannabsorpsjonen. Sarlin et al. (1986) nevner at forskjellen i densitet av EPS-prøvestykkene de brukte i nedsenkingsforsøk var veldig små, som dermed medførte små avvik i vannabsorpsjon. De mener at fuktopptaket til EPS er densitetsavhengig, men bemerker også at porestrukturen er en viktig faktor. Det hersker altså stor uenighet i litteraturen om fuktopptaket til plastisolasjon er densitetsavhengig.

Variierende resultater av fuktopptak kommer av at EPS er et porøst materiale og sammensetningen av porer, gass og fast materiale varierer veldig i hver plate, og fra plate til plate, selv med samme gjennomsnittlig målt densitet. I følge Thomas Rostøl fra isolasjonsprodusenten GLAVA (mailkorrespondanse, 28.02.18) vil «fuktopptaket til isolasjon innenfor samme produsent være forskjellig fra pakke til pakke. Høy temperatur i formene limer perlene godt sammen og gir et lavere fuktopptak enn hva kald temperatur under produksjon gjør. Dessverre er temperaturen vanskelig å holde helt jevn, og det vil bli variasjoner som gjør at plater ikke har uniform oppførsel». Han mener det derfor kan være lurt å teste mer enn én pakke. Det vil si at de fire prøvestykkene som blir brukt av hver type i forsøket vil ha varierende fuktopptak. Både på grunn av variasjon i plate til plate, men og lokale variasjoner i hver plate. Dette nevnes også av Zar og Pintar (2012).

Lars Valentin fra isolasjonsprodusenten Sundolitt nevner i telefonsamtale (28.02.18) også at produksjonsprosessen har mer å si for fuktopptaket enn hva densiteten har. Typiske resultater Sundolitt pleier å få er at EPS får et vanninnhold på 3-4 volum% etter fullstendig nedsenking i vann i 4 uker, etter prosedyre beskrevet i NS-EN 12087:2013. Dette fuktopptaket er ikke så avhengig av hvilken trykkfasthet platen har, men mer avhengig av hvordan produksjonsprosessen var til akkurat den platen. EPS blir produsert av polystyrenperler med ulik størrelse. Porestrukturen er et resultat av størrelsen på perlene. Store perler har færre kontaktpunkter enn små perler. Færre og større perler gir færre og større kanaler, på samme måte som små perler medfører mange små kanaler. Dette gir ulik porestruktur, men samme sluttresultat med tanke på trykkfasthet og varmekonduktivitet. Derfor blir ikke densiteten deklarerert og inkludert i produktdatabladene. Skjærer en opp en plate, kan en se på snittet hvor tett perlene er sveist og perlestørrelsen. Hvis det er noe manglende sveist areal, altså uregelmessige kanaler i platen kan dette ha påvirkning på fuktopptaket ved at vann lettere kan trenge gjennom. Hver enkelt perle består av små celler med lukket cellestruktur, men sammensveisingen og de uregelmessige kanalene medfører at EPS har en delvis åpen porestruktur. Vanninntrenging på hver enkelt perle skal være relativt likt som for en plate av ekstrudert polystyren. I følge Sarlin et al. (1986) vil ikke polystyrenet i seg selv absorbere noe særlig vann, kun omtrent 0,05 %, men som nevnt før heller legge seg i porene. XPS er derimot et mer uniformt materiale, porene er lukket og porestrukturen varierer dermed ikke i samme grad som EPS. En kan si at XPS er en «uendelig bra sveist EPS».

Resultater fra en studie gjort av Ossa og Romo (2012) underbygger resultatene fra forsøk i denne oppgaven om at fuktopptak i EPS ikke er densitetsavhengig, det gjør også Valentins og Rostøls uttalelser. Ossa og Romo nevner også at mindre tetthet av perler antyder større størrelse på de ekspanderte perlene. Følgelig kan forskjellen i vannabsorpsjonsgraden til EPS-platene med ulik densitet og eksponert for samme trykk forklares med at de er produsert av polystyrengranulater med forskjellige størrelser, og dermed har ulik porøsitet.

I følge resultater fra forsøk i denne oppgaven, kan det virke som at fuktopptaket til XPS avhenger av trykkfastheten, og dermed også densiteten. Hvert prøvestykke av de tre typene XPS som ble brukt i forsøket har omtrent samme beregnet densitet, kun $0,5 \text{ kg/m}^3$ skiller de fra hverandre. Det er tydelig at variasjonen er veldig mye mindre enn hos EPS hvor det for type 1 er 2 kg/m^3 som skiller de ulike eksemplarenes densitet. XPS type 1,2 og 3 med gjennomsnittlig densitet henholdsvis $31,6 \text{ kg/m}^3$, $36,0 \text{ kg/m}^3$ og $40,6 \text{ kg/m}^3$, har etter forsøksperioden tatt opp ulike mengder vann. Prøvestykkene av XPS type 1 har tatt opp mest vann, rundt 6 gram, og har høyest beregnet volum% på rundt 0,3. XPS type 2 og 3 har tatt opp omtrent lik mengde vann, begge mindre enn type 1. Dette stemmer overens med konklusjoner fra de ovennevnte studier (Lakatos og Kalmar, 2012, Pakkala og Lahdensivu, 2014, Cai et al,

2017). Noen av prøvestykkene av XPS type 2 har tatt opp mindre vann enn type 3, som medfører at XPS type 2 får en høyere beregnet volum% ettersom type 3 har høyere densitet enn type 2. Selv om porestrukturen til XPS er lukket og mer uniform enn EPS, vil det mest sannsynlig også her være ørsmå variasjoner i produksjon og dermed i porestrukturen til ulike plater. Dette kan være en årsak til avvikene. Om XPS med lavere densitet medfører høyere fuktopptak er likevel vanskelig å si helt bestemt.

Det er antatt at densiteten til isolasjonen avhenger av trykkfastheten, jo høyere trykkfasthet, jo høyere densitet. Dette stemmer i de fleste av tilfellene, unntatt prøvestykker fra en EPS-plate med trykkfasthet 80 kN/m² (EPS3) brukt til reproduksjonen av forsøket. I følge målinger gjort av GLAVA skulle denne hatt en densitet på 16 kg/m³, men beregninger viste at de kuttete prøvestykkene har en gjennomsnittlig densitet på 24,3 kg/m³. Fuktopptaket til de fire prøvestykkene varierer veldig i forhold til hverandre, 20 gram på det meste. For XPS henger lav trykkfasthet sammen med lav densitet i alle de beregnede tilfellene, og variasjonen mellom prøvestykkene av samme type er mindre.

5.1.3 Hvorfor reduseres vekten av EPS-prøvene i løpet av forsøksperioden?

Ved måling etter tre uker ble det oppdaget at vekten av EPS-prøvestykkene hadde blitt redusert med 14-20 gram sammenlignet med forrige måling, en forskjell som utgjør nesten halvparten av tørrvekten. Dette var oppsiktsvekkende ettersom de kontinuerlig hadde vært fullstendig nedsunket i vann med unntak av da de ble tørket og veid. Mulige målefeil og fysiske årsaker er i det følgende diskutert.

5.1.3.1 Mulige målefeil

Det første man kunne tenke seg er at noen form for målefeil hadde skjedd. Ble det gjort noe feil ved veiing uken før dette skjedde? Etter to uker veide prøvene kun litt mer enn etter en uke. Det kunne hendt at det var noen form for feil med vekten som ble brukt til å veie, men ettersom prøvestykkene også kjentes mye tyngre ut i hånden ved veiing etter tre uker, er dette lite trolig. Dessuten ville da også XPS-prøvestykkene hatt lavere vekt, noe som ikke var tilfelle. Det ble konstatert at vekten var kalibrert og i orden.

Det ble vurdert om vekten kunne ha blitt påvirket av forhold i vannkaret, men siden EPS-prøvestykkene lå i to forskjellige kar, og det samme har skjedd i begge, var dette lite sannsynlig. Videre kunne variasjoner i tørkemetode hatt utslag på vekten: vinkelen på risten som prøvestykkene lå på, mengde vanndråper som ble liggende på risten, hvordan prøvestykkene ble flyttet fra vannkaret til karet med ristene, om de ble ristet noe på veien slik at vann fortere rant ut. Alle disse faktorene ble vurdert, og konkludert med at omtrent nøyaktig det samme ble gjort ved hver veiing. Samme personer har gjort forsøket, og utført tørkingen og veiingen hver gang. Dette bidrar til lite variasjon i prosedyren.

En annen hypotese var om det skapes noen oppdriftkrefter ved å flytte på prøvene og riste litt på dem da de ble veid, som gjør at mindre vann eventuelt kan trenge inn. Etter tre uker ble ett eksemplar av EPS (EPS 2-2) veid dryppende våt uten å ha blitt tørket først. Det veide da 129,8 gram, som fortsatt er 13 gram mindre enn det samme eksemplaret veide en uke tidligere. Det ble derfor utført en ekstra veiing to dager senere, altså etter 23 dager. Det samme ble gjort med et annet eksemplar, EPS 2-3 etter 23 dager. Det ble veid uten å tørke først, men fremdeles veide det mye mindre enn det hadde gjort 9 dager før. Det ble dermed fastslått at det ikke kan være veie- og tørkeprosedyren som er årsaken til den reduserte vekten.

Ved senere målinger har vekten på prøvestykkene gått både opp og ned, men det samme har skjedd med alle 8 eksemplarene. Man har dermed forstått at fenomenet må være påvirket av noe annet enn målefeil. Det ble derfor bestemt å reproducere forsøket ved å legge fire nye prøvestykker av EPS type 1 og type 2, samt prøvestykker av plater fra en annen pakke, altså tilsammen 16 nye eksemplarer.

5.1.3.2 Mulige fysiske årsaker

Mulige fysiske årsaker til variasjoner i fuktopptaket er også betraktet. Det ble vurdert om det var noen stoffer i ekspandert polystyren som kunne blitt løst opp ettersom vannet i karet var blitt litt grumsete. 20 gram, som er det enkelte av prøvene hadde blitt redusert med, tilsvarer halvparten av den tørre vekten. Derfor virker det ganske usannsynlig. I tillegg ble det bekreftet av Lars Valentin fra Sundolitt (telefonsamtale, 28.02.18) at EPS ikke inneholder noen vannløselige stoffer, så denne hypotesen ble dermed avkreftet.

Vannhøyden i karene hadde gått ned 1 cm, tilsvarende 10 mm vannsøyle. Vannet i bøttene som utgjør lasten over prøvestykkene hadde fordampet med en mengde som tilsvarte 2 cm på vannstanden i bøtten, noe som vil redusere lasten som prøvestykkene bærer. Vil denne endringen i stående vanntrykk ha påvirket vannopptaket? Påvirkningen er minimal siden svingninger i vannstanden forekom gjennom hele måleperioden uten at det korrelerte med resultatet av veiingen.

Kunne det ha skjedd en forandring i porestrukturen i løpet av eksponeringstiden slik at kapillærkreftene ble svakere? Ekspanderer boblene når de tar opp vann slik at de holder dårligere på vann? Kapillærkreftene avhenger av materiale og overflateegenskapene inni porene. I følge Ossa og Romo (2012) utvides polystyren lite når det absorberer vann. Vannet trenger inn gjennom hulrommene mellom porene, og erstatter luften som var der fra før. Hypotesene avkreftes av at vekten økte igjen ettersom eksponeringen fortsatte.

Når isolasjon blir nedsunken i vann slik det ble gjort i forsøket, får man et lukket, omkranset trykk og isolasjonen blir komprimert til det er i balanse. I følge Sivert Uvsløkk, seniorforsker ved SINTEF Byggforsk (muntlig korrespondanse, mars 2018) vil lasten på overkant medføre at isolasjonen blir presset noe ned. Når vannet trenger inn blir luften/gassen i prøven komprimert ettersom det også er omsluttet av vann. Denne kompresjonen øker gasstrykket inn i prøven. Med tiden blir det en trykkløst, og lufttrykket i poresystemet inni isolasjonen er likt med lufttrykket i vannet når det ligger i vannkaret. Ettersom isolasjon er elastisk, vil det gå tilbake til opprinnelig form når lasten fjernes. Hvis kapillærkreftene blir svekket, kan det omsluttende trykket fra vannet og lasten skvise vannet ut igjen. Uvsløkks hypotese er ikke mulig å bekrefte eller avkrefte. Det er usikkert om denne effekten har påvirket fuktopptaket.

Lars Valentin fra Sundolitt nevner at trykkforskjell inni prøven kan være en årsak til redusert fuktopptak. Hvis man legger isolasjonen i ovn for tørking vil det øke trykket i EPS-prøven. Når det legges i vann vil isolasjonen kjøles ned og det blir en form for vakuum, men som utligner seg i løpet av ett døgn. Ettersom prøvene til dette forsøket ble kondisjonert i romtemperatur, vil ikke dette være tilfelle og det er ikke noen nevneverdig trykkforskjell inni prøven. Sarlin et al. (1986) gjorde et forsøk på hvor mye innvendig trykk påvirker fuktopptaket. Isolasjon ble utsatt for innvendig trykk, som resulterte i redusert vannabsorpsjon fram til trykket når 800 hPa. Om trykket økes ytterligere medførte ikke dette noen endring i vannabsorpsjon.

5.1.3.3 Påvirkning av atmosfæretrykket

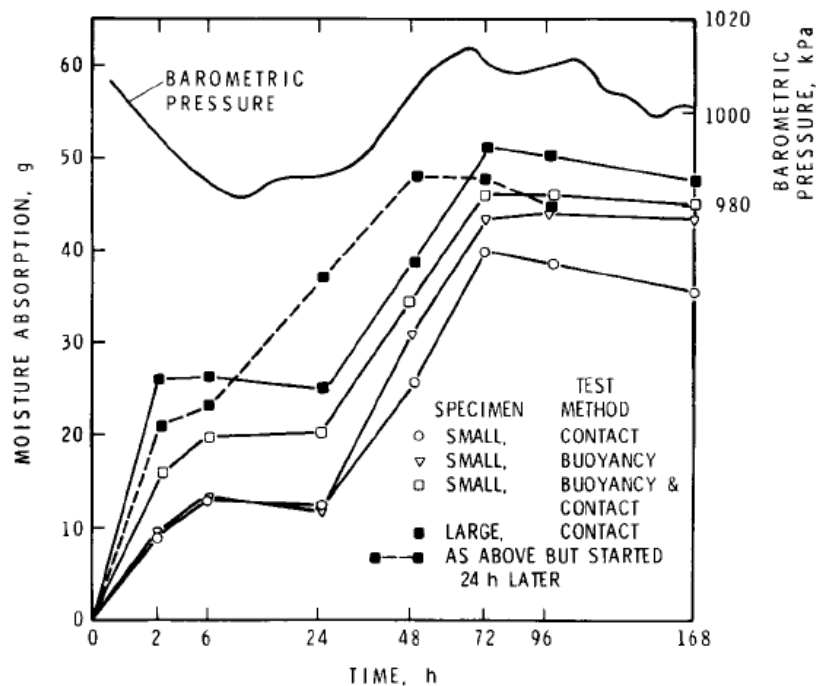
Påvirkningen av endring i atmosfæretrykket er vurdert. Atmosfæretrykket i rommet har kontinuerlig blitt logget, da SINTEF Byggforsk bruker dette til kalibrering i sine målinger. Dette gjorde det mulig å få tak i en fullstendig logg over atmosfæretrykket gjennom hele måleperioden. En rask sjekk på trykkloggen på dag 14 (27.02.18), hvor fuktopptaket i EPS-prøvestykkene hadde vært veldig høyt, viste at atmosfæretrykket denne dagen også hadde vært veldig høyt. Som grafen for atmosfæretrykk i Figur 10 viser, var atmosfæretrykket meget lavt, 997 hPa, da forsøket ble igangsatt. Trykket øker deretter jevnt og det har en topp på 1046 hPa etter det har gått tre uker. Differansen på 49 hPa tilsvarer rundt 500 mm vannsøyle. Vekten av vannet over prøvestykkene utgjør 50 mm vannsøyle. Dermed er forskjellen i atmosfæretrykket rundt 10 ganger større enn det trykket som vannet over prøvene bidrar til. Lasten fra bøttene er neglisjert ettersom dette ikke bidrar til et omsluttende trykk.

Ettersom lufttrykket i prøven mest sannsynlig er lavere enn atmosfæretrykket når det er høyere enn 1000 hPa, kan det ha bidratt til en trykkgradient som gjør at større mengde vann har blitt presset inn i prøven. På kun tre dager droppet atmosfæretrykket ned til 1005 hPa, og da veiing etter tre uker fant sted hadde det blitt redusert til 995 hPa. Dette er omtrent like stor differanse som det var etter de første to ukene. Som Figur 10 viser, øker fuktopptaket for EPS betraktelig fram til toppen av atmosfæretrykkgrafene, og faller i takt med atmosfæretrykket fram til uke fire. Lufttrykket inni prøven var mest sannsynlig på dette tidspunkt høyere enn atmosfæretrykket utenfor. Det plutselige, store trykkfallet kan ha skapt en betydelig trykkgradient som har bidratt til at vann har blitt presset ut av prøven og graden av vannabsorpsjon har blitt redusert.

Atmosfæretrykket økte igjen etter fire uker. I de kommende ukene i forsøksperioden avtok og økte atmosfæretrykket, men ikke like fort og like kraftig som etter to og tre uker. En kan se fra Figur 10 at fuktopptaket endres i korrelasjon med atmosfæretrykkendringen, men ikke i like stor grad ettersom endringen ikke er så stor. Etter ti uker skjer et tilsvarende dropp i fuktopptaket, som også kan sees på atmosfæretrykket.

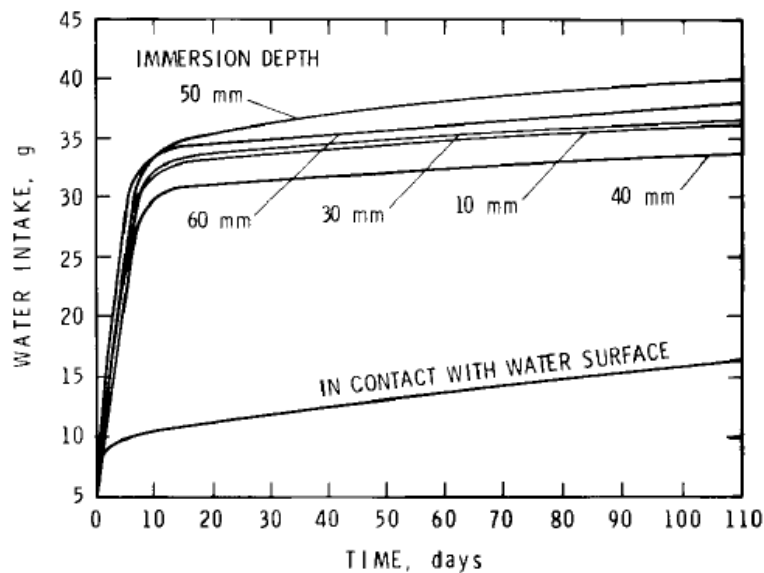
I XPS vises ikke samme korrelasjon, ettersom XPS tok opp det meste av vannet de første tre dagene og deretter har gått svakt opp og ned i vekt, tilsynelatende uavhengig av atmosfæretrykket. Dette kan være fordi XPS-prøvestykkene har høyere trykkfasthet, densitet og en lukket porestruktur, som gjør at den blir mindre påvirket av atmosfæretrykket.

Flere studier har undersøkt hvordan atmosfæretrykket påvirker fuktopptaket til plastisolasjon. Bomberg (1983) har gjort forsøk med EPS etter amerikansk standard ASTM D2842, og satt fuktopptaket i sammenheng med atmosfæretrykket. Figur 15 viser resultater fra et forsøk hvor prøvestykkene ble fullstendig nedsunket i vann med 50 mm opp til vannspeilet. Som grafen viser følger fuktopptaket målt i gram, stigningen til atmosfæretrykket (i kPa). Etter to timer har EPS-prøvene tatt opp en del vann, og i samsvar med atmosfæretrykket går fuktinnholdet ned før det stiger mellom 24 og 28 timer, før det igjen synker. Endring i atmosfæretrykk er fra 98,5 kPa til 101,3 kPa, som i hPa blir en differanse på 28, og som tilsvarer 286 mm vannsøyle. Dette stemmer overens med resultater funnet fra forsøk i denne oppgaven. Bombergs forklaring på fenomenet er at endringen i atmosfæretrykket medfører endring i volum av fanget luft når vann kommer inn i porene i materialet.



Figur 15: Sammenheng mellom fuktopptak og atmosfæretrykk. (Bomberg, 1983, s. 237).

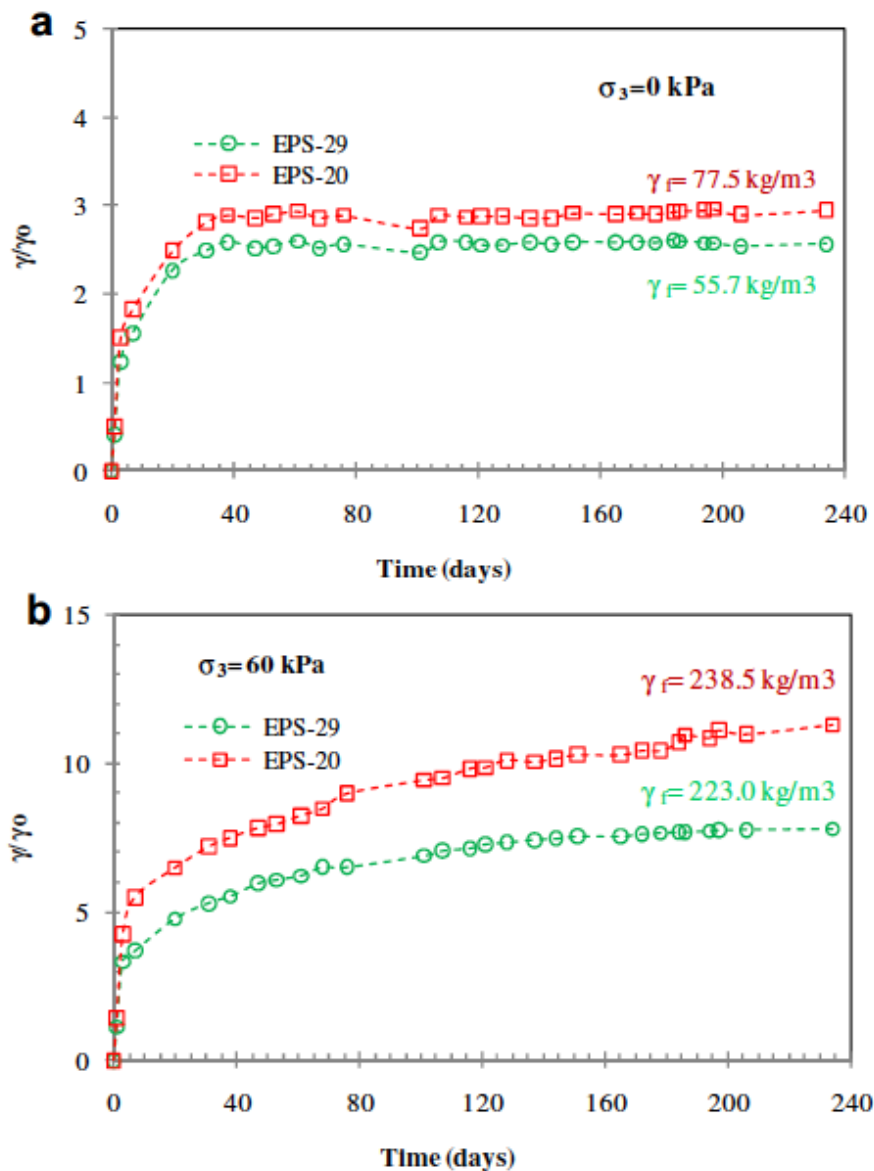
I studien til Bomberg er i tillegg sammenhengen mellom fuktopptak og mm nedsenkningsdybde studert. Figur 16 viser at fuktopptaket (med unntak av 40 mm og 50 mm) øker når vannhøyden øker. Dette merkelige resultatet kan forklares ved at målingene ikke er korrigert for atmosfæretrykket.



Figur 16: Sammenheng mellom fuktopptak og nedsenkningsdybde (Bomberg, 1983, s. 239)

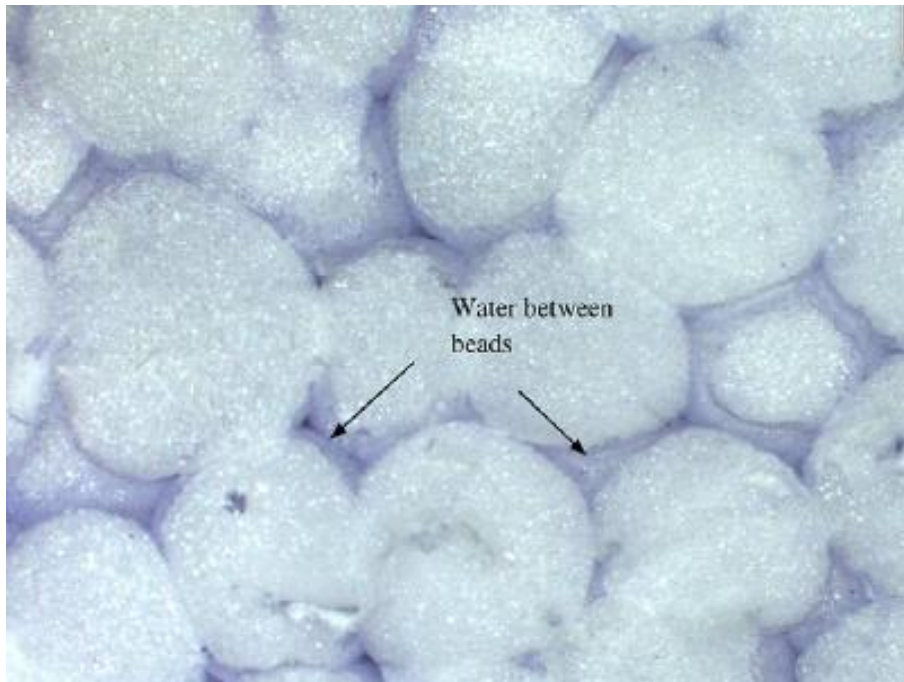
Bomberg nevner i en senere artikkel (1989) at atmosfæretrykket har stor påvirkning på vanddamptransport gjennom materialer. Artikkelen konkluderte med at store atmosfæretrykkendringer kan gi et annet resultat for vanddampgjennomgangskoeffisienten, spesielt for materialer med lav permeans.

I følge Ossa og Romo (2012) penetreres vann inn i EPS-prøvestykker under absorpsjonsforsøk på grunn av den hydrauliske gradienten som genereres gjennom prøvestykket. Vann strømmer fra periferien til senter av prøven gjennom porene mellom boblene i EPS-en. Avhengig av størrelsen på det omsluttende trykket, kan vann også perkolere inn i porestrukturen. Figur 17 viser vannopptak i volum% under normalt trykk og under 60 kPa.

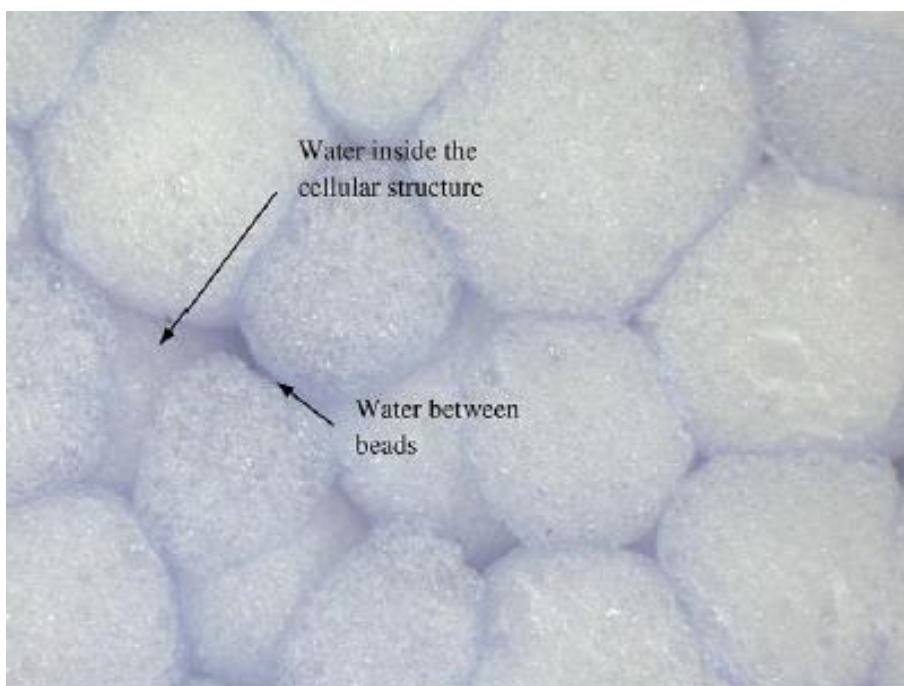


Figur 17: Vannopptak i volum% under normalt trykk og under 60 kPa (Ossa og Romo, 2012, s. 135).

Når EPS er utsatt for lavt omslutningstrykk, som Figur 18 viser, vil ikke EPS bli mettet med vann, selv fullstendig nedsenket. Dette er på grunn av at vann vil kun legge seg rundt boblene og la deler av porene ikke være fylt med vann, fordi boblenes «sveiste» kontaktpunkt fungerer som en ugjennomtrengelig sperre.



Figur 18: Vanninnhold i EPS under normalt trykk (Ossa og Romo, 2012, s. 135).



Figur 19: Vanninnhold i EPS under høyt omsluttende trykk på 600 hPa (Ossa og Romo, 2012, s. 135).

Figur 19 viser EPS utsatt for et høyere omsluttningstrykk på 600 hPa. I dette tilfellet har vann penetrert gjennom porestrukturen og perkolert gjennom kontaktpunktene til boblene som ikke lenger er «sveist» sammen. Basert på disse observasjonene, og i følge denne studien kan økningen av vannabsorpsjon i samsvar med økende omsluttende trykk ha følgende grunner:

- a) Ødeleggelse av kontaktpunkt mellom boblene i porestrukturen
- b) Perkolasjon gjennom porestrukturen
- c) Tidsperioden av nedsenkingen i vann

Resultatene til Ojanen og Kokko (1997) fra trykkforskjell-forsøket underbygger påstanden om at atmosfæretrykket har stor påvirkning. De gjorde målinger på tre prøvestykker av samme type EPS i normalt atmosfæretrykk og i trykkabinett med trykkforskjell tilsvarende 500 mm vannsøyle. Det dynamiske lufttrykket ble endret ukentlig mellom normalt atmosfæretrykk og ± 500 mm vannsøyle. Med samme nedsenkingsdybde som prøvestykket som kun var utsatt for normalt atmosfæretrykk, forårsaket dette omtrent 25-35 % økning i vannabsorpsjon. Denne trykkforskjellen er omtrent like stor som endring i atmosfæretrykket som forekom i forsøk gjort i forbindelse med denne oppgaven.

Cai et al. (2017a) nevner at for EPS-prøver med medium til høy densitet utsatt for trykk (20 hPa), vil de ikke absorbere mer vann enn prøver som blir testet under normalt trykk (2,5-5 hPa). De vil derimot absorbere mindre mengde vann. En mulig grunn artikkelen nevner er at trykket som isolasjonen blir utsatt for, resulterer i små deformasjoner i porene, som bidrar til å innsnevre og potensielt lukke porene i den delvis åpne porestrukturen til EPS. Hvis trykket anvendt på vannet som er rundt prøvestykkene ikke er høyt nok til å overgå motstanden forårsaket av den delvise lukkingen av porene, vil en liten redusering av fuktinnholdet bli observert når vannet blir satt under trykk. Merk at trykkforskjellene brukt i artiklene Cai et al. studerte er betydelig mindre enn de naturlige variasjonene i atmosfæretrykket.

5.2 Lagring i lufttett boks med 100 % RF

Etter første veiing etter 13 dager hadde EPS-prøvene lavere masse enn før de ble satt i boksen med 100% RF. Det ene prøvestykket av EPS2 hadde redusert massen med hele 2,6 g. Resten av prøveperioden har som Figur 13 viser, vekten av EPS-prøvestykkene vist en svak, men stabil nedgang. Massen til XPS-prøvestykkene hadde økt ørlite, mindre enn 1 % av tørrvekten.

Reduksjon av massen til EPS-prøvestykkene kan komme av at de fremdeles inneholdt fukt fra produksjon, og var dermed ikke helt tørre i forkant av forsøket. Dette kan tyde på at prøvestykkene har tørket i stedet for å ha tatt opp vann selv om de har vært utsatt for fuktmettet luft. EPS er i utgangspunktet fuktigere etter produksjon enn XPS, som kan forklare hvorfor samme fenomen ikke skjedde med XPS-prøvestykkene.

Lufttemperaturen prøvestykkene var eksponert for er rundt 23°C. Ved så lav temperatur skapes ikke en drivkraft stor nok til å drive fukt inn i prøvene. Dette kan forklare det fraværende fuktopptaket i EPS, og det minimale fuktopptaket i XPS.

Etter hver veiing tok det ett/to døgn å gjenopprette 100% RF, som kan ha en liten betydning for fuktopptaket. Dette er grunnen til at det ble valgt å veie hver 14. dag og ikke oftere.

Det ble fylt opp for mye vann etter tredje veiing. Vannstanden gikk over risten og gjorde risten våt, samt at vann ble liggende igjen mellom hullene i risten. Dette ble fjernet med en kopp. Ettersom ristene ble litt våte, ble det forsøkt å tørke det helt tørt med papir og fjerne vannhinnene i rishullene. Dette kunne ha ført til et litt høyere fuktopptak fra bunnen av prøvestykkene, men resultatene viser ikke tegn på dette.

Når XPS-plater er helt ferske vil karbondioksid diffundere ut raskere enn penetrasjon av luft inn (som nevnt i teorikapittelet om XPS). Dette skulle egentlig ført til en vektreduksjon av XPS siden karbondioksid veier mer enn oksygen, men som resultatene viser er ikke dette tilfelle.

Hvor overførbart er dette forsøket til reelle forhold? Grunnen til at man bruker isolasjon i bygg er for at man har ulik temperatur på hver side av isolasjonen og at man ønsker å isolere mot varme eller kulde. Denne situasjonen får man ikke oppnådd i dette forsøket.

Det er ikke funnet noen eksempler på at akkurat dette forsøket er gjort av andre, så en sammenligning av prøveresultater har ikke vært mulig.

5.3 Varmemotstand etter NS-EN 12667:2001

Varmekonduktivitetsverdien til våt isolasjon kontra deklarerert verdi økte med 4,7 % (XPS3) til 18,1 % (XPS1) ut ifra metoden for bestemmelse av varmemotstand etter NS-EN 12667:2001. Dette er oppsiktsvekkende mye, og viser at varmekonduktiviteten til et materiale påvirkes i stor grad av dens fuktinnhold.

I henhold til NS-EN 12667:2001 skal forsøket utføres på homogene, tørre prøvestykker med uniform varmestrøm. Ettersom materialene var våte, ble forsøket dermed gjort litt utenfor omfanget til standarden. Det er vanskelig å måle varmetransporten gjennom et materiale når det er fuktig ettersom det da ikke blir stasjonære betingelser, men at det virker flere krefter enn kun varmeoverføring. Dette inkluderer blant annet vandampoverføring og damptrykk. Det er derfor en mulighet for at resultatene ikke er direkte sammenlignbare med andre målinger utført etter samme standard.

5.4 Påvirkning av fuktinntak på varmekonduktiviteten

Den beregnede varmekonduktiviteten av de våte prøvestykkene etter kalkulasjonsmetode av Lakatos (2006) er lavere enn den målte etter NS-EN 12667:2001. Den største forskjellen mellom våt og deklarerert verdi er for XPS1-prøvestykket, hvor forskjellen er 0,006 W/mK. Dette kan bety at kalkulasjonsmetoden ikke er godt egnet for EPS og XPS, eller at prøveresultatene er unøyaktige.

I følge Mar et al. (2007) er varmemotstandsmålinger av våte materialer sterkt påvirket av endringer av hvordan fukten legger seg og grensebetingelsene til prøveeksemplarene. Derfor kan ikke målinger av varmekonduktiviteten til fuktige materialer bli ansett som en materialeegenskap, men kun brukes til grov estimering av varmemotstand til våte bygningsmaterialer. λ -verdien er et resultat av bidrag fra både termisk ledeevne av et flerfaset komposittmateriale bestående av fast stoff, vann eller is og gassfase, samt termisk ledeevne på grunn av varmeoverføring ved stråling. I følge Mar et al. kan derfor ikke λ -verdien av vått materiale måles ved bruk av standard metode basert på Fourierligninger.

Det er vanskelig å bruke λ -verdi av vått materiale til prosjektering av bygninger ettersom man ikke vet med sikkerhet hvor våt isolasjonen vil bli for tiltenkt bruksområde. Eksponeringsgraden vil som nevnt variere blant annet med årstider og nedbørsmengde, noe som kan være vanskelig å forutsi.

Deklarert varmekonduktivitet gjelder for tørr tilstand. Ved prosjektering av varmeisolering skal det tas hensyn til forventet fuktinnhold i isolasjonen ut ifra bruksområde. Da regnes det med en dimensjonerende varmekonduktivitet etter NS-EN ISO 10456:2007, der prosjekterende må multiplisere den deklarererte varmekonduktiviteten med en korreksjonsfaktor, se Tabell 2.

5.5 Forsøkernes relevans i forhold til praksis og begrensninger med dagens forsøksmetoder

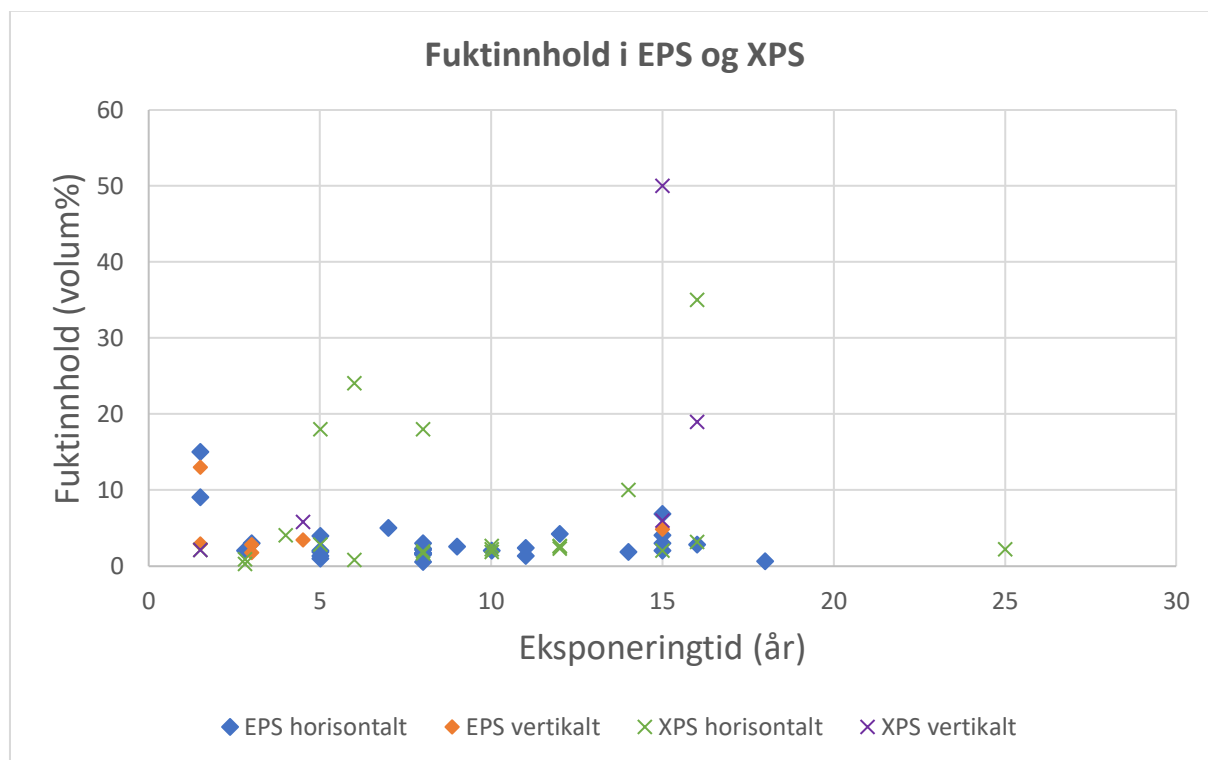
I følge standard NS 12087:2013 skal isolasjonsprøvestykkene ligge nedsunket i vann i 4 uker før de blir veid og volum% beregnet. I forsøket utført i dette studiet var prøvestykkene nedsunket i vann i 13 uker, og veid én gang i uken (med unntak av veiing etter 5 uker og en ekstra veiing etter 23 dager). Dette medførte muligheten til å se endringen i fuktopptaket i løpet av disse ukene. Fuktopptaket varierte fra uke til uke slik at grafen for fuktopptaket (se Figur 10) går opp og ned, noe som antyder at vanninnholdet ikke nådde et stabilt nivå.

Etter 13 uker spenner fuktinnholdet til de ulike EPS- og XPS-prøvestykkene over henholdsvis 3,2- 6,7 volum% og 0,2-0,3 volum%. Reproduksjonen av forsøket som varte i 4 uker, hvor nye EPS-prøvestykker ble testet, resulterte i et fuktinnhold på 2,7-6,1 volum%. I følge produktdatablad til EPS S80 og EPS S150 (GLAVA, 2013), skal fuktopptaket etter nedsenking i vann være mindre enn 2-3 volum%. For XPS er påstanden at fuktinnholdet vil være 0,7 volum% (DOW, 2018). Kun de laveste verdiene fra reproduksjonen av forsøket samsvarer med deklart verdi for fuktopptaket i EPS. Resterende prøvestykker av EPS har tatt opp mye mer vann under forsøket enn produktdatabladet tilsier. Deklart verdi i produktdatabladet skal være basert på nedsenkingsforsøk, i likhet med forsøk utført i dette studiet. Siden flesteparten av verdiene i dette forsøket er mye høyere, er dette noe oppsiktsvekkende. Alle XPS-prøvestykkene viser derimot lavere vannopptak enn oppgitt i produktdatabladet. Resultater fra litteraturstudiet viser at vannopptak i EPS etter nedsenkingsforsøk etter EN 12087:2013 ligger på 1-6 volum% etter forskjellige forsøksperioder. Dette underbygger resultater fra forsøk gjort i denne oppgaven, og at vannopptak i EPS etter nedsenkingsforsøk er betraktelig høyere enn det produktdatabladet fra GLAVA tilsier.

NS-EN ISO 10456:2007 forventer at horisontalt liggende EPS kan få et fuktinnhold på opptil 10 %. Høyeste fuktinnhold fra forsøk i denne oppgaven resulterte i er 6 volum%. Standarden er altså konservativ. Hvis korreksjonsfaktorene i Tabell 2 er beregnet ut ifra forventet fuktinnhold, vil ikke det at EPS har et høyere fuktopptak enn produktdatablader bety noe for den termiske dimensjoneringen ettersom standarden er såpass konservativ.

Det er vanskelig å utvikle prøvemeter som gjenskaper virkelige eksponeringsforhold. Dette har å gjøre med at plastisolasjon benyttes på mange ulike områder og blir utsatt for veldig forskjellige påvirkninger. Disse inkluderer blant annet grunn- og dreneringsforhold, varierende temperatur som i perioder tillater tørking, fryse-tine sykluser, snøsmelting og nedbørmengde. Ved bestemmelse av vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking er isolasjonsprøvestykkene omsluttet av vann og utsatt for stående vanntrykk, noe som sjeldent skjer når isolasjon er benyttet i bygg. Dette nevnes også av Cai et al. (2017a). I følge deres funn er forskjellene mellom data fra nedsenkingsforsøk og data fra feltundersøkelser større for EPS enn for XPS.

Flere studier viser at fuktopptaket til EPS og XPS som har vært i bakken, er lavere enn det fuktinnholdet som laboratorieforsøk resulterer i (Cai et al., 2017a). Det finnes også eksempler hvor fuktinnholdet in situ er betydelig høyere enn laboratorieresultater, se Figur 20 hentet fra Stagrum (2017). I Figur 20 er verdier for fuktinnhold plottet sammen med eksponeringstid i et punktdiagram. Indikatorene har ulik farge og form for å skille mellom EPS og XPS som har ligget horisontalt eller vertikalt. Diagrammet viser at XPS har en tendens til å absorbere mer vann enn EPS ved langvarig eksponering i bakken. Dette er verdier som ligger langt over de resultatene som er dokumentert fra laboratorieforsøk i denne masteroppgaven.



Figur 20: Fuktinnhold i forhold til eksponeringstid og plassering. Verdier basert på studier undersøkt i Stagrum (2017).

Verdier for fuktinnhold i EPS og XPS som har vært i bakken er oppsummert i Tabell 11 og Tabell 12, som er hentet fra Stagrum (2017). Fuktinnhold i volum% ble sammenlignet på grunnlag av densitet, eksponeringstid og plassering i bakken. Isolasjon som er plassert horisontalt har vært brukt som frostisolasjon i vei eller som markisolasjon i forbindelse med kjellervegg. Den vertikalt plasserte isolasjonen har vært utenpå kjellervegger. Verdiene er listet opp i bolker for lav, middels og høy densitet, samt om de var eksponert i mer eller mindre enn 5 år. I tillegg er det tatt hensyn til om de er plassert vertikalt eller horisontalt. Antall studier som verdiene er basert på, er gitt i parentes bak hvert intervall for fuktinnhold. Situasjoner hvor det ikke har vært noen tilfeller for den eksakte sammensetning av densitet, eksponeringstid og plassering i studiene som er undersøkt, representeres med «(0)» i tabellene.

Tabell 11: Fuktinnhold i EPS (volum%), basert på studier undersøkt i Stagrum (2017).

Densitet	Horisontalt		Vertikalt	
	Eksponeringstid		Eksponeringstid	
	< 5 år	> 5 år	< 5 år	> 5 år
10-20 kg/m ³	1,8-2 (3)	0,5-6,8 (10)	(0)	4,8 (1)
20-35 kg/m ³	3,0-15 (4)	1,7-4 (6)	3,4-13 (3)	(0)
35-50 kg/m ³	(0)	1,9-3,95 (5)	(0)	(0)

Tabell 12: Fuktinnhold i XPS (volum%), basert på studier undersøkt i Stagrum (2017).

Densitet	Horisontalt		Vertikalt	
	Eksponeringstid		Eksponeringstid	
	< 5 år	> 5 år	< 5 år	> 5 år

10-20 kg/m³	(0)	(0)	(0)	(0)
20-35 kg/m³	0,9-2,1 (2)	(0)	2,1-5,8 (2)	6,0- 18,9-50,0 (3)
35-50 kg/m³	0,3-18,0 (4)	1,7-35 (14)	2,1 (1)	(0)

En kan se fra Tabell 11 og Tabell 12 at verdiene for fuktinnhold har et stort spenn. For mange av kombinasjonene av densitet, eksponeringstid og plassering som er relevante for plastisolasjon for nordisk bruk, har det ikke blitt funnet dokumenterte målinger av fuktinnhold.

Tabell 2 viser fuktinnhold av EPS og XPS for ulike eksponeringssituasjoner antydnet i standard NS-EN ISO 10456:2007. 12 av prøvestykkene for XPS og 6 av EPS-prøvestykkene som er presentert i Tabell 11 og Tabell 12 hadde et høyere fuktinnhold enn det standarden antyder for dens respektive plassering. Ifølge standarden skal man ikke omregne motstanden til XPS med hensyn til fukt når det brukes som dremsplater utenpå vegg mot grunn. Som en kan se i Tabell 12, viser det seg at når XPS er eksponert for fuktige omgivelser i bakken, vil den etter en viss tid absorbere fukt likevel.

Den store spredningen i fuktopptak i plastisolasjon som vises av Tabell 11 og Tabell 12, samt de store forskjellene disse verdiene har sammenlignet med laboratorieforsøk, understreker at det er vanskelig å konstruere forsøk som er fullstendig sammenlignbare med virkeligheten.

I følge en studie av Whalen (2002) vil EPS etter lang tids eksponering ha et mye lavere fuktopptak enn verdier antydnet ved laboratorieforsøk. Et forsøk gjort på EPS hvor plater ble plassert i drenert jord over grunnvannstanden bekreftet at vanninnholdet var under 1 volum% etter nesten 30 år i bakken. Dessuten var det omtrent ingen endring i vanninnholdet over tid.

Ojanen og Kokko (1997) sammenlignet fuktopptak i EPS som har blitt brukt som markisolasjon i bakken i 5-18 år med EPS-prøvestykker testet etter standard i laboratorium. Det målte fuktinnholdet i markisolasjonsplatene var 0,03-6,8 volum%, hvor platenes densitet varierte mellom 15-24 kg/m³. Et standardisert nedsenkningsforsøk ble gjennomført, hvor prøvestykkene ble veid etter 28 dager. Fuktinnholdet til prøvestykkene fra laboratorieforsøket var betydelig høyere enn for isolasjonen som hadde vært i bakken. Markisolasjon har periodevis kontakt med vann i form av regn og smeltet snø, men de blir aldri helt nedsunket i vann som i forsøket. Avhengig av denne periodevise eksponeringen for vann, vil fuktopptaket være dynamisk. I likhet med resultater fra forsøk i denne oppgaven kommer ikke fuktinnholdsverdien til å nærme seg én verdi. Det er ikke mulig i følge Ojanen og Kokko å forutsi fuktoppførselen av den dynamiske prosessen med forsøk som baseres på stasjonære grensebetingelser. Fuktbelastningen fra nedsenkningsforsøk er imidlertid sammenlignbar med den temporære fuktpåvirkningen som kan skje i praksis.

Ettersom trykkforskjell-forsøket Ojanen og Kokko (1997) gjorde resulterte i 25-35 % økning i fuktopptaket, mener de at på grunn av det alltid skiftende atmosfæretrykket, kan ikke resultater fra ulike nedsenkningsforsøk nøyaktig sammenlignes.

Plastisolasjon forringes over tid med en hastighet som i følge NS-EN ISO 10456:2007 avhenger av materialtype, kledninger, strukturer, blåsemiddel og materialets tykkelse. I tillegg spiller trykkbelastning og diffusjon av gasser i XPS en rolle for varmemotstandsevnen. Disse påvirkningene er vanskelig å simulere med laboratorieforsøk, og det er dermed ikke lett å

forutsi virkninger av aldring. «Det finnes ingen enkle regler for å korrelere for aldring over tid for et gitt materiale» (NS-EN ISO 10456:2007, s. 5).

Cai et al. (2017a) konkluderer sin studie med at drenasje og grunnforhold har større betydning for levetiden til EPS enn det alder har. XPS har relativt stabil ytelse under ulike eksponeringsforhold, og alder virker i denne sammenheng som faktoren med størst innflytelse. De mener derfor at resultater fra nedsenkingsmetoden må vurderes nøye for å korrelere med langtidsytelsen til EPS- og XPS-isolasjon. De høye verdiene av fuktinnhold for XPS i Figur 20 kan tyde på at langtidsvirkninger reduserer fuktmotstandsevnen til XPS betraktelig.

Bestemmelse av vannabsorpsjon ved diffusjon (etter NS-EN 12088:2013) og forsøk hvor egenskaper bestemmes med hensyn til vanddampgjennomgang (etter NS-EN 12086:2013) er formodentlig mer relevant for testing av isolasjonsmateriale til bruk i vegg eller formål som ikke blir eksponert for vann i væskeform. I følge Bomberg (1989) blir vanddampgjennomgang påvirket av mange faktorer, blant annet gjennomsnittstemperaturen i prøvestykket, relativ fuktighet og temperatur- og fuktgradienter avhengig av tykkelsen på prøveeksemplarene. Disse metodene er ikke ytterligere studert i denne oppgaven, så det er vanskelig å si hvor viktige de er for bestemmelse av fuktinnhold i plastisolasjon.

Ojanen og Kokko (1997) utførte også diffusjonsforsøk på frostisolasjon. Fuktransport ved diffusjon og absorpsjon i frostisolasjon er relativt liten sammenlignet med transport av vann når isolasjonen er i kontakt med fritt vann. Dette skyldes den lave temperaturgradienten. Numeriske simuleringer viste at typisk fuktinnhold i frostisolasjon ved langtids absorpsjon ved diffusjon var på mindre enn 1 volum%. Typiske verdier fra feltundersøkelser var rundt 1-2,5 volum%. Et forsøk basert på vannabsorpsjon ved diffusjon gjort med temperaturforskjeller på 1-50 °C og vannmettet luft, resulterte i et fuktopptak på 5,5 til 6,2 volum%. Dette viser at fuktpåkjenning fra laboratorieforsøk ikke korresponderer godt med de påkjenninger isolasjon blir eksponert for i felt. Derfor mener Ojanen og Kokko at diffusjonsforsøket ikke er en passende metode for utprøving av EPS brukt til frostsikring. At isolasjonen blir utsatt for en temperaturforskjell på 50°C ved diffusjonsforsøk er enda en grunn for at dette forsøket ikke er veldig relevant ettersom isolasjonen sjeldent blir utsatt for tilsvarende temperaturforskjell.

5.6 Amerikansk vs. europeisk standard

De mest brukte standardene for bestemmelse av vannabsorpsjon i isolasjonsmaterialer ved nedsenking i vann er de amerikanske standardene ASTM C272 og D2842, og europeisk standard EN 12087:2013. I Norge er den norske utgaven av europeisk standard NS-EN 12087:2013 gjeldende.

I følge Cai et al. (2017a) vil bestemmelse av vannabsorpsjon etter ASTM C272 og D2842 med nedsenkingsperiode på fire dager gi et lavere fuktinnhold enn for XPS brukt i felt. Likevel virker det som om resultater fra disse standardene er i nærheten av det gjennomsnittlige fuktinnholds nivået til isolasjon brukt i felt i mindre enn seks år. For EPS-isolasjon kan det virke som om resultater fra ASTM C272 kan bli brukt for å estimere fuktinnholdet i isolasjon som skal brukes i tre til seks år. Ettersom fuktopptaket varierer de første dagene, mener Cai et al. (2017a) at forsøksperioden i ASTM-standardene er for kort, og burde utvides til 28 dager. Forsøksperioden for bestemmelse av vannabsorpsjon ved nedsenking etter EN 12087:2013 er 28 dager. Dette kan begrunne at forsøk etter europeisk standard er bedre enn ASTM for å estimere langtids fuktopptak i isolasjon.

Det er forskjellige prosedyrer for kondisjonering av prøvene i forkant av nedsenkingsforsøket i de ulike standardene. I henhold til ASTM-standardene skal prøvene kondisjoneres i ovn i 24 timer ved $50 \pm 3^\circ\text{C}$ eller i 2 timer ved $105 \pm 3^\circ\text{C}$ i forkant av nedsenkingen. Etter metode i europeisk standard skal prøvestykkene kondisjoneres i ett døgn i 23 ± 5 grader. Forskjellen ved denne kondisjoneringen kan påvirke hvor tørt materialet er i forkant av forsøket.

ASTM D2842 inkluderer en metode for bestemmelse av vannabsorpsjon som går ut på å måle endringer i oppdrift. Dette kan være en god løsning for måling av fuktopptak ettersom man slipper tørkeprosessen før veiing og de målefeil som kan oppstå i den forbindelse. Denne metoden er ikke inkludert i den europeiske standarden.

6 Konklusjon

Fuktinnholdet i prøvestykkene av EPS og XPS var etter 13 ukers nedsenking i vann henholdsvis 3,2- 6,7 volum% og 0,2-0,3 volum%. Reproduksjonen av forsøket som varte i 4 uker, hvor det ble gjort målinger på nye EPS-prøvestykker, resulterte i et fuktinnhold på 2,7-6,1 volum%. Den store variasjonen i fuktopptak for EPS-prøvestykkene av samme type skyldes i hovedsak produksjonsprosessen som medfører variasjon i porestrukturen. Densiteten og trykkfastheten spiller mindre rolle for grad av fuktopptak i EPS. Det kan derimot virke som at i XPS sitt tilfelle vil fuktopptaket øke med lavere densitet og trykkfasthet.

To ganger i løpet av måleperioden ble vekten av EPS-prøvestykkene redusert med inntil 20 gram fra måling til måling. I stedet for å stabilisere seg, svingte fuktopptaket. Det ble oppdaget at årsaken til dette er den store påvirkningen atmosfæretrykket har på fuktopptaket i EPS. Dette vises i Figur 10, hvor utviklingen i fuktopptaket til EPS i løpet av forsøksperioden korrelerer perfekt med variasjoner i atmosfæretrykket. Samme korrelasjon var som Figur 11 viser, ikke å se for XPS.

EPS-prøvestykkene som var eksponert for luft med 100 % relativ fuktighet og med romtemperatur i en lufttett boks i 13 uker, krympet i masse med 0,9-3,4 gram gjennom prøveperioden. Alle XPS-prøvestykkene i samme boks hadde økt massen med 1,4-3,5 gram. Dette er meget lite i forhold til prøvestykkenes volum, så volum% er ikke oppgitt. Årsaken til denne oppførselen er uklar. Det konkluderes med at dette forsøket ikke er relevant for å studere fuktopptak i plastisolasjon, ettersom den lave temperaturen og absolutte fuktinnholdet ikke generer en damptrykkgradient som er stor nok til å presse vann inn i isolasjonen. I tillegg er denne situasjonen ikke særlig sammenlignbar med hvordan isolasjon brukes i praksis. Dette er fordi det er lik temperatur på begge sider av isolasjonen. I en brukssituasjon vil hensikten med å bruke EPS og XPS som isolasjon være å motvirke varmeoverføring fra den ene til den andre siden.

Ut ifra forsøk i henhold til NS-EN 12667:2001 økes varmekonduktiviteten til våt plastisolasjon med opptil 11,8 % sammenlignet med deklart verdi. Dermed blir dens isolerende evne betraktelig dårligere.

På bakgrunn av resultater fra nedsenkingsforsøket konkluderes det med at resultater fra det standardiserte forsøket i NS-EN 12087:2013 gjort på ulike steder og til forskjellig tid på året, ikke er fullstendig sammenlignbare. Dette er på grunn av den store påvirkningen endringer i atmosfæretrykket har på fuktopptaket i EPS. Det er oppsiktsvekkende at dette fenomenet ikke nevnes i standarden, og det bør vurderes å gjøre endringer.

Ved bestemmelse av vannabsorpsjon ved fullstendig nedsenking er isolasjonsprøvestykkene omsluttet av vann og utsatt for stående vanntrykk, noe som sjeldent skjer når isolasjon er benyttet i bygg. Det er vanskelig å utvikle prøvemethoder som gjenspeiler virkelige eksponeringsforhold. Dette har å gjøre med at plastisolasjon benyttes på mange ulike områder og blir utsatt for veldig forskjellige påvirkninger.

7 Fremtidig arbeid

Videre arbeid vil innebære å studere plastisolasjon på bakgrunn av flere faktorer som kan spille en rolle for fuktopptak.

7.1 Utvide omfang

Hva som er realistisk fuktpåkjenning i en brukssituasjon kan videre studeres. Det kan gjøres et bredere søk for å finne artikler som omhandler fuktopptak i plastisolasjon som har vært brukt i praksis med ulike eksponeringsforhold og bruksområder.

7.2 Supplerende forsøk

Frostpåvirkning har som så vidt nevnt, stor påvirkning for fuktopptaket i EPS, og delvis i XPS. Dette er på grunn av at is leder varme 80-100 ganger så bra som luft og har dermed stor påvirkning på varmemotstanden til termisk isolasjon. Fryse-tine sykluser vil øke vannabsorpsjonen til EPS på grunn av den delvis åpne porestrukturen. Det kan derfor være relevant å gjøre forsøk som baseres på fryse-tine sykluser og undersøke påvirkningen dette har på fuktopptaket.

Det kan være interessant å studere porestrukturen til tørt og fuktig materiale ved å bruke elektronmikroskop for å se om det hender noe med porestrukturen når isolasjonen blir utsatt for stående vanntrykk. I tillegg kan man måle de våte prøvene i et spektroskop og sammenligne med en ny prøve og se om de inneholder de samme organiske materialene, eller for å undersøke hvilke grunnstoff som er i materialet. Dette kan hjelpe med å forstå hva som skjer på mikroskopisk nivå når plastisolasjon blir våt.

Påvirkningen ulike typer ekspansjonsgass har på de termiske egenskapene til XPS er et relevant tema å undersøke videre. I tillegg kan det være nyttig å studere produksjonsprosessen til EPS og XPS for å undersøke hvilke faktorer under produksjon som fører til hvilke resultater med tanke på porestruktur og andre materielle egenskaper.

Uttørkingsegenskapene til plastisolasjon er en viktig faktor ved fuktrelaterte situasjoner. Det kan være relevant å studere disse for å forstå hvordan plastisolasjon oppfører seg i praksis ettersom den ofte vil bli utsatt for tørking. Hvis en gjør et forsøk ved nedsenking av isolasjonen i vann, kan prøvestykkene bli tørket etter at forsøket er avsluttet. Dette kan implisere hvor fort de ulike prøvestykkene tørker, samt om tørkingen fører til massetap, endrede dimensjoner, endring i porestruktur eller krymping i tykkelse.

I tillegg er det interessant å innhente plastisolasjon fra ulike fuktutsatte bruksområder i felt. Dette kan være isolasjon brukt i bakken eller i omvendte tak, inkludert grønne tak. Måling av fuktopptak i EPS og XPS brukt som flyteelement er også av interesse. Resultater fra dette kan sammenlignes med studier basert på laboratorieforsøk, og undersøke hvilke forsøk som simulerer forhold som er nærmest virkeligheten.

7.3 Varmetapsvurdering

Resultater fra forsøket for bestemmelse varmemotstand og den beregnede varmekonduktiviteten til vått materiale kan brukes videre til å beregne U-verdi for bygningsdelen. På denne måten kan man se hva vått kontra tørt materiale har å si for den totale U-verdien til bygget. Varmemotstanden (R_w) av det våte prøvestykket kan regnes ut ved å vite varmekonduktiviteten av vått materiale (λ_w) og tykkelsen (d) til det (Novakovic et al., 2016):

$$R_w = \frac{d}{\lambda_w} \quad (9)$$

Denne verdien kan videre brukes til å beregne U-verdien til bygningsdelen, hvor R_{rest} er varmemotstanden til resten av bygningsdelen.

$$U_{tot} = \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_{rest}} \quad (10)$$

Det kan også være hensiktsmessig å utføre energiberegninger i simuleringsprogrammene SIMIEN eller IDA ICE, for å undersøke hvor stor betydning fuktinnhold i isolasjon i de ulike bygningsdelene har for den totale U-verdien til bygget.

7.4 Forbedring av prøvemetoder

Det bør utredes hvordan standarden for bestemmelse av fuktopptak kan forbedres for å ta hensyn til svingninger i atmosfæretrykket. Når forsøket utføres burde atmosfæretrykket måles, og det kan utarbeides en metode for å bestemme en korrigeringsfaktor for atmosfæretrykk.

Det finnes ulike forsøk som omhandler vannabsorpsjon i isolasjon. Alle er ikke i henhold til en standard. «Soil immersion test» er en metode hvor isolasjonsprøvestykker blir lagt i fuktig jord. Det later til å gi en bedre prognose for det fuktopptaket isolasjon som skal ligge i bakken vil få. Dette er på grunn av at forutsetningene som blir satt i et nedsenkingsforsøk i fuktig jord er mye nærmere bruksområdets virkelige tilstand. (Cai et al., 2017a)

Det eksisterer i dag ingen prøvemetode som kan korrelere fuktinnholdet resultert fra laboratorieforsøk med langtidsytelse av EPS og XPS i bakken. Dette er på grunn av at tilstanden under bakken, slik som drenering, grunnvannsdypde og installasjonsretning, spiller en større rolle for isolasjonens fuktopptak enn for tidsperioden, spesielt for EPS-isolasjon. Disse varierende tilstandene under bakken kan vanskelig bli studert i et laboratorieforsøk ettersom de er tidkrevende og har høye kostnader. Denne type forsøk er dermed ikke utviklet i noen stor grad, og resultater er veldig sjeldne (Cai et al., 2017a). Likevel kan et forsøk på å utbedre dem være relevant.

Noen artikler som er studert nevner mulige forbedringer av dagens prøvemetoder, blant annet blir dette nevnt i Cai et al. (2017b). En videre undersøkelse på dette området kunne vært interessant for å vurdere om dagens standardiserte metoder burde endres.

8 Referanseliste

- Abdou, A. A., og Budaiwi, I. M. (2005). Comparison of thermal conductivity measurements of building insulation materials under various operating temperatures. *Journal of Building Physics*, 29(2), 171-184. doi: <https://doi.org/10.1177/1744259105056291>
- Abahri, K., Bennacer, R. og Belarbi, R. (2016) Sensitivity analyses of convective and diffusive driving potentials on combined heat air and mass transfer in hygroscopic materials, *Numerical heat transfer*, 69(10). doi: 10.1080/10407782.2015.1109389
- Al-Ajlan, S. A. (2006). Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied thermal engineering*, 26(17-18), 2184-2191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.006>
- Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and environment*, 40(3), 353-366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013>
- Alvey, J. B., Patel, J., og Stephenson, L. D. (2017). Experimental study on the effects of humidity and temperature on aerogel composite and foam insulations. *Energy and Buildings*, 144, 358-371. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.070>
- ASTM C272/C272M, *Standard Test Method for Water Absorption of Core Materials for Sandwich Constructions*. ASTM International (2016). doi: 10.1520/C0272_C0272M-16
- ASTM D2842, *Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics*. ASTM International (2012). doi: 10.1520/D2842-12
- Auracher, H. (1978). On the measurement of thermal conductivity in moist porous materials. *International Journal of Refrigeration*, 1(1), 39-46. doi:[https://doi.org/10.1016/0140-7007\(78\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0140-7007(78)90105-6)
- Bomberg, M. (1983). Laboratory Methods for Determining Moisture Absorption of Thermal Insulations: I. *Journal of Thermal Insulation*, 6(4), 232-249.
- Bomberg, M. (1989). Testing water vapor transmission: unresolved issues. In *Water Vapor Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanisms and Measurement*. ASTM International. doi <https://doi.org/10.1520/STP22968S>
- Bomberg, M. og Dillon, R.F. (1984). Laboratory Methods for Determining Moisture Absorption of Thermal Insulations: III. Interlaboratory Comparison of water intake of rigid thermal insulations, *Journal of Thermal Insulation*, 8. doi: 0148-8287/84/01
- Bomberg, M., og Kumaran, M. (1995). *Procedures to Predict Long-term Thermal Performance of Boardstock Foam Insulations and Supplementary Report on Expanded Polystyrene*. National Research Council Canada, Institute for Research in Construction.
- Bomberg, M. og Trechsel, H.R. (1989). Testing Water Vapor Transmission: Unresolved Issues, Vapor Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanisms and Measurement, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, s. 157-167.

Byggforskserien 421.132. SINTEF Byggforsk (2005) *421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. Tilgjengelig fra:
https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag (Hentet: 5. September 2017)

Byggforskserien 471.010. SINTEF Byggforsk (2003) *471.010 Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer*. Tilgjengelig fra:
https://www.byggforsk.no/dokument/209/varmekonduktivitet_og_varmemotstand_for_bygningsmaterialer (Hentet: 5. September 2017)

Byggforskserien 521.111. SINTEF Byggforsk (2012) *521.111 Golv på grunn med ringmur. Utførelse*. Tilgjengelig fra:
https://byggforsk.no/dokument/328/golv_paa_grunnen_med_ringmur_utfoerelse (Hentet: 25. april 2018)

Byggforskserien 521.112. SINTEF Byggforsk (2005) *521.112 Golv på grunnen med ringmur. Varmeisolering, frostsikring og beregning av varmetap*. Tilgjengelig fra:
https://byggforsk.no/dokument/1541/golv_paa_grunnen_med_ringmur_varmeisolering_frostsikring_og_beregning_av_varmetap (Hentet: 11. mai 2018)

Byggforskserien 523.111. SINTEF Byggforsk (2015) *523.111 Yttervegger mot terreng: varmeisolering og tetting*. Tilgjengelig fra:
https://www.byggforsk.no/dokument/3304/yttervegger_mot_terreng_varmeisolering_og_tetting (Hentet: 5. September 2017)

Byggforskserien 523.127. SINTEF Byggforsk (2004) *523.127 Betongvegg mot terreng*. Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/349/523127_betongvegg_mot_terreng (Hentet: 5. september 2017)

Byggforskserien 523.133. SINTEF Byggforsk (2014) *523.133 Murte yttervegger av lettklinker mot terreng*. Tilgjengelig fra:
https://byggforsk.no/dokument/352/murte_yttervegger_av_lettklinkerblokker_mot_terreng (Hentet: 5. September 2017)

Byggforskserien 525.207. SINTEF Byggforsk (2007) *525.207 Kompakte tak*. Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/387/525207_kompakte_tak (Hentet: 20. april 2018)

Byggforskserien 542.303. SINTEF Byggforsk (2010) *542.303 Fasadesystemer med puss på isolasjon*. Tilgjengelig fra:
https://byggforsk.no/dokument/477/fasadesystemer_med_puss_paa_isolasjon (Hentet: 20. april)

Byggforskserien 544.823. SINTEF Byggforsk (2013) *544.823 Sedumtak*. Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/4093/544823_sedumtak (Hentet: 20 april 2018)

Byggforskserien 573.344. SINTEF Byggforsk (2004) *573.344 Varmeisolasjonsmaterialer: Typer og egenskaper*. Tilgjengelig fra:
https://www.byggforsk.no/dokument/604/varmeisolasjonsmaterialer_typer_og_egenskaper (Hentet: 5. September 2017)

- Cai, S., Zhang, B., og Cremaschi, L. (2017a). Review of moisture behavior and thermal performance of polystyrene insulation in building applications. *Building and Environment*, 123, 50-65. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.034>
- Cai, S., Zhang, B., og Cremaschi, L. (2017b). Moisture behavior of polystyrene insulation in below-grade application, *Energy and Buildings*, 159, 24-38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.067>
- Costeux, S., Vo, C. V., og Hood, L. S. (2010, September). Long term performance of insulation foams. In *Foams 2010 SPE Conference*. Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/profile/Stephane_Costeux/publication/260985574_Long_term_performance_of_insulation_foams/links/5552163608ae6943a86d6c19.pdf (Hentet: 2. februar 2018)
- Dechow, F.J. og Epstein, K.A. (1978) Laboratory and Field Investigations of Moisture Absorption and Its Effect on Thermal Performance of Various Insulations, *American Society for Testing and Materials*, 2, 234-260. doi: <https://doi.org/10.1520/STP35747S>
- Domínguez-Muñoz, F., Anderson, B., Cejudo-López, J. M., & Carrillo-Andrés, A. (2010). Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. *Energy and Buildings*, 42(11), 2159-2168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.006>
- DOW building solutions (2018). Tekniske Data, STYROFOAM™ A-N. Tilgjengelig fra: <https://www.dow.com/en-us/products/styrofoambrandextrudedpolystyrenexpinsulation#sort=%40gtitle%20ascending> (Hentet: 10. mars 2018)
- Ducoulombier, L. og Lafhaj, Z. (2017) Comparative study of hygrothermal properties of five thermal insulation materials, *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 628-640. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.11.005>
- Duškov, M. (1997). Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 15(1-3), 147-181. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(97\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(97)00011-3)
- Epstein, K.A. og Putnam, L.E. (1977). Performance criteria for the protected membrane roof system, *Journal of Thermal Insulation*, 1, s. 149-167. Tilgjengelig fra: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/109719637700100204> (Hentet: 15. april 2017)
- European commission (2017) *Building* Tilgjengelig fra: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings> (Hentet: 15. april 2017)
- Forgues, A.O. (1983). Laboratory Methods for Determining Moisture Absorption of Thermal Insulations: II: Comparison of three water absorption test methods with field performance data, *Journal of Thermal insulation*, 7(2), 128-137. Tilgjengelig fra: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/109719638300700206> (Hentet: 15. Mars 2018)

GLAVA AS (2013). GLAVA EPS S 80 BLOKK, *FDV-dokumentasjon*. Tilgjengelig fra: <https://www.glava.no/bygg/produkter/skumplastisolasjon/glava-eps/glava-eps-s-80/> (Hentet: 10. Mars 2018)

Gnip, I.Y., Kersulis, S.V. og Vaitkus, S. (2006). Water absorption of expanded polystyrene boards, *Polymer Testing*, 25, 635-641. doi: 10.1016/j.polymertesting.2006.04.002

Hedlin, C.P. (1983). Effect of Moisture on Thermal Resistance of Some Insulations in a Flat Roof under Field-Type Conditions, *Thermal Insulation, Materials, and Systems for Energy Conservation in the '80s*. American Society for Testing and Materials, s 602-625.

Hoffee, A. R. (1989). Variability of Water Vapor Transmission Rates of Extruded Polystyrene Using ASTM E 96-80 (Desiccant Method). In *Water Vapor Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanisms and Measurement*. ASTM International. doi:10.1520/STP22964S

Hourston, D. J., Song, M., Hammiche, A., Pollock, H. M., & Reading, M. (1996). Modulated differential scanning calorimetry: 2. Studies of physical ageing in polystyrene. *Polymer*, 37(2), 243-247. doi: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)81094-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)81094-9)

Jerman, M., og Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*, 53, 39-46. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.002>

Kočí, V., Vejmelková, E., Čáchová, M., Koňáková, D., Keppert, M., Maděra, J., og Černý, R. (2017). Effect of moisture content on thermal properties of porous building materials. *International Journal of Thermophysics*, 38(2), 28. doi: <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2164-8>

Koru, M. (2016). Determination of thermal conductivity of closed-cell insulation materials that depend on temperature and density. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(11), 4337-4346. doi:<https://doi.org/10.1007/s13369-016-2122-6>

Krzewinski, T.G. og Tart Jr., R.G. (red.) (1985) *Thermal Design Considerations in Frozen Ground Engineering*. USA:ASCE Publications

Lakatos, A. (2012). Investigation of water sorption properties of different insulating materials. *Adv. Res. Sci. Areas*, 6, 1827-1831. doi: 978-80-554-0606-0

Lakatos, Á. (2016). Moisture induced changes in the building physics parameters of insulation materials. *Science and Technology for the Built Environment*, 22(3), 252-260. doi: <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1131567>

Lakatos og Kalmár (2012) Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials, *Building Services Engineering Research and Technology*, 34(4), 407–416. Doi: 10.1177/0143624412462043

Lakatos, Á., og Kalmár, F. (2013). Investigation of thickness and density dependence of thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials. *Materials and structures*, 46(7), 1101-1105. doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9956-5>

Levy, M. M. (1966). Moisture Vapor Transmission and Its Effect on Thermal Efficiency of Foam Plastics. *Journal of Cellular Plastics*, 2(1), 37-45. Tilgjengelig fra: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0021955x6600200111> (Hentet: 5. april)

Lindqvist et al., (2011) Ekspandert polystyren i vegbygging. Bacheloroppgave. Høgskolen i Østfold – Avdeling for ingeniører

Litovsky, E., og Kleiman, J. (2005). Relative influence of heat transfer mechanisms on apparent thermal conductivity of porous materials. In *26 th International Thermal Conductivity Conference*, s. 389-400

Litovsky, E., Shapiro, M., og Shavit, A. (1996). Gas pressure and temperature dependences of thermal conductivity of porous ceramic materials: Part 2, refractories and ceramics with porosity exceeding 30%. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(5), 1366-1376. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08598.x>

McFadden, T. (1988). Thermal performance degradation of wet insulations in cold regions. *Journal of cold regions engineering*, 2(1), 25-34. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1988\)2:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1988)2:1(25))

Mar, J. D., Litovsky, E., og Kleiman, J. (2008). Modeling and database development of conductive and apparent thermal conductivity of moist insulation materials. *Journal of building physics*, 32(1), 9-31. doi: <https://doi.org/10.1177/1744259108092001>

Mattila, H. P. (2017) Moisture Behavior of Building Insulation Materials and Good Building Practices. *EPS*, 15, 31. Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/profile/Hannu_Petteri_Mattila/publication/321010420_Moisture_Behavior_of_Building_Insulation_Materials_and_Good_Building_Practices/links/5a0706baa6fdcc65eab3a1a5/Moisture-Behavior-of-Building-Insulation-Materials-and-Good-Building-Practices.pdf (Hentet: 15. mars 2018)

Novakovic, V. et al. (2016) *ENØK i bygninger: effektiv energibruk* 3. utg., Oslo: Gyldendal undervisning.

NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010 *Byggematerialer og –produkter. Hygrotermiske egenskaper, Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier*. Standard Norge: Oslo. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=NS-EN+ISO+10456+Byggematerialer+og+produkter.+Hygrotermiske+egenskaper%2c+Tabulert+e+dimensjonerende+verdier+og+prosedyrer+for+bestemmelse+av+deklarererte+og+praktiske+termiske+verdier.&subscr=1> (Hentet: 5. September 2017)

NS-EN 12086:2013 *Varmeisoleringsprodukter til bruk i bygninger. Bestemmelse av egenskaper med hensyn til vanddampgjennomgang*. Standard Norge: Oslo. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=NS-EN+12086%3a2013+> (Hentet: 15. februar 2018)

NS-EN 12087:2013 *Varmeisoleringsprodukter til bruk i bygninger. Bestemmelse av langtids vannabsorpsjon ved nedsenking*. Standard Norge: Oslo. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=NS-EN+12087%3a2013+Varmeisoleringsprodukter+til+bruk+i+bygninger.+Bestemmelse+av+langtids+vannabsorpsjon+ved+nedsenking.&subscr=1> (Hentet: 15.februar 2018)

NS-EN 12088:2013 *Varmeisoleringsprodukter til bruk i bygninger. Bestemmelse av langtids vannabsorpsjon ved diffusjon*. Standard Norge: Oslo. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=NS-EN+12088%3a2013+> (Hentet: 15. februar 2018)

NS-EN 12667:2001 *Byggematerialers og produkters termiske egenskaper - Bestemmelse av varmemotstand ved skjermet og uskjermet varmestrømmåler - Produkter med høy og middels varmemotstand*. Standard Norge: Oslo. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=NS-EN+12667+> (Hentet: 16. mai 2018)

NS-EN 13163:2012+A2:2016 *Varmeisolasjonsprodukter for bygninger. Fabrikframstilte produkter av ekspandert polystyren (EPS). Krav*. Standard Norge: Oslo. Tilgjengelig fra: [http://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=Varmeisolasjonsprodukter+for+bygninger++Fabrikframstilte+produkter+av+ekspandert+polystyren+\(EPS\)++Krav](http://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=Varmeisolasjonsprodukter+for+bygninger++Fabrikframstilte+produkter+av+ekspandert+polystyren+(EPS)++Krav) (Hentet: 5. September 2017)

NS-EN 13164:2012+ A1:2015 *Varmeisolasjonsprodukter for bygninger. Fabrikframstilte produkter av ekstrudert polystyrenskum (XPS) Krav*. Standard Norge: Oslo. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=NS+13164&subscr=1> (Hentet: 5. September 2017)

Nurmikolu, A., og Kolisoja, P. (2005). Extruded polystyrene (XPS) foam frost insulation boards in railway structures. In *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING* (Vol. 16, No. 3, p. 1761). AA BALKEMA PUBLISHERS. doi: 10.3233/978-1-61499-656-9-1761

O'Brien, A.M. og Mc Guckin, C., (2016) The Systematic Literature Review Method: Trials and Tribulations of Electronic Database Searching at Doctoral Level, *Sage Research Methods cases*. doi: <http://dx.doi.org/10.4135/978144627305015595381>

Ojanen, T. og Kokko, E. (1997) Moisture performance analysis of EPS frost insulation, *Insulating Materials: Testing and Applications*, Vol. 3. Tilgjengelig fra: https://compass.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP12291S.htm (Hentet: 2. februar 2018)

Ossa, A. og Romo, M.P. (2012) Confining stress influence on EPS water absorption capability, *Geotextiles and Geomembranes*, 35, s. 132-137. doi: 10.1016/j.geotextmem.2012.03.003

Owens Corning Foam Insulation (2011). FOAMULAR® Extruded Polystyrene Insulation Resisting Water Absorption, the Key for High Performance Foam Plastic Rigid Insulation, *Technical Bulletin*, Owens Corning: Ohio, USA.

Ozkan, E. (1994) Thermal and Mechanical Properties of Cellular Polystyrene Polyurethane Insulation Materials Aged on a Flat Roof in Hot-Dry Climate, *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, 22 (2), 149-160. doi: <https://doi.org/10.1520/JTE12649J>

prEN 12088:1997 *Thermal insulating products for building application – Determination of long term water absorption by diffusion*. European committee for standardization: Brüssel.

Pakkala, T.A, og Lahdensivu, J. (2014) Long-term water absorption tests for frost insulation materials taking into account frost attack, *Case Studies in Construction Materials*, (1), 40-45. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2014.02.001>

Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>

Pedersen B. (2017) *Varmeledning*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/varmeledning> (Hentet: 5. mars 2018)

Sandberg, P. I. (1986). Moisture content and thermal conductivity in soil insulation. *Journal of Thermal Insulation*, 10(2), 124-141. doi: <https://doi.org/10.1177/109719638601000206>

Sarlin, J., Törmälä, P. og Järvälä, P. (1986) The Effect of Moulding on the Absorption of Water in Expanded Polystyrene (EPS), *Journal of cellular plastics*, 22(5). Tilgjengelig fra: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021955X8602200502> (Hentet: 15. mars 2018)

Šadauskienė, J. et al. (2009) Analysis of Distribution of Properties of Expanded Polystyrene in Production and Their Changes in Exploitation Conditions, *ISSN 1392-1320 Material Science*, 15(4), 372-376. Tilgjengelig fra: <https://www.researchgate.net/publication/265875135> (Hentet: 15. mars 2018)

Smith, R., Alcott, J., og Mazor, M. (2014). Design Considerations for Sustainable Extruded Polystyrene (XPS) Thermal Insulation. In *Next-Generation Thermal Insulation Challenges and Opportunities*. ASTM International. doi: 10.1520/STP157420130089

Stagrum, A.E: *Fukt i isolasjon mot terreng*. TBA4521 - Bygnings- og materialteknikk, fordypningsprosjekt. NTNU, Trondheim 2017

Szodrai, F., og Lakatos, Á. (2014). Measurements of the thermal conductivities of some commonly used insulating materials after wetting. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(11), 2881-2886.

Tobiasson, W., Greatorex, A., og Van Pelt, D. (1986). *New wetting curves for common roof insulations*. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.

Tobiasson, W., og Ricard, J. (1979). *Moisture gain and its thermal consequence for common roof insulations*, (s.4-16). US Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Tilgjengelig fra: <http://docserv.nrc.nrc.net/pdfs/technical/421.pdf>

Vėjelis, S. og Vaitkus, S (2006) Investigation of Water Absorption by Expanded Polystyrene Slabs, *ISSN 1392-1320 Materials Science*, 12(2). Tilgjengelig fra: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.551.7552> (Hentet: 5. februar 2018)

Vo et al. (2011) Advances in Thermal Insulation of Extruded Polystyrene Foams, *Cellular Polymers*, 30(3). Tilgjengelig fra: <https://search.proquest.com/docview/868340346?accountid=12870> (Hentet: 5. februar 2018)

Whalen, J. (2002). Performance of molded expanded polystyrene (EPS) thermal insulation in below-grade applications. In *Insulation Materials: Testing and Applications: 4 th Volume*. ASTM International. doi: 10.1520/STP11025S

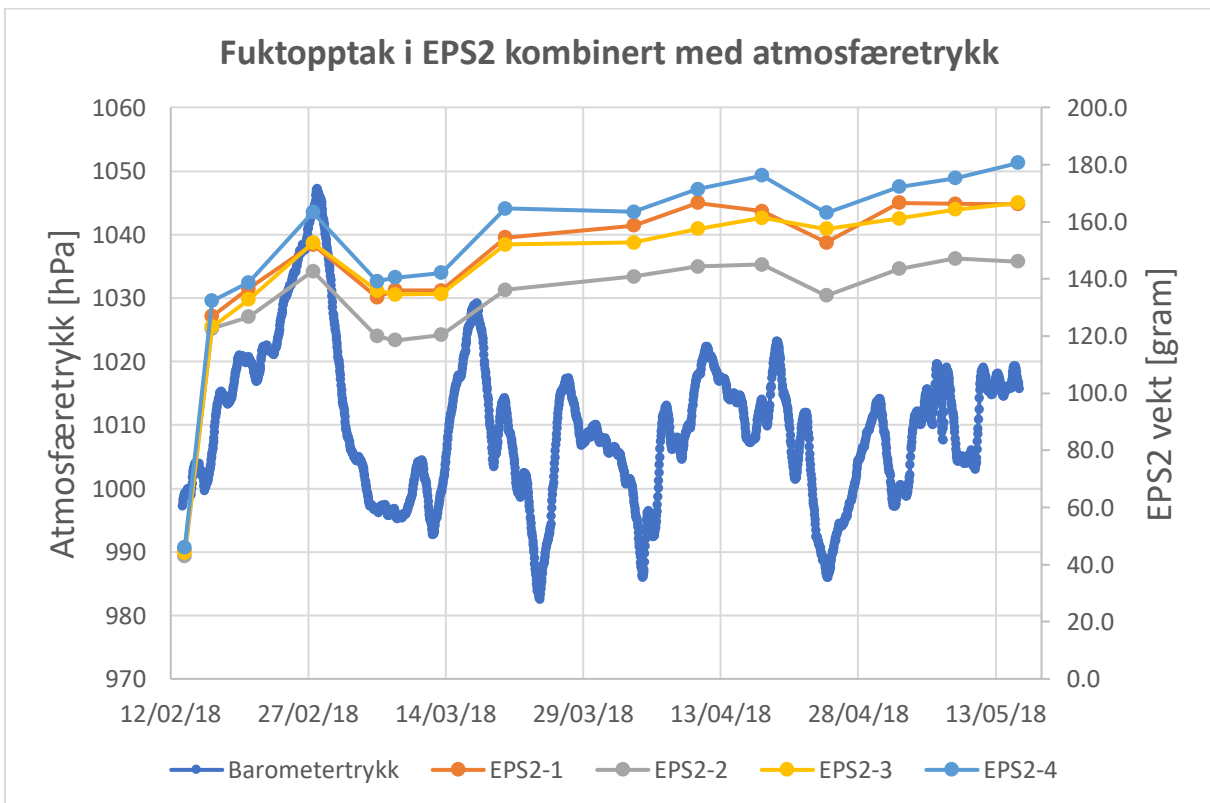
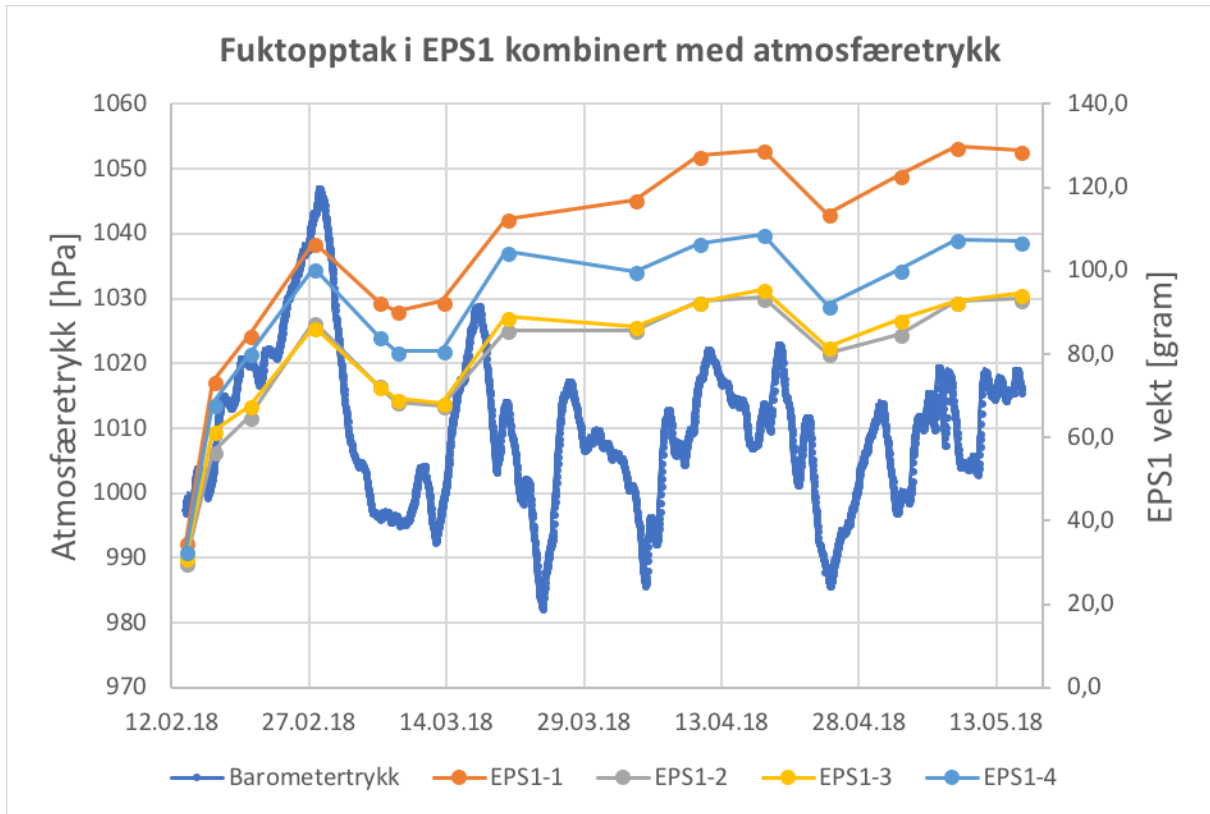
Yucel, K. T., Basyigit, C., og Ozel, C. (2003). Thermal insulation properties of expanded polystyrene as construction and insulating materials, *15th Symposium in Thermophysical Properties*, 54-66.

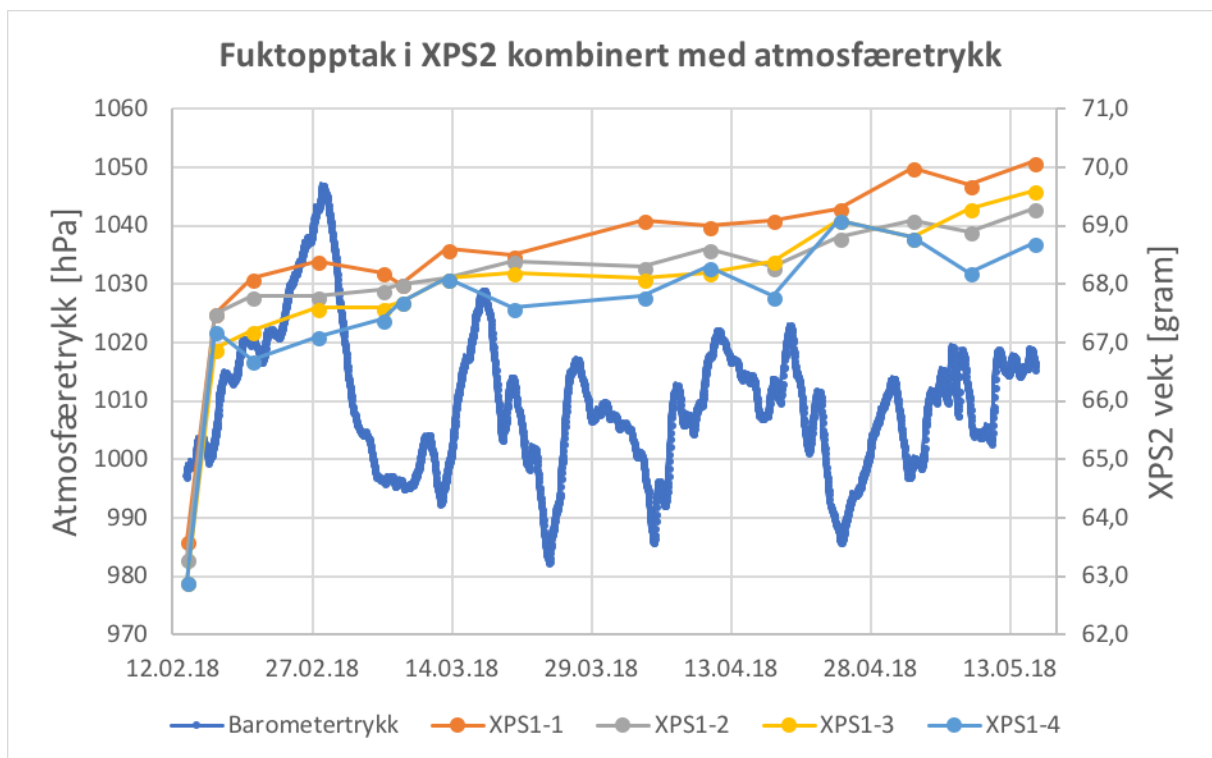
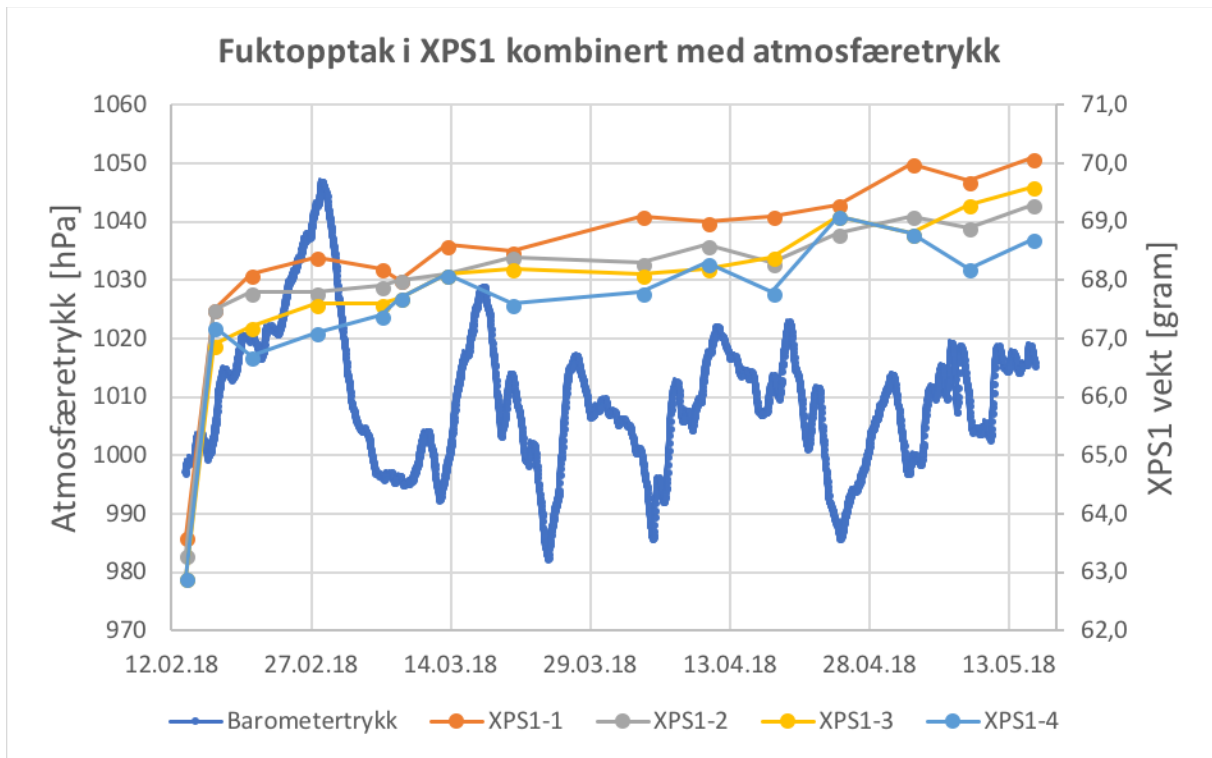
Vedlegg A: Søkeord og antall treff

Søkeord	Oria	Google Scholar	Web of science	Science Direct	Scopus
"Expanded polystyrene" OR EPS	2 749 478	825 000	16 134	63311	24 532
AND "water absorption" OR "water sorption"	24 561	4530	62	911	702
AND ("Testing methods" OR "Laboratory test" OR "Immersion test" OR "Long term")	487	1710	4	483	14
("Moisture" OR "moist" OR "Moisture content" OR "wetting")	21033	35 100	242	105	792
AND ("Testing methods" OR "Laboratory test" OR "Immersion test" OR "Long term")	13463	16 100	7	2	23
("Moisture" OR "moist" OR "Moisture content" OR "wetting")					
AND ("Thermal conductivity" OR "Thermal performance")	6112	6010	26	15	209
"extruded polystyrene" OR "XPS"	326 837	705 000	105 575	50 724	113 785
AND ("water absorption" OR "water sorption")	80 465	10 800	181	70	620
AND ("Testing methods" OR "Laboratory test" OR "Immersion test" OR "Long term")	30 320	3240	43	1	42
("Moisture" OR "moist" OR "Moisture content" OR "wetting")	29 672	112 000	1385	564	5347
AND ("Testing methods" OR "Laboratory test" OR "Immersion test" OR "Long term")	14 020	17 700	123	4	340
"Plastic insulation" OR "Thermal insulation" OR "Insulating material"	454 151	16 500	18398	3841	52 868
AND ("water absorption" OR "water sorption")	58 877	10 800	303	64	745

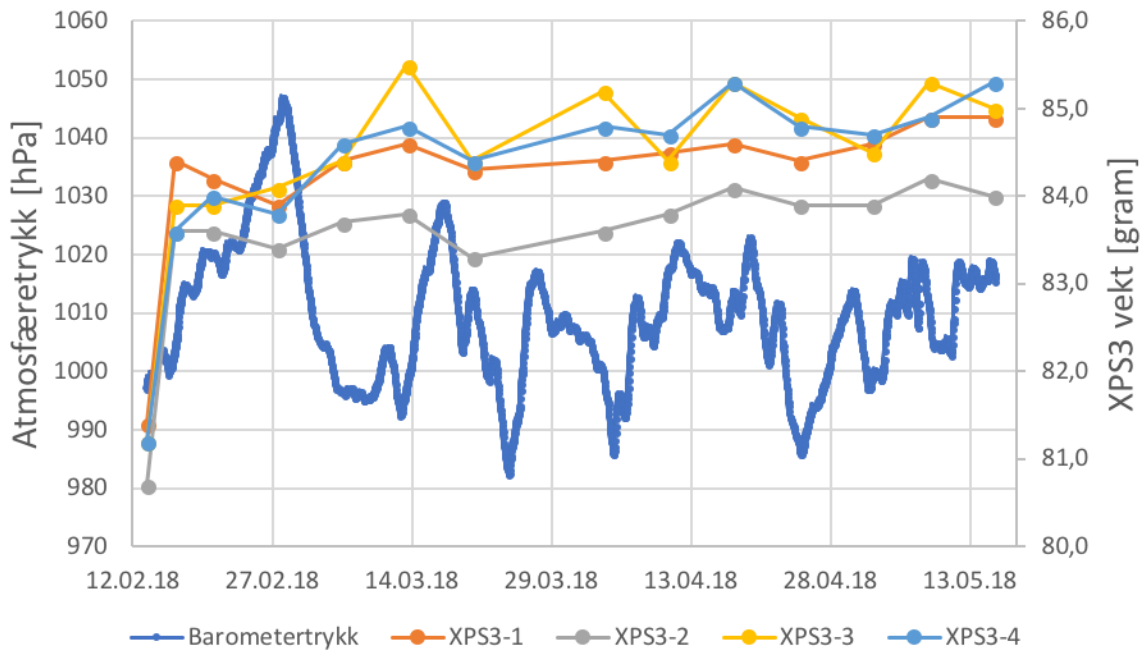
AND (“Testing methods” OR “Laboratory test” OR “Immersion test” OR “Long term”)	34 192	3580	14	3	103
(“Moisture” OR “moist” OR “Moisture content” OR “wetting”)	66 750	17 100	1393	220	3684
AND (“Testing methods” OR “Laboratory test” OR “Immersion test” OR “Long term”)	38 794	17 200	70	9	415
(“Moisture” OR “moist” OR “Moisture content” OR “wetting”) AND (“Thermal conductivity” OR “Thermal performance”)	41 369	16 500	336	81	1143

Vedlegg B: Målt fuktopptak i EPS og XPS ved nedsenking, forsøk 1

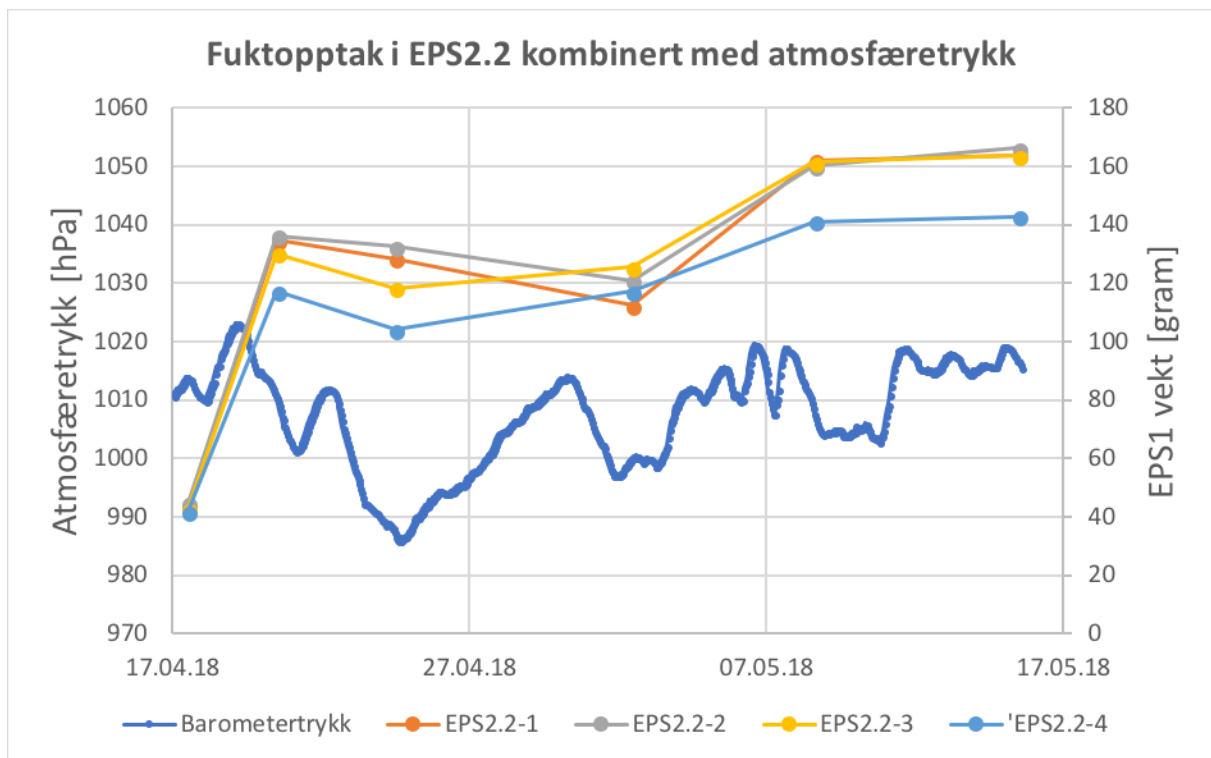
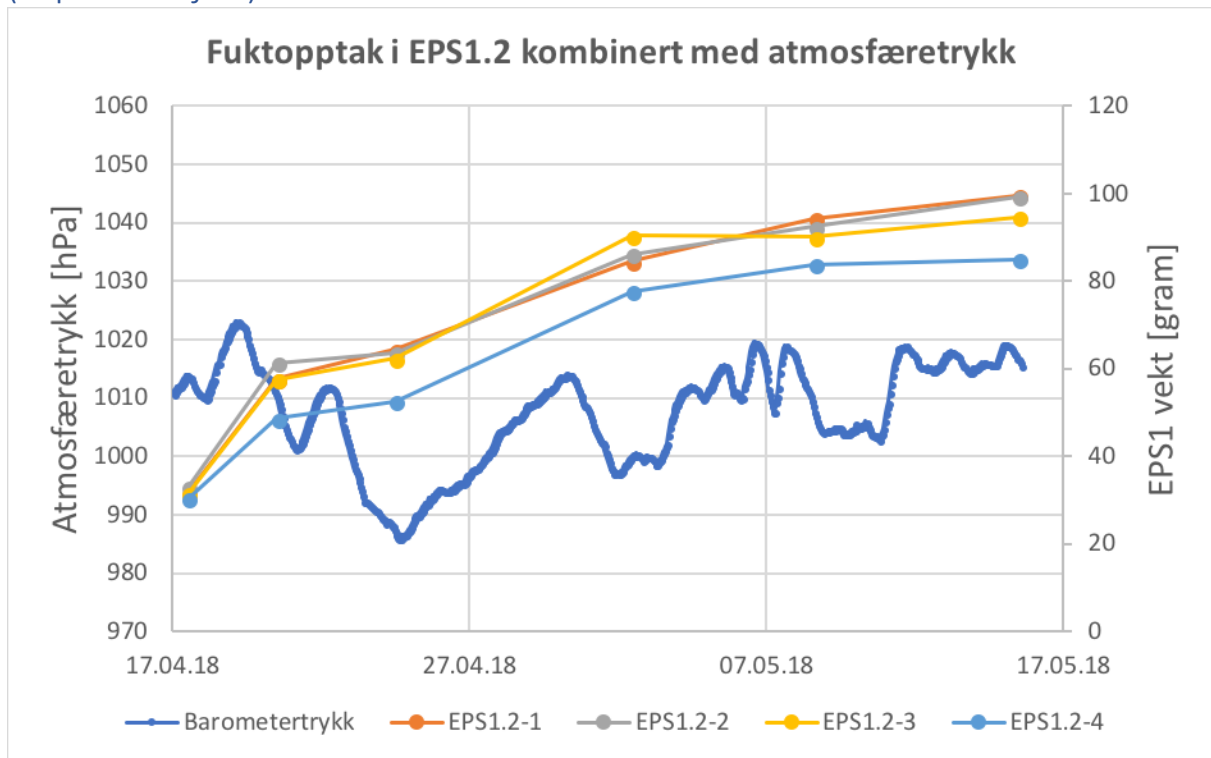




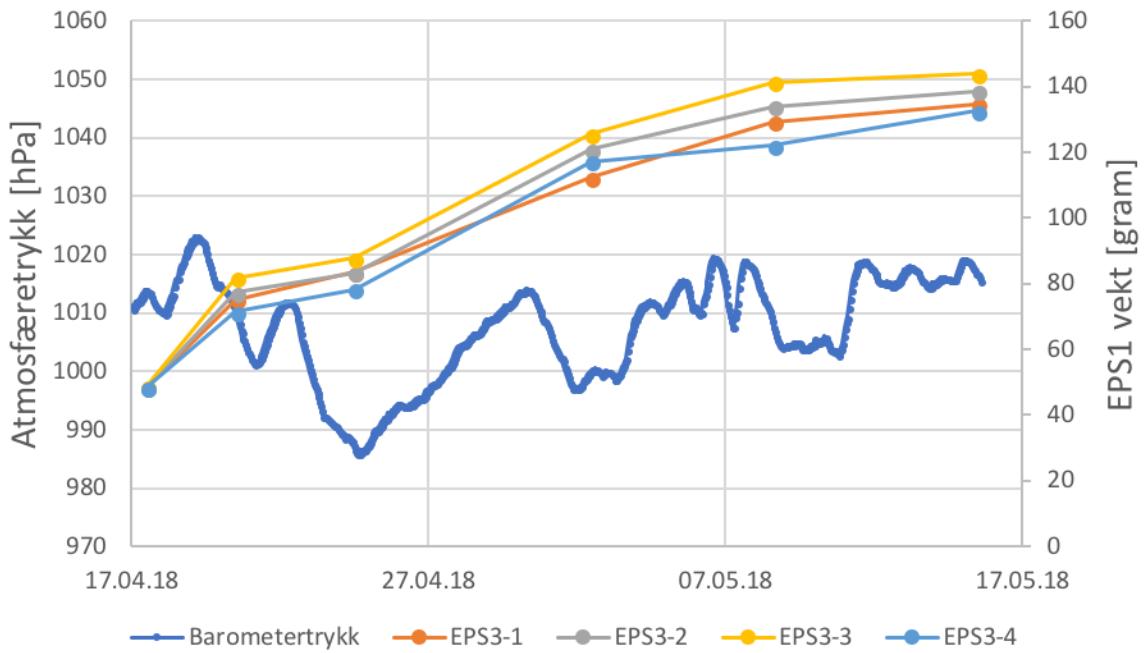
Fuktopptak i XPS3 kombinert med atmosfæretrykk



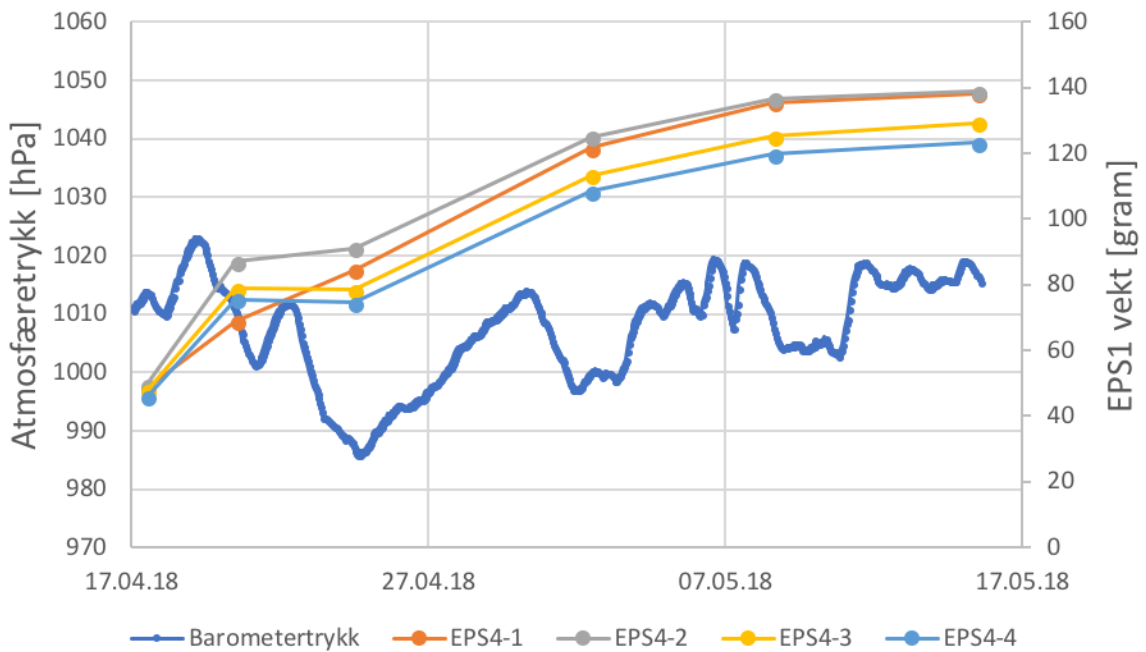
Vedlegg C: Målt fuktopptak i EPS ved nedsenking, forsøk 2 (reproduksjon)



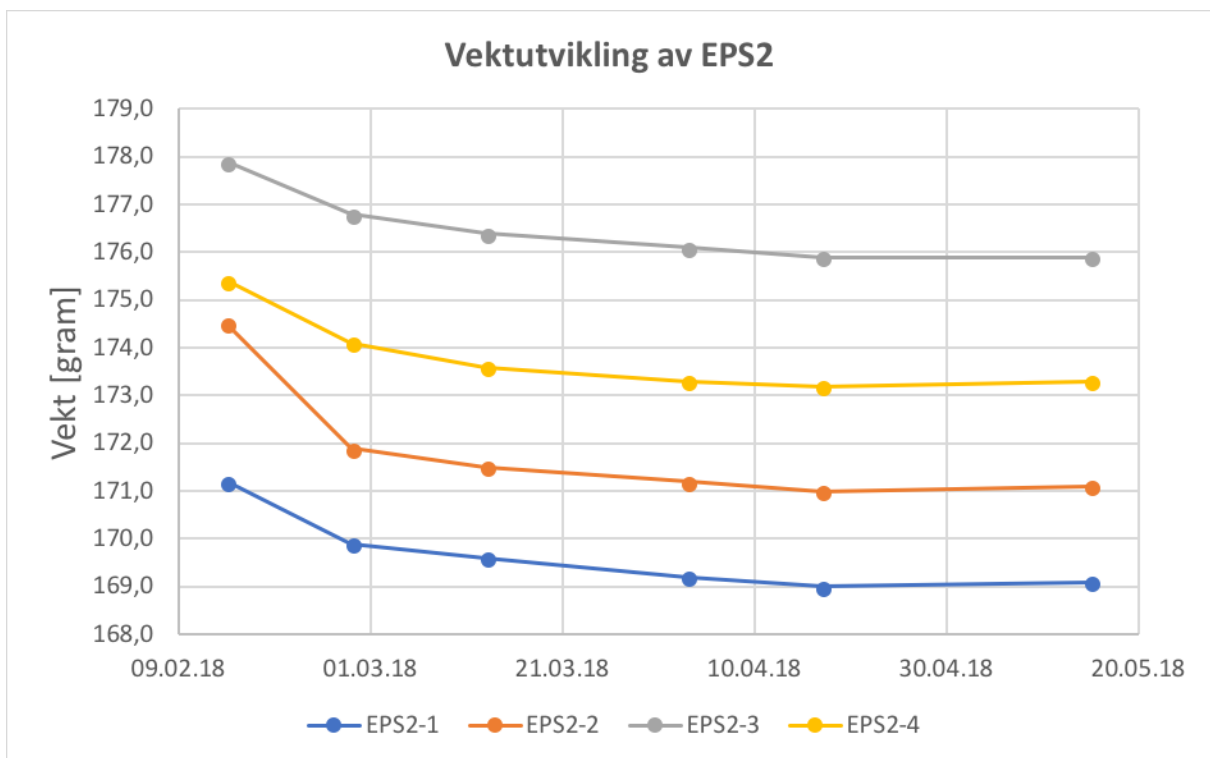
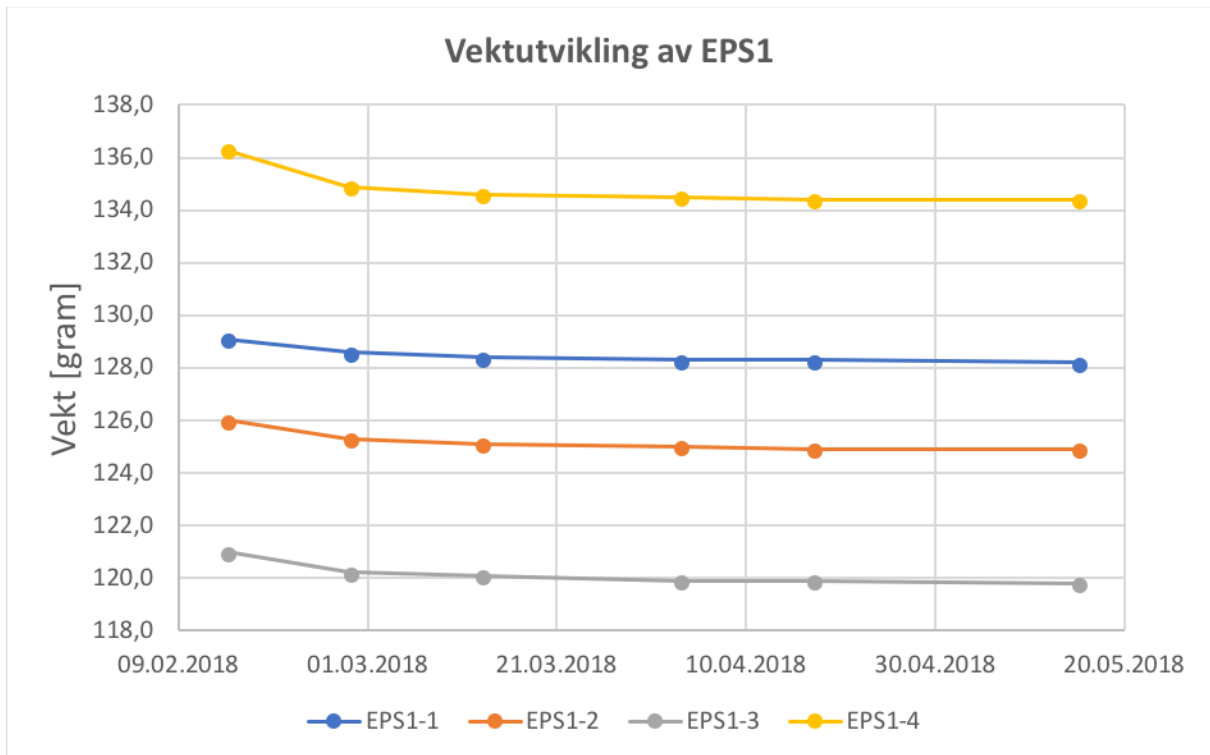
Fuktopptak i EPS3 kombinert med atmosfæretrykk

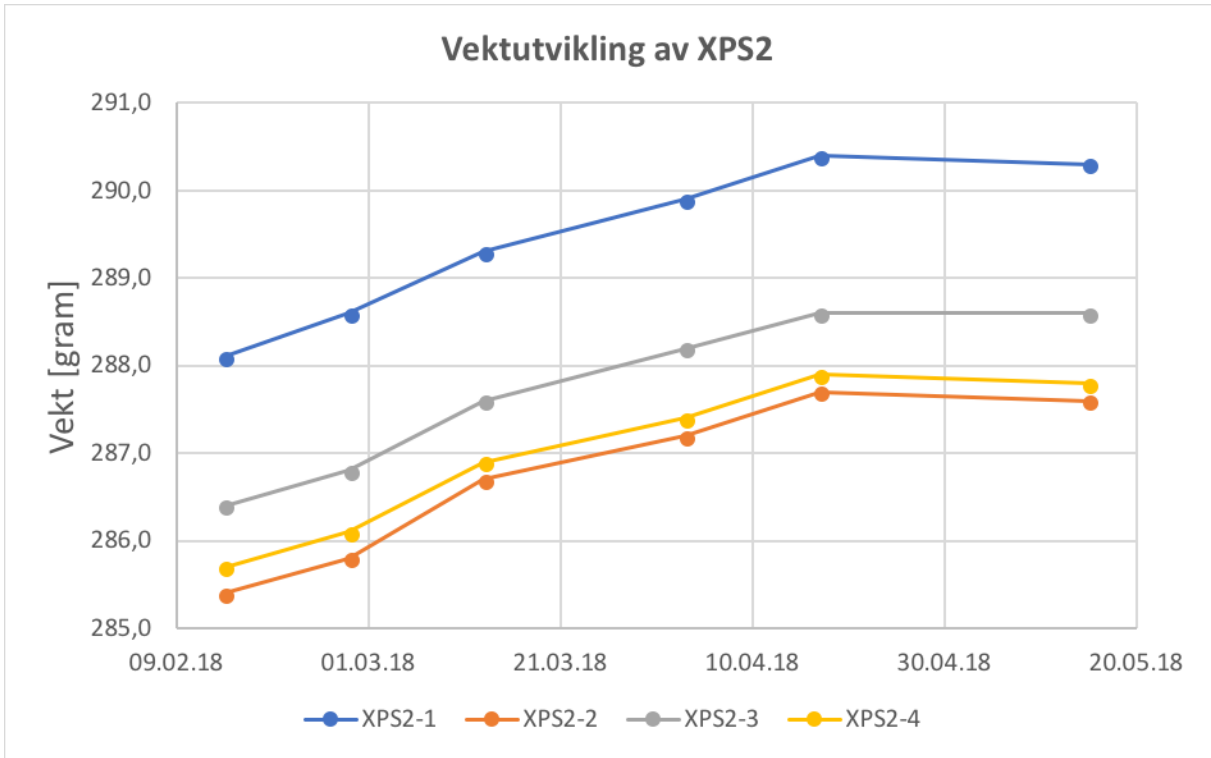
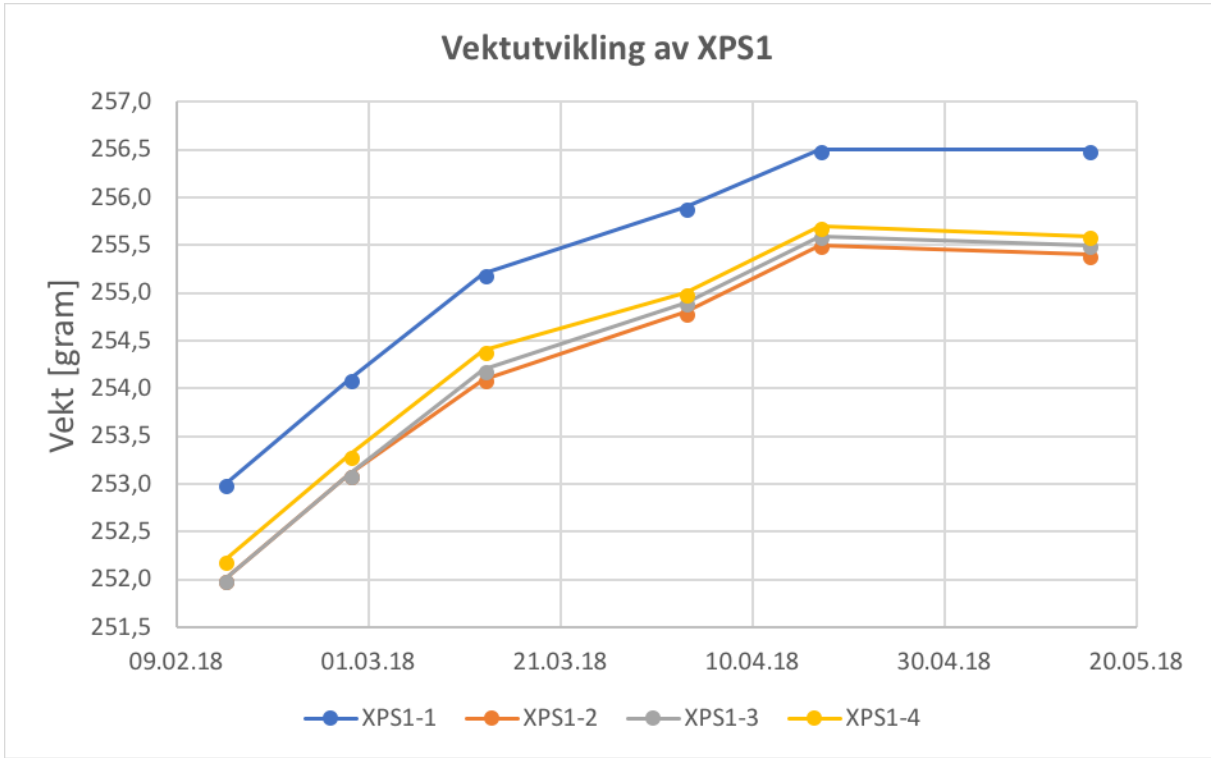


Fuktopptak i EPS4 kombinert med atmosfæretrykk

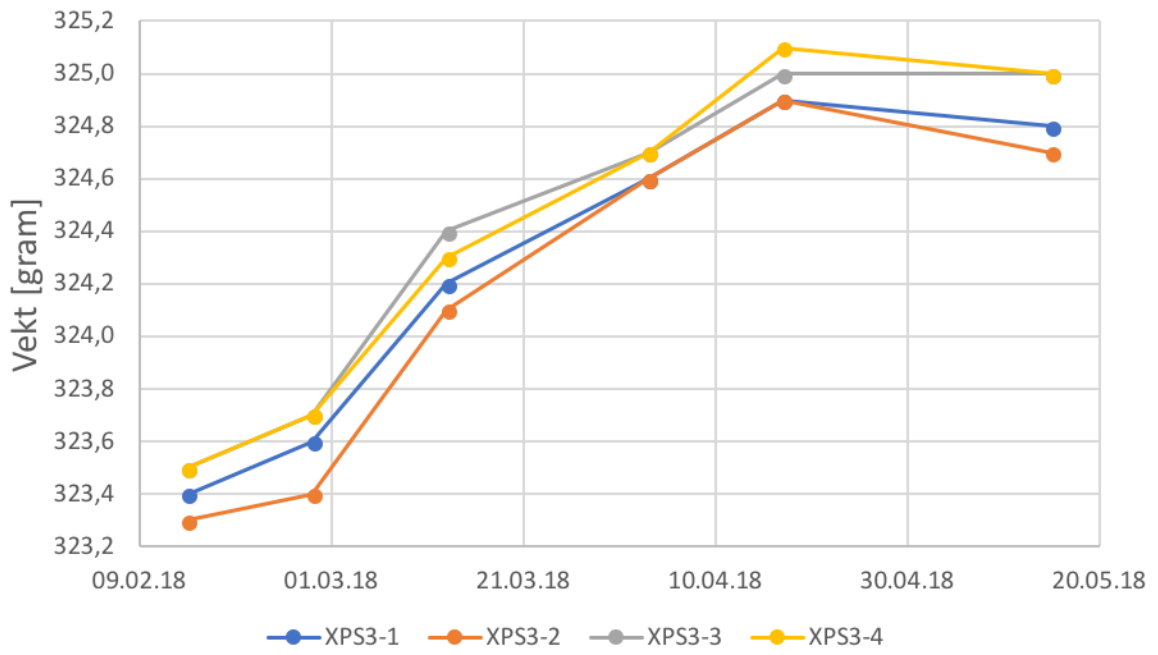


Vedlegg D: Målt vekt av EPS og XPS etter fuktig luft-forsøk





Vektutvikling av XPS3



Vedlegg E: Måling av varmemotstand til EPS, rapport fra SINTEF Byggforsk

Internrapport Varmemotstand og varmekonduktivitet

Rom 1	Kalibreringsfaktorer:	Øvre	0,00355180	+	-0,00000439	x Tmø
		Nedre	0,00361665	+	-0,00000548	x Tmn
	Temperaturdifferanse	Termoserie	0,00516675	+	-0,00001003	x Tm

Produsent:	Produktnavn:	Produkttype:
STUDENT ANNA STAGRUM	MASTEROPPGAVE VÅR 2018	EKSPANDERT POLYSTYREN

	EPS 1	EPS 2	Prøve 3	Prøve 4		Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4
lengde	500	499			masse før måling (g)	624,1	795,1		
bredde	499	499			masse etter måling (g)	592,1	740,5		
tykkelse ved måling	49,6	50,0			masse etter tørking (g)	213,2	269,9		
densitet kg/m ³	49,1	61,7	0,0	0,0	tara	-	-	-	-
fuktinnhold kg/kg	1,85	1,84	0,00	0,00	masseendring under prøving (%)	-5,1	-6,9	-	-

Prøve 1	$\alpha/V\emptyset$	α/Vn	$\alpha/V\square$	Tø	Tn	Tr	RF	R	
Middelverdier	AVG 4432	4236	3836	20	0,26	10,2	16,8	1,27	
Måleperiode:	START TIME : 16.05.2018 09:13:09 STOP TIME : 16.05.2018 13:40:56								
Stabilitetskontroll									
Temperatur øvre plate	20,01 °C			Varmestrømstetthet øvre		15,35	W/m ²	OK	Stabilitetskontroll
Temperatur nedre plate	0,26 °C			Varmestrømstetthet nedre		15,31	W/m ²	OK	
Temperatur rom	10,17 °C			Varmestrømstetthet		15,33	W/m ²		
Middeltemperatur prøve	10,14 °C			Varmemotstand		R = 1,27	m ² K/W		
Temperatur differanse	19,43 °C			OK		Varmekonduktivitet	$\square = 0,03914$	W/mK	

Prøve 2	$\alpha/V\emptyset$	α/Vn	$\alpha/V\square$	Tø	Tn	Tr	RF	R	
Middelverdier	AVG 4719	4500	3823	20	0,26	10	14,5	1,19	
Måleperiode:	START TIME : 18.05.2018 06:32:59 STOP TIME : 18.05.2018 14:28:28								
Stabilitetskontroll									
Temperatur øvre plate	19,99 °C			Varmestrømstetthet øvre		16,35	W/m ²	OK	Stabilitetskontroll
Temperatur nedre plate	0,26 °C			Varmestrømstetthet nedre		16,27	W/m ²	OK	
Temperatur rom	10,04 °C			Varmestrømstetthet		16,31	W/m ²		
Middeltemperatur prøve	10,13 °C			Varmemotstand		R = 1,19	m ² K/W		
Temperatur differanse	19,37 °C			OK		Varmekonduktivitet	$\square = 0,04211$	W/mK	

Prøve 3	$\alpha/V\emptyset$	α/Vn	$\alpha/V\square$	Tø	Tn	Tr	RF	R	
Middelverdier	AVG 0	0	0	0	0	0	0	0	
Måleperiode:	#N/A								
Stabilitetskontroll									
Temperatur øvre plate	0 °C			Varmestrømstetthet øvre		0,00	W/m ²	#N/A	Stabilitetskontroll
Temperatur nedre plate	0 °C			Varmestrømstetthet nedre		0,00	W/m ²	#N/A	
Temperatur rom	0 °C			Varmestrømstetthet		0,00	W/m ²		
Middeltemperatur prøve	0,00 °C			Varmemotstand		R = #DIV/0!	m ² K/W		
Temperatur differanse	0,00 °C			#N/A		Varmekonduktivitet	$\square = \#DIV/0!$	W/mK	

Prøve 4	$\alpha/V\emptyset$	α/Vn	$\alpha/V\square$	Tø	Tn	Tr	RF	R	
Middelverdier	AVG 0	0	0	0	0	0	0	0	
Måleperiode:	#N/A								
Stabilitetskontroll									
Temperatur øvre plate	0 °C			Varmestrømstetthet øvre		0,00	W/m ²	#N/A	Stabilitetskontroll
Temperatur nedre plate	0 °C			Varmestrømstetthet nedre		0,00	W/m ²	#N/A	
Temperatur rom	0 °C			Varmestrømstetthet		0,00	W/m ²		
Middeltemperatur prøve	0,00 °C			Varmemotstand		R = #DIV/0!	m ² K/W		
Temperatur differanse	0,00 °C			#N/A		Varmekonduktivitet	$\square = \#DIV/0!$	W/mK	

Vedlegg F: Måling av varmemotstand til XPS, rapport fra SINTEF Byggforsk

Internrapport Varmemotstand og varmekonduktivitet

Rom 1	Kalibreringsfaktorer:	Øvre	0,00355180	+	-0,00000439	x Tmø
		Nedre	0,00361665	+	-0,00000548	x Tmn
	Temperaturdifferanse	Termoserie	0,00516675	+	-0,00001003	x Tm

Produsent:	Produktnavn:	Produkttype:
STUDENT ANNA STAGRUM	MASTEROPPGAVE VÅR 2018	EKSTRUDERT POLYSTYREN

	XPS 1	XPS 2	XPS 3	Prøve 4
lengde	500	500	500	
bredde	500	499	500	
tykkelse ved måling	49,4	49,7	49,1	
densitet kg/m ³	32,7	36,5	41,6	0,0
fuktinnhold kg/kg	0,02	0,01	0,01	0,00

	XPS 1	XPS 2	XPS 3	Prøve 4
masse før måling (g)	407,5	454,5	512,9	
masse etter måling (g)	400,0	451,8	508,6	
masse etter tørking (g)	397,0	448,5	504,6	
tara	-	-	-	-
masseendring under prøving (%)	-1,8	-0,6	-0,8	-

Prøve 1	$\alpha/V\theta$	α/Vn	$\alpha/V\square$	T _ø	T _n	T _r	RF	R
Middelverdier	AVG 4432	4236	3836	20	0,26	10,2	16,9	1,27
Måleperiode:	START TIME : 16.05.2018 09:09:43 STOP TIME : 16.05.2018 13:41:02							
Stabilitetskontroll								
Temperatur øvre plate	20,01 °C			Varmestrømstetthet øvre		15,35	W/m ²	OK
Temperatur nedre plate	0,26 °C			Varmestrømstetthet nedre		15,31	W/m ²	OK
Temperatur rom	10,18 °C			Varmestrømstetthet		15,33	W/m ²	
Middeltemperatur prøve	10,14 °C			Varmemotstand		R = 1,27	m ² K/W	
Temperatur differanse	19,43 °C			OK		Varmekonduktivitet	$\square = 0,03898$	W/mK

Prøve 2	$\alpha/V\theta$	α/Vn	$\alpha/V\square$	T _ø	T _n	T _r	RF	R
Middelverdier	AVG 3990	3801	3860	20,1	0,2	10,1	10,1	1,42
Måleperiode:	START TIME : 24.05.2018 02:19:38 STOP TIME : 24.05.2018 10:38:06							
Stabilitetskontroll								
Temperatur øvre plate	20,05 °C			Varmestrømstetthet øvre		13,82	W/m ²	OK
Temperatur nedre plate	0,20 °C			Varmestrømstetthet nedre		13,74	W/m ²	OK
Temperatur rom	10,08 °C			Varmestrømstetthet		13,78	W/m ²	
Middeltemperatur prøve	10,13 °C			Varmemotstand		R = 1,42	m ² K/W	
Temperatur differanse	19,55 °C			OK		Varmekonduktivitet	$\square = 0,03504$	W/mK

Prøve 3	$\alpha/V\theta$	α/Vn	$\alpha/V\square$	T _ø	T _n	T _r	RF	R
Middelverdier	AVG 3981	3793	3858	20	0,21	10,1	16,8	1,42
Måleperiode:	START TIME : 27.05.2018 00:49:29 STOP TIME : 27.05.2018 22:58:43							
Stabilitetskontroll								
Temperatur øvre plate	20,04 °C			Varmestrømstetthet øvre		13,79	W/m ²	OK
Temperatur nedre plate	0,21 °C			Varmestrømstetthet nedre		13,71	W/m ²	OK
Temperatur rom	10,10 °C			Varmestrømstetthet		13,75	W/m ²	
Middeltemperatur prøve	10,13 °C			Varmemotstand		R = 1,42	m ² K/W	
Temperatur differanse	19,54 °C			OK		Varmekonduktivitet	$\square = 0,03455$	W/mK

Prøve 4	$\alpha/V\theta$	α/Vn	$\alpha/V\square$	T _ø	T _n	T _r	RF	R
Middelverdier	AVG 0	0	0	0	0	0	0	0
Måleperiode:	#N/A							
Stabilitetskontroll								
Temperatur øvre plate	0 °C			Varmestrømstetthet øvre		0,00	W/m ²	#N/A
Temperatur nedre plate	0 °C			Varmestrømstetthet nedre		0,00	W/m ²	#N/A
Temperatur rom	0 °C			Varmestrømstetthet		0,00	W/m ²	
Middeltemperatur prøve	0,00 °C			Varmemotstand		R = #DIV/0!	m ² K/W	
Temperatur differanse	0,00 °C			#N/A		Varmekonduktivitet	$\square = #DIV/0!$	W/mK

Fuktopptak i plastisolasjon

Plastisolasjonsmaterialer av typen EPS eller XPS benyttes ofte i fuktige miljøer, der de over tid vil absorbere vann. Vannabsorpsjon gir redusert varmeisolasjonsevne som må ivaretas i prosjekteringen. Våre forsøk viser at atmosfæretrykket har mye å si for fuktopptaket i EPS, noe dagens målemetoder ikke tar hensyn til.

Anna Eknes Stagrum og Erlend Andenæs

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Isolasjonsmaterialer av plast brukes mye i byggenæringen. Vanligst er ekspandert og ekstrudert polystyren. Disse fremstilles av sammenlimte ekspanderte perler (EPS) eller blokker av ekstrudert materiale (XPS). Materialene har lang levetid, er kjemisk stabile, isolerer godt og har høy trykfasthet. De brukes derfor ofte i fuktige miljøer som under bakken eller i omvendte tak. Typiske bruksområder i bygninger er vist i figur 1. I tillegg benyttes plastisolasjon mye i veibygging.

Fuktopptak

Våte materialer har lavere varmeledningsevne enn tørre. Siden plastisolasjon er porøse materialer, vil de over tid suge til seg vann og få noe redusert varmeisolasjonsevne. Materialene vil ta opp vann både ved stående vanntrykk og gjennom diffusjon. Produsenter oppgir deklarerte verdier for fuktopptak og varmeisolasjonsevne i sine datablader.

Deklarert varmekonduktivitet gjelder for tørr tilstand. Ved prosjektering av varmeisolering skal det tas hensyn til forventet fuktinnhold i isolasjonen utfra bruksområde. Da regnes det med en dimensjonerende varmekonduktivitet etter NS-EN ISO 10456:2007, der prosjekterende må multiplisere den deklarerte varmekonduktiviteten med en korreksjonsfaktor. For EPS lagt horisontalt i bakken er korreksjonsfaktoren 1,49, mens den for XPS vil være 1,08 eller 1,13 avhengig av hvorvidt terrengmassene er drenert eller ikke.

Laboratorieforsøk

I masteroppgaven til Anna er EPS og XPS undersøkt for å bestemme fuktabsorpsjon ved langvarig eksponering for fuktig miljø og effekten dette har på varmekonduktiviteten. Prøver av EPS og XPS med ulik trykfasthet og densitet er undersøkt i laboratorium ved fullstendig neddykking i henhold til NS-EN 12087:2013 og ved eksponering for luft med 100 % relativ fuktighet (RF). Prøvingen er

gjort over en 13-ukersperiode for å finne tilnærmet langtidseffekt av fuktsporing med veiging til fast tid hver uke. I tillegg er varmekonduktiteten til plastisolasjonen som har vært fullstendig neddykket i vann i 13 uker, bestemt etter NS-EN 12667:2001.

Resultater

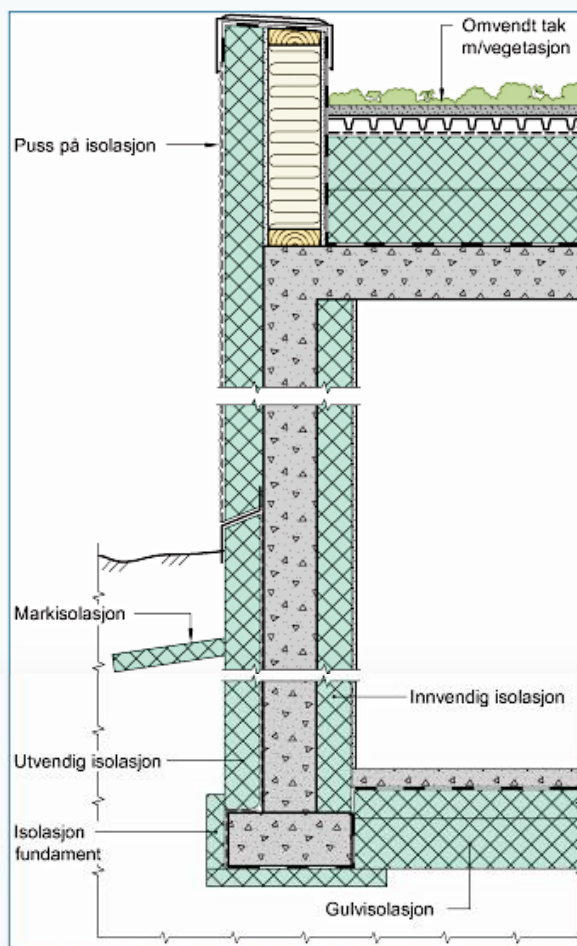
Forsøkene viser at fuktopptaket fra lagring i 100% RF er neglisjerbart, mens det etter neddykking er betydelig. Etter fullstendig neddykking i 13 uker er fuktopptaket i EPS målt til 3,2-6,7 volumprosent, mens XPS har absorbert vann i mye mindre grad (0,2-0,3 volum-%). Målingene viser at fuktopptaket ikke stabiliserer seg. Spesielt vekten av EPS-prøvene svinger kraftig med atmosfæretrykket, se figur 2. Variasjonene i fuktopptak skyldes produksjonsmetodene som gir EPS en annen porestruktur enn XPS og en større variasjon fra EPS-plate til EPS-plate.

Dimensjonerende varmekonduktivitet etter NS-EN ISO 10456:2007 forutsetter et fuktinnhold på 10 volum-% for de mest utsatte bygningsdelene. Dette er høyere enn vi har målt i laboratoriet.

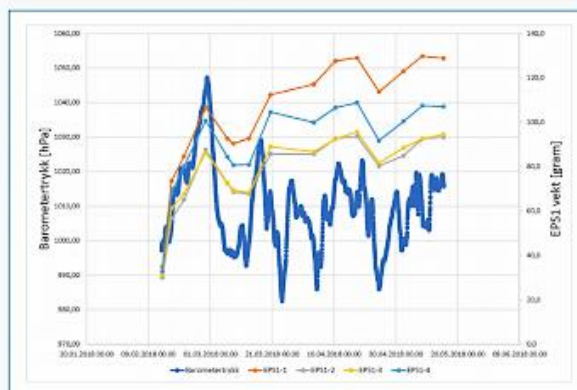
Konklusjon

NS-EN 12087:2013 for bestemmelse av fuktopptak nevner ingenting om at atmosfæretrykket påvirker fuktopptaket i plastisolasjonsmaterialer. Standarden beskriver kun én måling etter 28 dagers neddykking. Dermed vil ikke svingninger i vekt som følge av lufttrykkforandringer, oppdages. Konsekvensen er at verdier for fuktopptak til EPS målt under et lavtrykk vanskelig kan sammenlignes med verdier målt under høytrykk. Slike målinger har derfor begrenset nytte i den daglige produksjonskontrollen. Verdier for fuktopptak kan variere med inntil flere prosentpoeng utfra atmosfæretrykket på måletidspunktet.

Fuktopptak i EPS prøver og variasjon i atmosfæretrykk.



Figur 1: Typiske bruksområder for plastisolasjon i bygninger. Illustrasjon: SFI Klima 2050/SINTEF Byggforsk



Vedlegg H: Utkast til Journalartikkel

Ettersom funnene i masteroppgaven var såpass interessante, ble det besluttet å benytte den som utgangspunkt for en forskningsartikkel. Artikkelen er i praksis en noe forkortet oversettelse av masteroppgaven, derfor står Anna E. Stagrum oppført som førsteforfatter. Teksten er oversatt og redigert av med-veileder Erlend Andenæs, som er stipendiat ved forskningsprosjektet Klima2050 ved NTNU.

Siden artikkelen baserer seg på den ferdige oppgaveteksten, som igjen er basert på arbeid og målinger foretatt frem til sent i mai 2018, har det ikke blitt tid til å oversette teksten ferdig før masteroppgaven leveres inn. Teksten som her presenteres viser oversettelsesarbeidet så langt det har kommet per innleveringsdato, 6. juni 2018. Den vil videre bearbeides og omformuleres før innsending til vitenskapelig tidsskrift, og kanskje også involvere flere forfattere. Dette vedlegget er derfor kun et førsteutkast til artikkelen, som gjøres ferdig til innsending utover sommeren og høsten 2018.

Water absorption in plastic insulation

Anna E. Stagrum, Erlend Andenæs*, Tore Kvande

*corresponding author, erlend.andenas@ntnu.no

Abstract

Plastic insulation materials, particularly polystyrene insulation, sees widespread use for its good insulating capabilities and mechanical stability. For these reasons, it is commonly used below grade, particularly in buildings. However, below-grade conditions expose the insulation materials to high levels of moisture over prolonged periods. In this article, tests of water absorption by immersion and saturated air are carried out on expanded polystyrene (EPS) and extruded polystyrene (XPS) over an extended duration. It is shown that the water absorption of EPS is significantly influenced by the barometric pressure of the environment, a fact that is not currently reflected in any test procedure standards. EPS is shown to absorb significantly more water than XPS, with negligible influence from barometric pressure. Additionally, it is shown that plastic insulation exposed only to moisture-saturated air under ambient pressure and temperature will not absorb any significant amount of water.

Keywords: water absorption, plastic insulation, thermal conductivity, atmospheric pressure.

Introduction

1.1 Background

Modern energy-efficient buildings utilize well-insulated construction details to minimize thermal energy losses. Thermal flows through below-grade elements account for a significant portion of a building's total energy loss, making it important to insulate the ground-adjacent parts of the building envelope. As conditions below ground are more humid than above ground, it is necessary to use materials that retain their insulating properties even when wet. Plastic insulation, in the form of expanded- (EPS) or extruded polystyrene (XPS) are common construction materials for below-ground insulation. They are also used in roofs because of their rigidity. See Figure whatever for an illustration of plastic insulation usage in buildings.

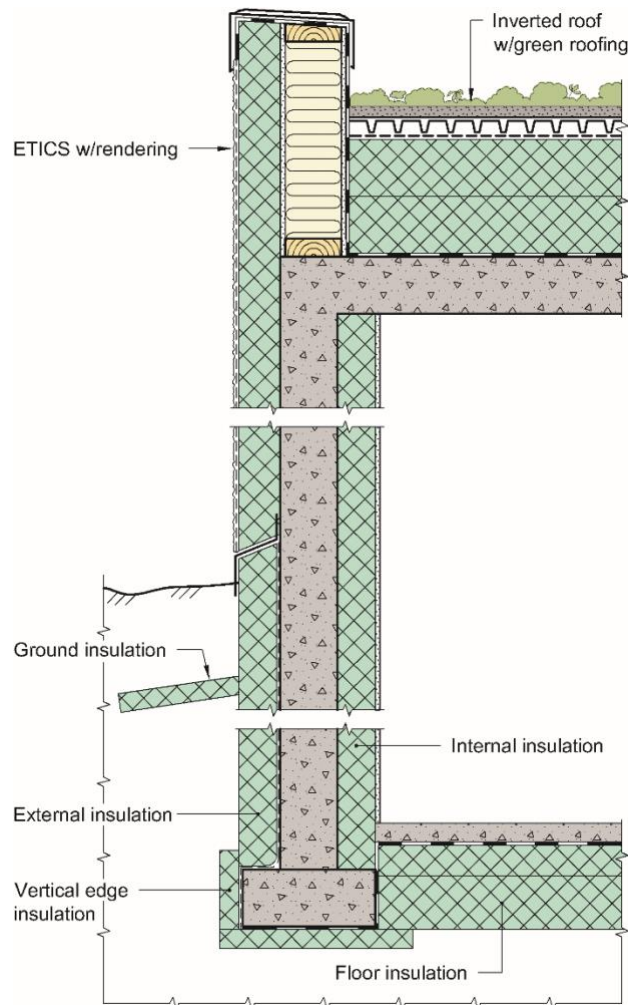


Figure 1: Principle sketch showing use of plastic insulation in buildings.

However, EPS and XPS are porous materials, with as much of 98.5 % of its volume being air or remains of expansion gases (Papadopoulos, 2005). This means they are susceptible to water absorption through capillary effects. Wet insulation will have a lower thermal resistance, how much depends on the amount of water. To be certain that the construction achieves its required insulation performance, it is therefore important to know how much water will be absorbed in plastic insulation.

In this article, the authors have investigated the water absorption of two different EPS products and three different XPS products. Two different experiments have been carried out. Five samples of each material have been submerged in water according to the procedure described in the standard *NS-EN 12087 - Thermal insulating products for building applications - Determination of long term water absorption by immersion*, but for a duration of 91 days instead of the 28 mandated by the standard. Additionally, four samples of each type have been locked in an environment of air with 100 % relative humidity, for the same length of time. Samples were weighed at regular intervals to monitor the development of moisture absorption in the materials. The third experiment was measuring the thermal conductivity value of the wetted insulation, to determine the impact of wetting on insulation performance.

Research questions:

1. How much water will EPS and XPS absorb under long-term exposure to moisture-saturated air or standing water pressure?

2. How will be moisture content affect the thermal conductivity of the insulation?
3. How well suited are current standards to assess moisture absorption?

Certain factors were considered outside the scope of this research. The effects of frost were not investigated. Also not investigated was the influence of different expansion gases used in EPS and XPS production (where CFC gases were used until the 1980s, when they were banned in the EU). There was not enough time to dry the samples out after wetting, to assess whether insulation properties had changed because of long-term water immersion. It is also outside the scope of this research to assess realistic moisture conditions in real use settings.

1.2 Definitions

- **Thermal insulation:** Insulation used in buildings and other situations where the structure needs a higher thermal resistance against cold or heat. Includes many different types of insulation suitable for different uses.
- **Expanded polystyrene (EPS):** Plastic insulation produced with polystyrene, which is made from crude oil. The production process, wherein polystyrene granules are expanded and “welded” together, makes the material porous and gives a partially open pore structure. Has high moisture resistance, and does not lose its thermal resistance when exposed to humidity, it is therefore common to use in high-humidity situations.
- **Extruded polystyrene (XPS):** Plastic insulation produced by adding expansion gases to liquid polystyrene. The production process gives XPS a closed pore structure, which makes the material very resistant to moisture.
- **Thermal resistance, R [m^2K/W]:** Temperature difference divided by heat flow density under stationary conditions. This term expresses the thermal insulation value of a material layer.
- **Thermal conductivity, λ [W/mK]:** Heat flow density in the material given a temperature gradient at 1 K/m.
- **Declared values:** Values determined under defined temperature and moisture conditions. Declared thermal resistance (R_D) and declared thermal conductivity (λ_D) are provided by the producer.
- **Design values:** Declared values re-calculated into design values (R_d and λ_d) to account for discrepancies in building structure and usage conditions.

(EN ISO 9229:2007)

2. Theory

2.1 Thermal insulation

Thermal insulation materials are materials that, provided they are used correctly, delay the heat transport through a building detail by their high thermal resistance (Al-Homoud, 2005). In cold climates, thermal insulation is required to lower heat losses according to regulations. Several types of insulation materials exist, with different properties for different uses. Examples include mineral wool, foam glass, wood fibre insulation, and plastic insulation. Additionally, new insulation materials such as vacuum insulation materials are continuously being developed.

Expanded polystyrene (EPS) and extruded polystyrene (XPS) are two chemically identical types of plastic insulation, differing mostly in structure owing to their different production

methods. Their rigidity and chemical stability make these materials well suited for application in moisture-exposed building parts, like inverted roofs, foundations, or walls below grade. Table 1 shows a comparison of EPS and XPS material properties.

Table 1: Comparison of material properties, EPS and XPS.

Material	Declared thermal conductivity [W/mK]	Density [kg/m ³]	Specific heat capacity [J/kgK]	Moisture resistance factor μ	Compressive strength [kPa]
EPS	0.035 – 0.041	10-50	1450	60	60-300
XPS	0.034 – 0.037	20-65	1450	150	200-700

The chief difference between EPS and XPS lies on the production level. EPS is created by expanding small beads of polystyrene with heating and expansion gases (traditionally CFC, now Pentane is a more common agent). This creates a closed pore structure inside the individual beads; however, pores are open between the beads. XPS is produced by adding expansion gases directly to molten polystyrene, creating a closed pore structure throughout the material.

2.2 Expanded polystyrene

Expanded polystyrene (EPS) is produced from small granules of polystyrene made from crude oil. The granules are heated and expanded by means of a blowing gas. CFC gases were previously used for this purpose, but after the ratification of the Montreal protocol, the hydrocarbon Pentane (C₅H₁₂) has taken over as the common blowing gas. The blowing gas makes the polystyrene granules expand up to 60 times their original size and stick together. The mass of granules are formed into blocks or plates (Lindqvist et al., 2011).

The production method gives EPS a partially open pore structure, as the pores between granules are open, but the pores in the granules are closed. The latter make up 85 % of the pore structure in EPS (Ozkan, 1994). Overall, EPS consists of 1.5-2 volume-% polystyrene and 98-98.5 volume-% air (Papadopoulos, 2005). The volume of permeable pores between the granules is reduced for EPS of higher density (Gnip et al., 2006). The density of EPS usually varies between 10-50 kg/m³. The properties, test methods and requirements for EPS are described in the standard NS-EN 13163:2012. Figure 1 shows a close-up of the structure of EPS, where the porous structure is clearly visible.



Figure 2: Close-up photo of EPS cut surface. Photo: Sigurd Vaagland

2.3 Extruded polystyrene

Extruded polystyrene (XPS) is produced by adding an expansion gas to melted polystyrene. Common expansion gases include HFC-gases (gases consisting of hydrogen, fluorine, or carbon), CO₂, or pentane (C₅H₁₂). The process gives XPS a closed pore structure, and often a thin plastic film on the surface. The combination of uniform structure and hydrophobic properties makes XPS absorb very little moisture (Owens Corning, 2011). As the pores in XPS are closed, small amounts of expansion gases will remain in the material after production. If CO₂ is used as expansion gas, it will make up roughly 3-7 % of the volume of the finished XPS (Papadopoulos, 2005). Use of HFC gases in XPS increases its thermal resistance, as these gases have a low thermal conductivity (Al-Homoud, 2005).

Historically, XPS was produced using CFC (chlorine-fluorine-carbon) gases as expansion gases, which provided very high thermal resistance values over time. As these gases contribute greatly to the depletion of atmospheric ozone, they were phased out in most countries in the 1990s as the Montreal Protocol was taken into effect (Vo et al., 2011). The replacement gases used today do not have the same thermal properties as the CFC and HCFC-gases, and as a result, the thermal properties of XPS produced with CO₂ or HFC-gases are lower and deteriorate faster than those of XPS produced before the Montreal Protocol (Costeux et al., 2010).

The requirements and testing methods for XPS are specified in the standard NS-EN 13164:2012. Figure 3 shows the cut surface of XPS. The uniformity of the material is clearly visible, in contrast to the EPS pictured in Figure 2.



Figure 3: Close-up photo of XPS cut surface. Photo: Sigurd Vaagland

2.4 Thermal conductivity of plastic insulation

The thermal conductivity of a material on a macroscopic level is a result of the different ways in which heat flows through the complex porous structure. Heat is transferred through solid matter, through gas, through pore convection, and through radiative transfer in the mediums present (Litovsky and Kleiman, 2005).

On a microscopic level, the thermal transfer is dependent on several factors. These include pore size, diameter, and how fibres or particles are placed in relation to another. In addition, the type of gas, gas pressure, type of adhesive, internal thermal radiation resistance, and structural defects are all contributing factors to the thermal conductivity (Vo et al., 2011).

As EPS and XPS mostly consist of gas-filled pores, heat transfer through gas makes up the greatest portion of the heat transfer through the material, around 60-70 % (Vo et al., 2011; Whalen, 2002). Radiative heat transfer accounts for 20-30 % of the total, this number will not change throughout the lifetime of the material, as it is independent of which gas fills the pores. Heat transfer through solids accounts for around 10 % (Litovsky et al., 1996), with lower density materials having less solid heat transfer. There is some uncertainty regarding whether density and thermal conductivity are correlated, this will be discussed further in the Discussion chapter.

2.5 Moisture absorption

Moisture in materials appears in three different forms: As steam (gas phase), as water (liquid phase), or as ice (solid phase). The main transport mechanisms for moisture are diffusion of steam and water transport in liquid phase due to capillary forces. Water transport in building materials is mostly driven by three factors: Pressure gradients, gravity, and capillary forces (Ducoulombier and Lafhaj, 2017). Steam is mainly transported through diffusion or convection.

Where insulation is placed in a wall or other building element, there will usually be a difference in relative humidity between the two sides of the insulation. In winter, interior

temperature is higher than exterior, while relative humidity is higher on the exterior side. This means that the temperature gradient and humidity gradient are opposites. Water is then diffused from the interior side of the structure and outwards.

When EPS and XPS are exposed to liquid water, water will penetrate from the edges of the material into the centre, through imperfections or the pores between granules. The polystyrene in itself does not absorb much water, only about 0.05 % (Sarlin et al., 1986). Whether water penetrates the pore structure or just flows around the granules depends on the magnitude of the ambient pressure. When EPS is exposed to low water pressure, water will only flow around the granules since the welded surface of the granules act as a barrier, leaving most of the pores empty of water. If the ambient pressure is high, water will penetrate the pore structure through surfaces that were otherwise impervious (Ossa and Romo, 2012).

2.6 The effects of moisture absorption on thermal conductivity

Multiple studies have been conducted to understand moisture transport through building structures and its effect on thermal conductivity. However, it is difficult to find one single parameter for calculations when both temperature and moisture conditions vary (Jerman and Černý, 2012). Various models attempt to describe how heat transfer occurs in a plastic insulation material, by combining the transport of heat, air and moisture. Every model uses different independent forms of potential energy, such as moisture content, temperature and water pressure, described through phenomena like diffusion, convection, capillary action and pressure gradients (Abahri et al., 2016).

The thermal conductivity of air at sea level pressure is 0.26 W/mK. When insulation absorbs water, some of the air in the pores is replaced with water, whose thermal conductivity value is 0.6 W/mK. In other words, water conducts heat 20 times better than the air it replaces. Additionally, absorbed water will cover pore walls and create new contact points between fibres inside the material, increasing the rate of heat flow through solid matter. Declared thermal conductivity apply to dry conditions. When designing thermal insulation, expected moisture content has to be taken into account. A design thermal conductivity has to be calculated using EN ISO 10456:2007, where the declared thermal conductivity has to be multiplied with a correction factor.

2.7 Calculation of thermal conductivity of wet insulation

A procedure for calculating the thermal conductivity of wet insulation is described by Lakatos (2016). The calculation is based on moisture absorption through diffusion, not water immersion. However, since both absorption methods cause a certain water content in the material anyway, the method is considered usable for this article.

The water content (ω) in the samples is calculated using the following formula:

$$\omega = \frac{m_w - m_d}{m_d}, \quad (5)$$

where m_w is the mass of a wet sample and m_d is the mass of a dry sample. The thermal conductivity can then be calculated as a function of the water content (ω), an additional constant Z and the declared thermal conductivity of dry material (λ_d). For plastic insulation, $Z = 2$. The thermal conductivity of a wet sample can be calculated using the following formula:

$$\lambda_w = \lambda_d \times \left(1 + \frac{\omega \times Z}{100}\right). \quad (6)$$

3. Method

3.1 Literature study

3.1.1 Scope

The aim of the study was to find articles regarding moisture absorption in plastic insulation, and its impact on the thermal insulation properties of the material. The study was performed using online searchable databases of scientific literature. Articles obtained from the study were also examined for references to other relevant articles that were not picked up by database searches.

The literature search was performed according to the ten-step procedure suggested by O'Brien and McGuckin (2016). It consists of:

- 1) Define text words
- 2) Determine synonyms for text words
- 3) Control for different spellings and using appropriate truncations
- 4) Identify relevant databases
- 5) Perform test search
- 6) Decide whether to perform a broad or focused search for keywords
- 7) Check if all words are spelled correctly
- 8) Combine logically all search terms
- 9) Perform test search again
- 10) Customize the syntax of the search strategy to the individual databases.

The further procedure consists of a qualitative evaluation of the titles, keywords, and possibly the abstracts of papers identified in the search. Articles are then selected for further study if found to be relevant to the scope of the research.

The first systematic search was conducted in February 2018. Five scientific databases (Google Scholar, WebOfScience, Scopus, Science Direct, and Oria – Norwegian library database) were used to find relevant literature. In total, 90 different searches were conducted.

3.2.2 Keywords

The main focus of the literature search was to find studies concerning plastic insulation, that is, EPS and XPS. There are many different words by which these materials can be described. To achieve a broad search, relevant synonyms have to be included. The following terms were used in the search:

- EPS
- “Expanded polystyrene”
- XPS
- “Extruded polystyrene”
- “Plastic insulation”
- “Thermal insulation”
- “Insulating material”
- “Polystyrene insulation”

As these terms by themselves produced a large number of results across all examined databases, the search had to be specified. The primary focus of the study was moisture absorption in insulation and its impact on thermal insulation performance, and so relevant keywords had to be included. It was decided to combine each of the search terms above with the following keywords:

- “Water absorption”
- “Water sorption”
- “Moist”
- “Moisture”

- “Moisture content”
- “Wetting”

- “Thermal conductivity”
- “Thermal performance”

- “Testing methods”
- “Laboratory test”
- “Immersion test”
- “Long term water absorption”
- “Long term water sorption”

3.2.3 Selection of articles for further study

The literature search was mainly limited to English-language scientific articles, conference papers and scientific reports. Every search procedure was conducted in up to four stages, described in (tabell). If the number of hits were at a manageable level after early stages of the search, the specification and/or limitation stage were not included.

Table 2: Example search procedure utilized in literature review

Stage	Description	Example search terms	Method
1	Top-level search	“Expanded polystyrene” OR EPS	Bibliometric Ten-step procedure
2	Limitation	As above, plus: “Water absorption” OR “Water Sorption”	Bibliometric Qualitative assessment of titles and keywords
3	Specification	As above plus: “Testing methods” OR “Laboratory test” OR “Immersion test” OR “Long term”	Bibliometric Qualitative assessment of titles and keywords
4	Manual selection	Relevant articles selected for further study	Manual qualitative selection based on titles, keywords, and abstracts

A similar round of searches was conducted in an effort to explain the unexpected results of the water immersion experiment, and check literature for mentions of the main hypothesis. This search followed the same procedure, with the keywords “barometric pressure” and “atmospheric pressure” utilized in step 3. Additionally, articles obtained during the first round of searches were read through over again for mentions of water absorption fluctuating over time. Where this was mentioned, newer articles citing the examined papers were looked up using the “citations” function in Google Scholar. Five new relevant articles were found after this second search for literature.

3.2 Laboratory experiments

3.2.1 Samples

For the practical research, five different types of plastic insulation were examined, all with a thickness of 50 mm. The intention was to use insulation types that are commonly used in the aforementioned applications (see Theory chapter). The insulation was purchased from nearby building supplies stores, to obtain samples that were commonly available and used on the market. The samples were not given any special treatment or conditioning before the experiments. The types and specifics of the insulation used are given in Table 3. Note that the density of the insulation is not given in the product data sheet. GLAVA and DOW were contacted in an attempt to obtain this information. GLAVA stated that it does not declare product densities, but that samples are regularly measured at the factory. The average values measured for the products S80 and S150 were 16 and 24 kg/m³, respectively.

Table 3: Overview of insulation characteristics, found in product datasheets.

Insulation type	Density according to manufacturer (kg/m ³)	Compressive strength (kN/m ²)	Plate dimensions (mm)	Manufacturer/specification	Declared thermal resistance, R _D (m ² K/W)	Declared thermal conductivity, λ (W/mK)	Declared water absorption through immersion
EPS1/ EPS3	16	80	50x600x1200	GLAVA S80		0,035	≤2-3 volume%
EPS2/ EPS4	24	150	50x600x1200	GLAVA S150		0,038	≤2-3 volume%
XPS1		250	50x585x1185	Styrofoam 250 A-N DOW	1,50	0,033	≤0,7 volume%
XPS2		400	50x585x1185	Styrofoam 400 A-N DOW	1,50	0,033	≤ 0,7 volume%
XPS3		500	50x585x1185	Styrofoam 500 A-N DOW	1,50	0,033	≤ 0,7 volume%

The plates were cut into samples using a band saw. 50 mm wide strips were cut off the edges of each plate and discarded, to reduce “edge effects”. Four samples of every plate were cut into a size of 200x200 mm ± 1 mm. The samples were then stored for 24 hours at 23 ± 5 degrees. They were weighed within an accuracy of 0.1 g before the immersion experiment began. The density of the samples was calculated using the following formula:

$$\rho = \frac{m(0)}{0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}}$$

Additionally, 16 new samples of 200x200 mm were prepared after 9 weeks, to repeat the experiment. Those were four additional samples each from the EPS1 and EPS2 packs, and four samples of the same materials (EPS3 and EPS4), but from different plates originating from different production batches. These were conditioned at room temperature for four days before dry mass was weighed and density calculated.

Table 4: Overview of dry mass and calculated dry density of the different samples cut for the immersion test.

Type	m0 (g)				Calculated dry density (kg/m ³)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
EPS1.1	34,9	30,0	31,2	32,8	17,45	15	15,6	16,4
EPS2.1	44,9	43,0	44,2	45,9	22,45	21,5	22,1	22,95
EPS1.2	31,7	33	31,6	30,3	15,85	16,5	15,8	15,15
EPS2.2	43,8	44,6	42,8	41,8	21,9	22,3	21,4	20,9
EPS3	48,4	48,4	48,9	48,4	24,2	24,2	24,45	24,2
EPS4	48,7	49,7	47,9	46	24,35	24,85	23,95	23
XPS1	63,6	63,3	62,9	62,9	31,8	31,65	31,45	31,45
XPS2	72,3	71,9	72,2	71,7	36,15	35,95	36,1	35,85
XPS3	81,4	80,7	81,2	81,2	40,7	40,35	40,6	40,6

Additionally, four samples each of EPS1-2 and XPS1-3 were cut to 400x400 mm ± 1 mm, for use in the humid air immersion experiment. One sample each of EPS1-2 and XPS1-3 were cut to 500x500 mm ± 1 mm, for use in the thermal conductivity measurements. All these samples were stored for 24 hours at 23 ± 5 degrees.

3.2.2 Complete immersion according to NS-EN 12087:2013

The experimental set-up is described in NS-EN 12087:2013 chapter 7.2.3, “Long-term water absorption through complete immersion, method 2A”.

On February 13, 2018, all the 200×200 mm and 500x500 mm samples were labelled and weighed to the closest 0.1 g. They were then placed horizontally in water basins, see principle sketch in Figure 4. Three basins held six 200x200 mm samples each, while the 500x500 mm samples were placed in separate basins. The final 200x200 mm samples were placed in a basin together with one of the 500x500 mm samples, in order to save room. Buckets filled with water were used to weigh down the samples. Metal grates were placed between the buckets and the samples, to distribute weight evenly and protect the samples from being dented by the buckets. The basins were then filled with water until the water level was 50 ± 2 mm above the samples, in accordance with NS-EN 12087:2013. The water temperature was initially around 4-5 °C, but would heat up to room temperature over time. To ensure that the water level in the basins would stay within tolerance requirements, water was refilled every week.

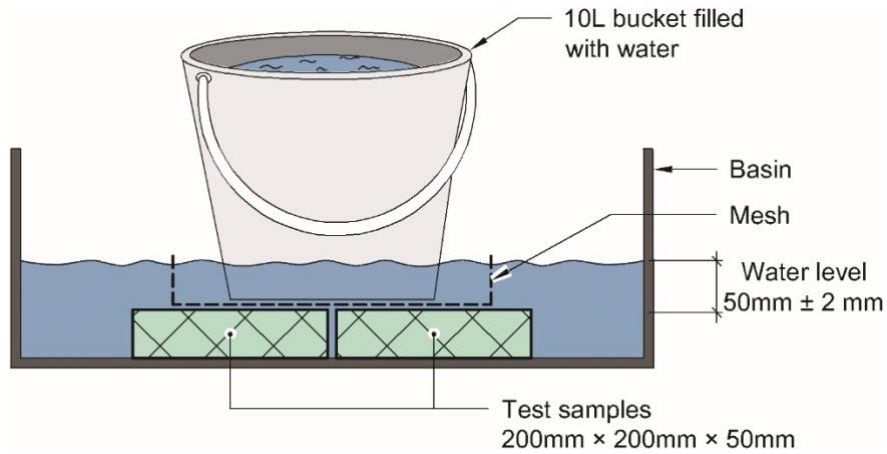


Figure 4: Description of setup for water immersion experiment.

The samples were first weighed after three days. The buckets were carefully removed from the grates, then the grates were wiped dry and the samples placed on them at a 45-degree angle to dry for 10 ± 0.5 minutes before being weighed to the closest 0.1 g. After being weighed, the samples left some droplets on the scale, usually approximately 0.2-0.3 grams. The scale was carefully wiped dry and the display reset after every weighing to reduce the risk of inaccurate measuring. Starting from day 7 on, the samples were then weighed using this procedure on the same day every week for 13 weeks.

The water content by volume-% in the insulation was calculated using method 2A described in NS-EN 12087:2013, with the formula:

$$W_{it} = \frac{m_n - m_0}{V} \times \frac{100}{\rho_w}$$

Where m_n is the mass after n days, m_0 is dry mass weighed prior to immersion; V is the sample's volume, and ρ_w is the density of water, assumed 1000 kg/m^3 . Using the same formula, with m_{n-7} in place of m_0 , the change in water content from the last weighing could be determined. With the samples being weighed every seven days, it was possible to monitor the change in water content over time.

After 21 days, it was discovered that the water content of the EPS samples had been significantly reduced since the last weighing. It was then determined to repeat the experiment, using 16 new 200x200 mm samples of the same materials using the same procedure. This experiment was started on April 17, 2018, with a duration of 28 days.

3.2.3 Water absorption from humid air

The four 400x400 mm samples of each material (EPS1, EPS2, XPS1; XPS2; XPS3) were weighed to the closest 0.1 g. A metal grate was placed horizontally inside a large plastic crate, which was then filled with approximately 50 mm of water. The grate rested on bricks to keep it above the water line, and special care was taken to prevent water from spilling onto the grate. The samples were placed vertically on the grate, spaced approximately 20 mm apart to keep free air on all sides. An air moisture meter was placed on top of the samples, and a lid fitted over the crate. This made it possible to ensure that the air inside the box reached 100 % relative humidity without removing the lid. The temperature inside the box was the same as in the room, $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Two days after the lid was placed on, measurements showed 100 % relative humidity inside the box.

The samples were weighed every 14 days, as quickly as practically possible after being taken out of the crate. Water was periodically refilled so there would always be a source of humidity in the crate. The experiment was continued for 12 weeks.

3.2.4 Thermal resistance measurements

Thermal resistance was determined using the Heat Flow Meter method described in the standard NS-EN 12667:2001. One 500x500 mm sample of each material (EPS1, EPS2, XPS1, XPS2, and XPS3) was measured by operators from SINTEF Byggeforsk.

In addition, it was attempted to calculate the thermal conductivity of the materials using the method described in Lakatos (2016). The procedure is described in the Theory chapter. For the purpose of these calculations, the initial mass before immersion tests was presumed to be equal to the dry mass. The wet mass is the mass measured at the last weighing.

4 Results

4.1 Literature study

4.1.1 Water absorption through immersion according to NS-EN 12087

Several studies have been found wherein plastic insulation has been immersed, following the procedure described in NS-EN 12087:2013 or earlier versions of the same standard. This experiment, as described in chapter 3.2, consists of submerging plastic insulation completely into water, 50 mm below the water surface.

(Ojanen and Kokko, 1997)

(Mattila, 2017)

(Vėjelis and Vaitkus, 2006)

(Gnip et al., 2006)

4.1.2 Water absorption through immersion according to ASTM C272 and ASTM D2842

Several articles describe moisture absorption experiments conducted according to the American standards ASTM C272 and ASTM D2842.

The method described in ASTM C272 is quite similar to the European standard used for the tests described in this paper (NS-EN 12087:2013), with the chief difference being a shorter measurement period – 24 or 48 hours of immersion. The samples also have to be conditioned in an oven at 50 ± 3 °C for 24 hours, or at 105 ± 3 °C for 2 hours, prior to immersion. After immersion, samples are wiped off and weighed without a drying period. The methods in ASTM D2842 is also based on immersion experiments. One of the methods described is based on immersion in 51 mm of water for 96 hours.

(Dechow and Epstein, 1978)

(Forgues, 1983)

(Cai et al., 2017)

4.1.3 Other immersion experiments

(Bomberg and Dillon, 1984)

(Ossa and Romo, 2012)

(Pakkala and Lahdensivu, 2014)

(Sarlin et al., 1986)

(Duškov, 1997)

(Jerman and Černý, 2012)

4.1.4 Water absorption by diffusion and thermal conductivity measurements

Many studies are based on water absorption through diffusion, and then measuring the thermal resistance of wet material by various means.

(Lakatos and Kalmár, 2013)

(Lakatos, 2016)

(Ojanen and Kokko, 1997)

(Dechow and Epstein, 1978)

(Šadauskienė et al., 2009)

(Auracher, 1978)

(Alvey et al., 2017; Bomberg, 1989; Hoffee, 1989; Lakatos, 2012; Levy, 1966; Szodrai and Lakatos, 2014; Tobiasson et al., 1986)

4.1.5 Other studies measuring moisture absorption

(Ojanen and Kokko, 1997)

(Ducoulombier and Lafhaj, 2017)

(Bomberg and Kumaran, 1995)

4.2 Laboratory experiments and calculations

4.2.1 Water absorption through complete immersion according to NS-EN 12087:2013

The water content in the samples was calculated after formula (). Results of the 13-week immersion experiment is shown in Table 5.

Table 5: Total water absorption in EPS and XPS after 13 weeks, volume-%.

Type	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
EPS1	4,70	3,16	3,17	3,72
EPS2	6,07	5,16	6,13	6,74
XPS1	0,33	0,30	0,34	0,29
XPS2	0,19	0,18	0,17	0,18
XPS3	0,18	0,17	0,19	0,20

Figure 5 and Figure 6 show moisture absorption in EPS1 and XPS1, respectively, throughout the measuring period. Also shown is the logged barometric pressure on the location, which is shown to have a large correlation with the moisture content in the EPS samples, but not in XPS.

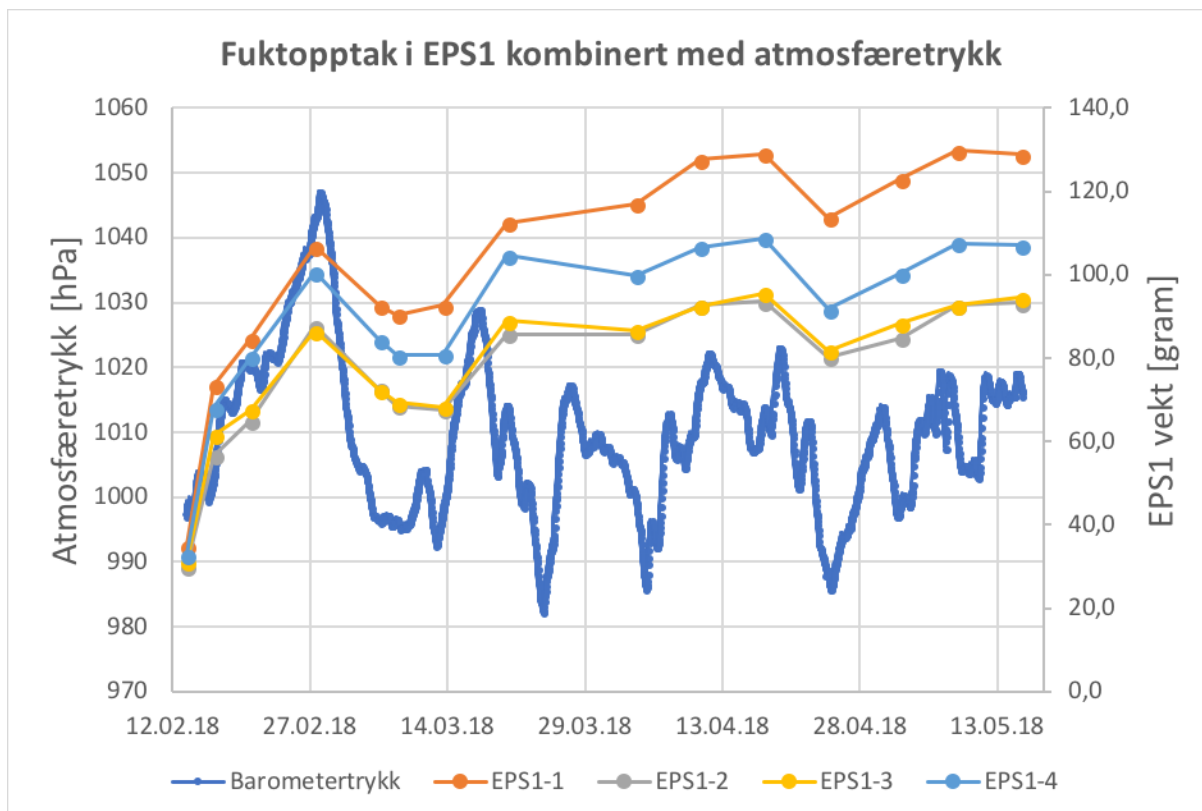


Figure 5: Water absorption in EPS1 and logged atmospheric pressure during measuring period.

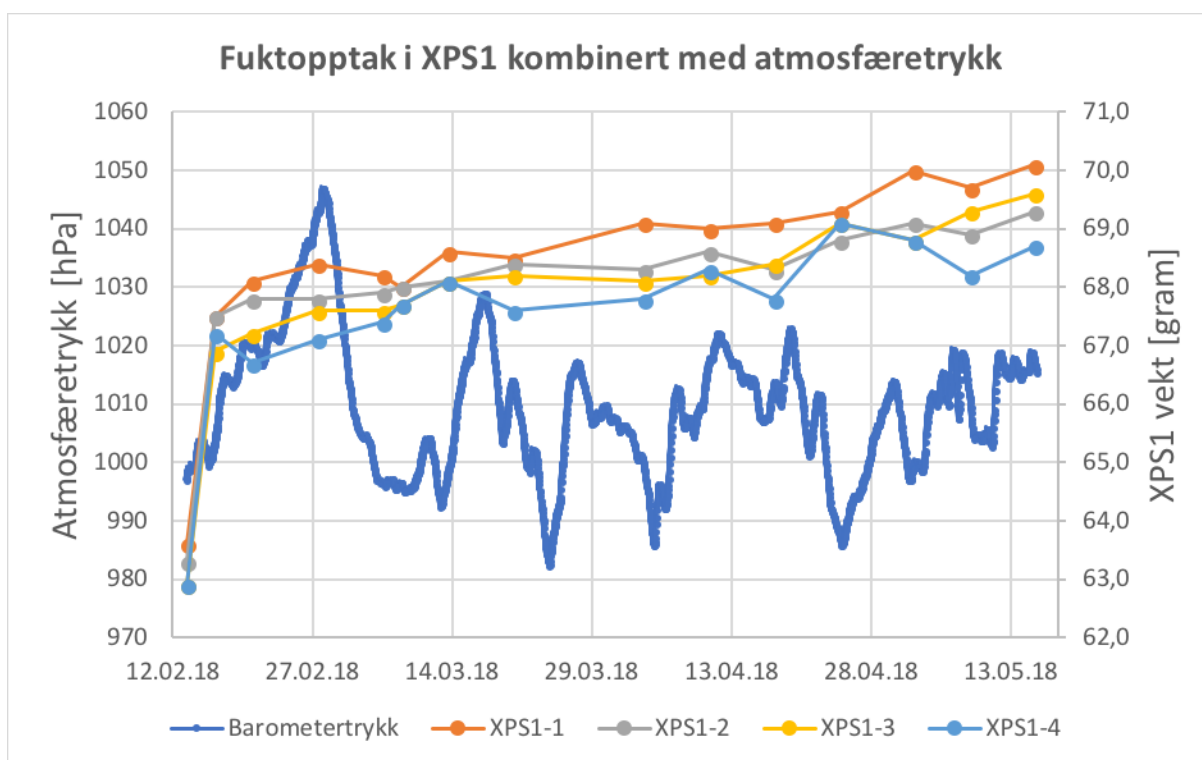


Figure 6: Water absorption in XPS1 and logged atmospheric pressure during the measuring period. Note how the right axis scales.

The water content in EPS after the 28-day repeat experiment is shown in Table 6.

Table 6: Total water content after 28 days, volume-%.

Type	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
EPS1	3,40	3,32	3,15	3,74
EPS2	6,00	6,09	6,05	5,05
EPS3	4,32	4,52	4,75	4,21
EPS4	4,48	4,46	4,07	3,87

Figure 7 shows the water absorption in sample 2 of EPS2 as well as the logged barometric pressure during the 28-day measuring period as the experiment was repeated.

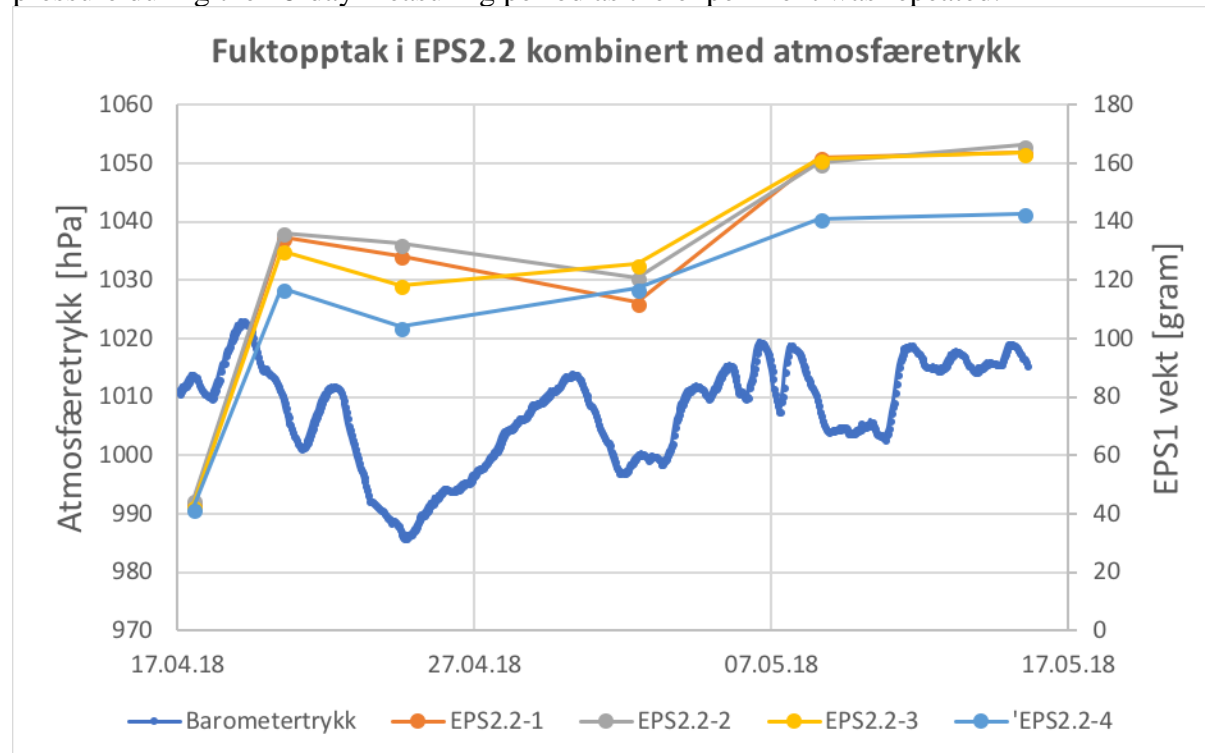


Figure 7: Water content in sample EPS2-2 after 28 days of immersion, and the logged barometric pressure over the measurement period.

4.2.2 Water absorption from 100 % RH humid air

The results are presented in Table 7.

Table 7: Total weight difference after 13 weeks of immersion in 100 % RH air.

Type	1	2	3	4
EPS1	-0,9	-1,1	-1,2	-1,9
EPS2	-2,1	-3,4	-2,0	-2,1
XPS1	3,5	3,4	3,5	3,4
XPS2	2,2	2,2	2,2	2,1
XPS3	1,4	1,4	1,5	1,5

Also, see Figure 8 and Figure 9.

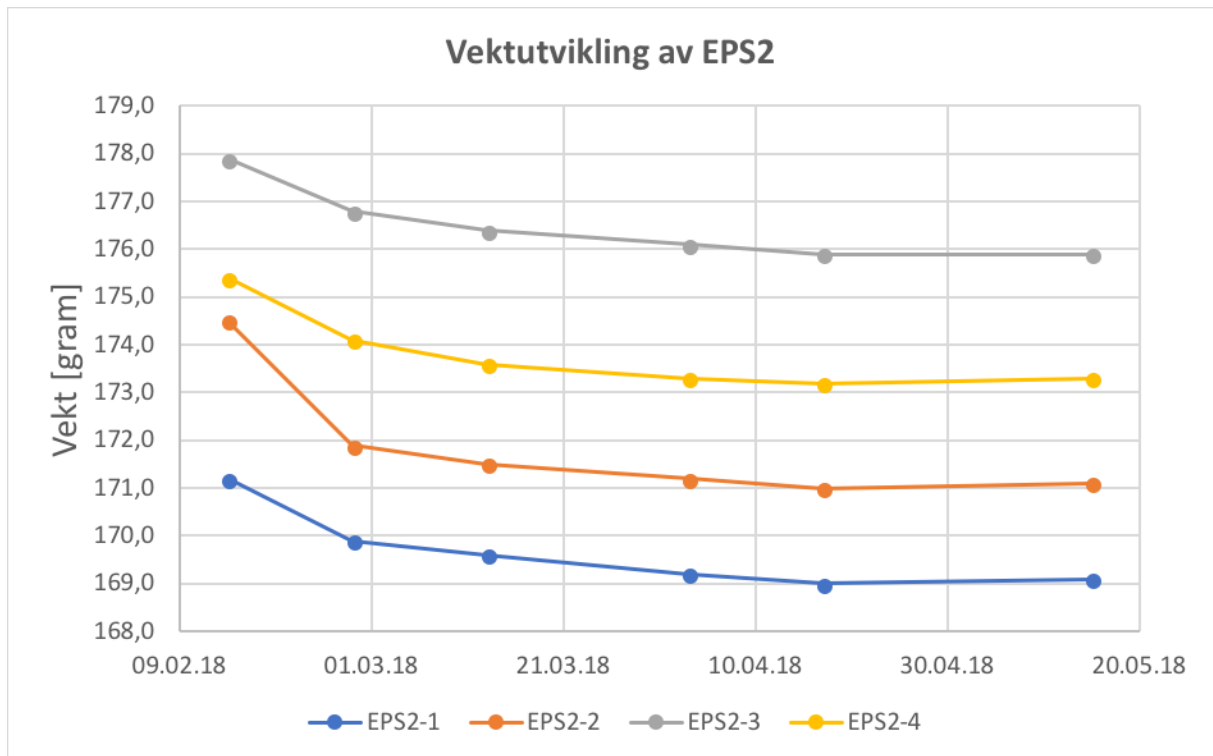


Figure 8: Weight development in EPS2 over 12 weeks of immersion in humid air.

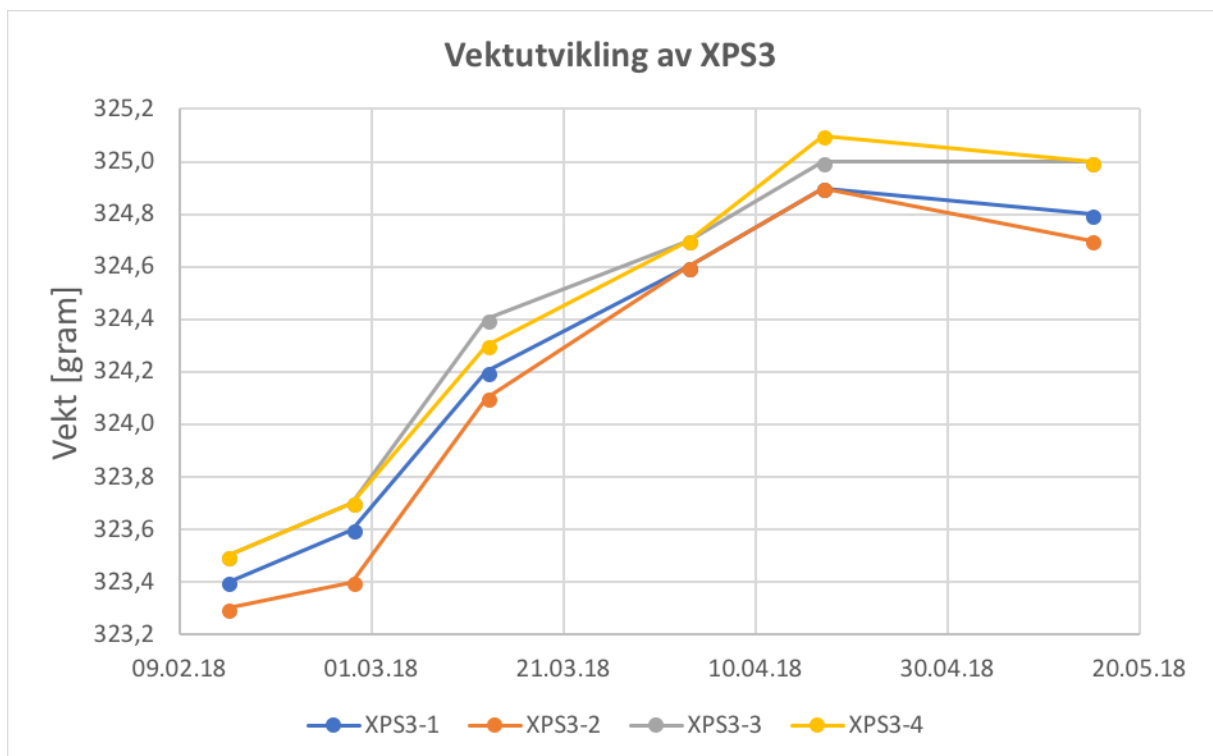


Figure 9: Weight development in XPS3 over 12 weeks of immersion in humid air.

4.2.3 Determination of thermal resistance according to NS-EN 12667:2001

See Table 8 for results.

Table 8: Measured thickness, thermal resistance and thermal conductivity of wet EPS and XPS

Type	Declared thermal conductivity, (λ_d) [W/mK]	Measured thickness [mm]	Thermal resistance (R) [m ² K/W]	Thermal conductivity of wet material, (λ_w) [W/mK]	$\frac{\lambda_w}{\lambda_d}$
EPS1	0,035	49,6	1,27	0,0391	1,118
EPS2	0,038	50,0	1,19	0,0421	1,108
XPS1	0,033	49,4	1,27	0,0390	1,181
XPS2	0,033	49,7	1,42	0,0350	1,062
XPS3	0,033	49,1	1,42	0,0346	1,047

4.2.4 Calculation of thermal conductivity according to Lakatos (2016)

The results of calculations are shown in Table 9.

Table 9: Calculated thermal conductivity for dry and wet insulation

Type	Water content calculated according to NS-EN 12087:2013 [volume-%]	Water content, (ω) [volum%]	Declared Thermal conductivity, (λ_d) [W/mK]	Calculated thermal conductivity of wet material, (λ_w) [W/mK]	$\frac{\lambda_w}{\lambda_d}$
EPS1	3,26	1,88	0,035	0,036	1,037
EPS2	4,14	1,86	0,038	0,039	1,037
XPS1	0,11	0,04	0,033	0,033	1,000
XPS2	0,06	0,02	0,033	0,033	1,000
XPS3	0,07	0,02	0,033	0,033	1,000

5. Discussion

5.1 Water absorption through immersion according to NS-EN 12087:2013

5.1.1 Error sources during experiments

As the basins where the samples were stored were filled using a hose, it is possible that running water pressure could have dislodged granules from EPS samples. However, this is not likely to have had a large effect on the water content or weight of the samples.

A few of the samples had small scratches or imperfections from storage or transport prior to the onset of the experiment. This could have caused a slightly higher moisture content in EPS, as water penetrates more easily through scratches.

The samples were cut using a band saw. The cutting and heat of the saw may have altered the properties of the cut surface to some degree, and it is distinctly different from the factory-cut surfaces. It is difficult to tell whether this would lead to a higher or lower moisture absorption than using only factory-cut plates.

The load of the buckets weighing down the samples may have caused small deformations in the material.

Even after the ten-minute drying period, some water droplets remained on the surface of the samples, particularly on the underside.

5.1.2 Is moisture absorption related to density?

Research literature shows conflicting views on this matter. Some earlier studies (Cai et al., 2017; Lakatos and Kalmár, 2013; Pakkala and Lahdensivu, 2014) have concluded that lower-density EPS will absorb more water. However, Vêjelis and Vaitkus (2006) conclude that the pore structure in the materials is a more significant factor than density. The experiment described in this paper showed a higher absorption in the higher-density EPS2 than in the low-density EPS1, both by weight and volume-%. The results suggest that a direct correlation between density and moisture absorption cannot be assumed.

5.1.3 Why was the weight of EPS significantly reduced between measurements?

The weighing at day 21 showed a significant weight reduction across all EPS samples compared to the weighing at day 14. Meanwhile, XPS samples showed no significant change in weight from the previous two weightings. The reduction in EPS weight was between 14 and 20 grams, corresponding to approximately half the dry weight of the samples. Possible measurement errors and physical causes are discussed in the following paragraphs.

5.1.3.1 Measurement errors

An early explanation for the peculiar results would be measurement errors. However, consistency of the results across all samples, and the steady mass development of the XPS samples suggest that no errors were made. The scale used for the weighing was calibrated and controlled by a central governing authority in late 2016, and had not been modified or tampered with between weighing dates.

Both the EPS and XPS samples were subjected to the same procedure after being removed from the water basins and while being dried. This procedure had not changed since the previous weighing. In an attempt to see if the drying procedure could have affected the results, an EPS sample (2-3) was removed from its basin on day 23 and weighed without any drying at all. Its weight was still lower than it had been after drying on day 14.

In later measurements, the mass of the EPS samples have gone up and down, all following the same tendency, but not as drastically as between day 14 and day 21. It was decided to repeat the experiment and see if the results could be reproduced with a second set of samples under the same conditions. The repeat experiment had no direct weight reduction, but the rate of weight increase changed significantly throughout the measuring period.

5.1.3.2 Possible physical explanations

It was first suspected that parts of the EPS material had dissolved in the submersion vats, but no dissolved matter was observed in the water. Had the phenomenon been caused by dissolution, it should have been observable to a significant degree as the total mass reduction of the samples in one of the basins was approximately 100 grams. Additionally, polystyrene is not soluble in water, nor does EPS or XPS contain any substances that are.

It was also briefly considered if water absorption could cause swelling that would affect the pore structure by tearing pores apart. This would, presumably, lower the capillary forces and reduce the material's capacity to hold water once removed from the basin. However, according to Ossa and Romo (2012), polystyrene does not absorb water to a significant degree, nor does it expand when water is absorbed.

5.1.3.3 Barometric pressure

This was found to be the most plausible explanation for the observations. As EPS is produced, pockets of air are trapped inside the material. The air pressure in these pockets would

correspond to the atmospheric pressure at the time and site of production. When the material is submerged in water, the hydrostatic pressure will be greater than the air pressure, and the air pockets will be compressed as water seeps in. When pressure is relieved, the air pockets will expand, pressing water out of the material.

However, the pressure that forces water into the material is not only hydrostatic. Atmospheric pressure above the water surface will also contribute greatly. The standard NS-EN 12087:2013 mandates 50 mm of water above the samples, which provides approximately 5 hPa of ambient pressure. However, the atmospheric pressure during the measurement period fluctuated between 995 and 1046 hPa, providing a pressure difference of 49 hPa, or ten times the contribution of hydrostatic pressure.

The atmospheric pressure is continuously logged by a barometer on site, whose output is shown alongside the sample weight graph in Figure 5. A correlation between measured weight and barometric pressure is clearly visible. The phenomenon is also recorded by Bomberg (1983), as shown in Figure 10, and implied by Ossa and Romo (2012). Ojanen and Kokko (1997) tested water absorption under heightened pressure by using a pressure chamber, and recorded similar tendencies as have been observed in this article.

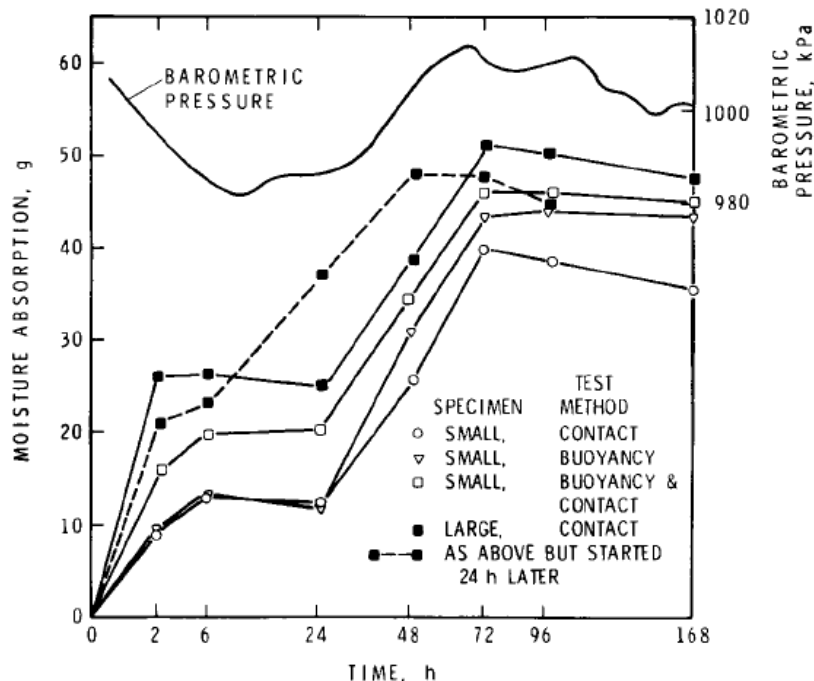


Figure 10: Correlation between moisture absorption and atmospheric pressure (Bomberg, 1983, p. 237)

5.2 Water absorption from humid air

The results of these experiments show that the weight of the EPS samples were somewhat reduced throughout the measurement period, while XPS gained a slight amount of mass. No explanation for this has been found, nor has any literature been found on the subject.

5.3 Thermal resistance measurements

Results show that the materials have all had their thermal conductivity value increase after 12 weeks of immersion, relative to the declared value. Curiously, the samples that had the greatest increase (XPS1, 18.1 %) and smallest increase (XPS3, 4.7 %) were both XPS.

Measurements show that moisture absorption has a great influence on the thermal conductivity of plastic insulation.

However, it has to be noted that the standard NS-EN 12667:2001 is designed for dry, homogeneous, uniform samples. As the samples here were wet, the measurements fell somewhat outside the scope of the standard. Additionally, as thermal resistance is measured by creating a temperature gradient in the material, a moisture gradient will naturally follow. This means the material will not be uniform when the test is performed.

5.4 The effects of moisture absorption on thermal properties

Note that declared thermal conductivity is only applicable to dry conditions. The standard NS-EN ISO 10456:2007 is used to calculate design values based on declared values, where moisture content is accounted for. As the standard assumes a moisture content of 10 volume-% for EPS, it can be said to be conservative as far as the observations in this article go – the highest observed moisture content was 6.74 %.

There is also some uncertainty associated with using the λ value of wet insulation when designing a building, as it is difficult to tell what realistic moisture exposure in use will be like. The degree of exposure will vary between building sites, seasons, and precipitation amounts, all of which are difficult to predict.

5.5 Relevance of experiments and implications for standards

According to the test method described in NS-EN 12087:2013, material samples should be submerged in water for four weeks before being weighed. In this experiment, the weighing was done more frequently, every 7 days, showing how moisture absorption develops over time. The observations suggest that moisture content does not reach a stable level, and that a single point of measurement can be misleading. The procedure described in the standard does not take fluctuations in atmospheric pressure into account; this effect may have a significant impact on the results of the measurements.

However, it is difficult to design a test method that replicates real exposure conditions. Plastic insulation is used in many different applications and exposed to many different conditions. This includes varying ground- and drainage conditions, varying temperature that at some times may allow drying, freeze-thaw cycles, snowmelt, and precipitation. Full immersion in water with constant water pressure, as used in this test procedure, is rarely experienced in buildings. This is also mentioned by Cai et al. (2017), according to whom results from moisture absorption studies vary to a much greater degree for EPS than for XPS. Stagrum (2017) collected data from measurements of moisture content in insulation from field studies, shown in Figure 11. The data suggests that in the long term, XPS will absorb more water than EPS, with some values far exceeding those found in this article. This suggests that material degradation has great influence on moisture content.

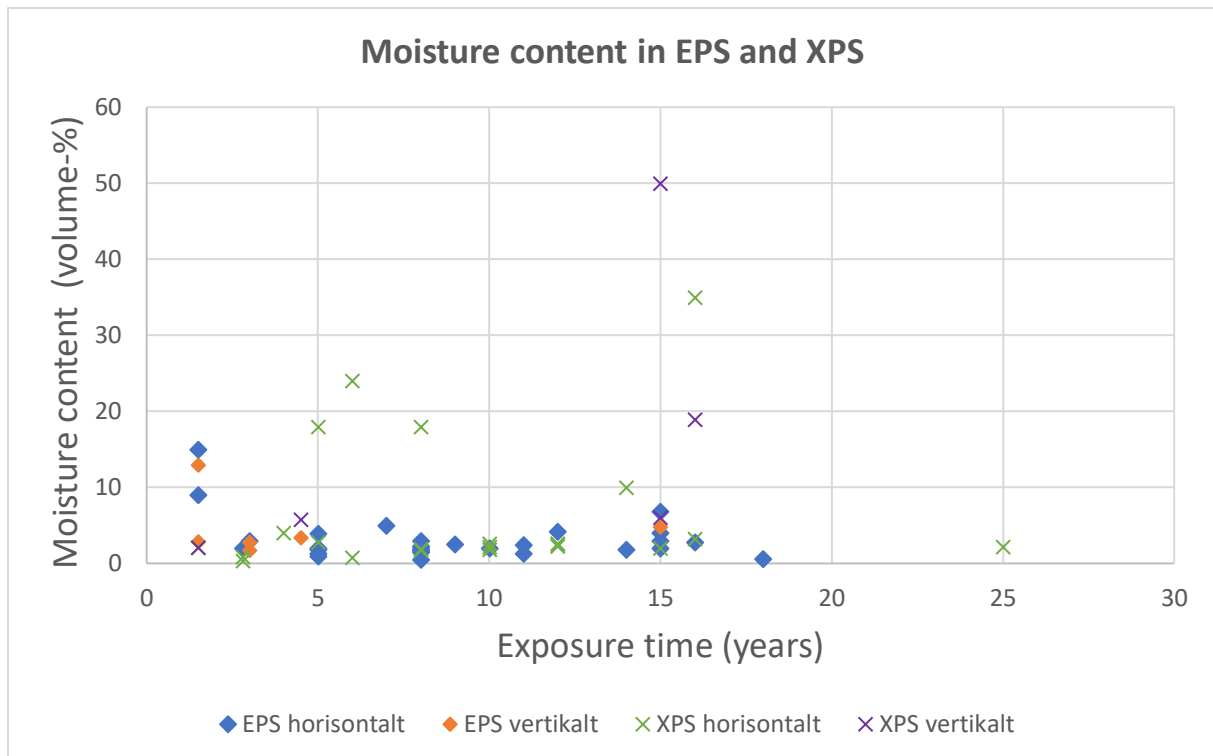


Figure 11: Moisture content of EPS and XPS, plotted against exposure time (From Stagrum, 2017)

6. Conclusions and future work

After 13 weeks' immersion in water, the moisture content in the EPS samples spanned between 3.2 and 6.7 volume-%. For XPS exposed to the same procedure, the content was 0.2-0.3 volume-%. Additionally, a 28-day repeat test was conducted on additional EPS samples, resulting in water contents of 2.7-6.1 volume-%. The large variation in moisture content for EPS is caused by inhomogeneities resulting from the production process. The density and compressive strength of EPS is found to be of less importance for moisture absorption than that of XPS.

The water absorption in EPS did not develop uniformly, but fluctuated throughout the measuring period, and did not stabilize. The most likely cause for this was found to be fluctuations in atmospheric pressure, which causes the air trapped inside pores in the material to contract and expand, allowing water to seep in or pressing it out, respectively. Figure 5 shows how fluctuations in atmospheric pressure correlate perfectly with fluctuations in measured weight. The moisture content of XPS was not shown to correlate with atmospheric pressure at all, as shown in Figure 6, this is presumably because XPS has a closed pore structure.

The EPS samples exposed to air at 100 % relative humidity at room temperature did not absorb any moisture at all, but actually lost approximately 1 % of their mass over the measuring period. The XPS samples, however, gained a similar amount of mass. No explanation has been found. As the experiment was performed with uniform ambient conditions on all sides of the samples, it is assumed not to reflect realistic use conditions. Measurements of thermal conductivity after 13 weeks of immersions, performed according to NS-EN 12667:2001, show that the thermal conductivity of wet plastic insulation increases up

to 11.8 % compared to declared values. This severely reduces its effectiveness as thermal insulation.

The results from the immersion experiment suggest that declared moisture absorption values found according to the test procedure described in NS-EN 12087:2013 may not be directly comparable between materials. The result is significantly affected by the ambient atmospheric pressure at the time of measurement. It is quite astounding that this phenomenon is not mentioned in the standard, and adjustments should be evaluated to account for it.

Measuring moisture absorption through complete immersion involves subjecting the material to standing, ambient water pressure. This rarely occurs in realistic use conditions. It is, however, difficult to develop test procedures that perfectly recreate realistic exposure conditions. Plastic insulation is used in many different applications and under many different conditions.

Future work may be conducted to understand the causes and effects of moisture absorption in plastic insulation. For instance, the effects of freezing or material degradation. It would also be interesting to study the drying capabilities of plastic insulation, as realistic use conditions may involve alternating periods of wetting and drying. Furthermore, the moisture content of plastic insulation in field use may be measured. Lastly, future work could include building energy simulations comparing measured thermal conductivity values to design values, to assess to which degree moisture absorption affects the energy use of a building.

7. References

- Abahri, K., Bennacer, R., Belarbi, R., 2016. Sensitivity analyses of convective and diffusive driving potentials on combined heat air and mass transfer in hygroscopic materials. *Numer. Heat Transf. Part Appl.* 69, 1079–1091.
- Al-Homoud, M.S., 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Build. Environ.* 40, 353–366.
- Alvey, J.B., Patel, J., Stephenson, L.D., 2017. Experimental study on the effects of humidity and temperature on aerogel composite and foam insulations. *Energy Build.* 144, 358–371.
- Auracher, H., 1978. On the measurement of thermal conductivity in moist porous materials. *Int. J. Refrig.* 1, 39–46.
- Bomberg, M., 1989. Testing water vapor transmission: unresolved issues, in: *Water Vapor Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanisms and Measurement*. ASTM International.
- Bomberg, M., Dillon, R.F., 1984. Laboratory Methods for Determining Moisture Absorption of Thermal Insulations: III. Interlaboratory Comparison of Water Intake of Rigid Thermal Insulations. *J. Therm. Insul.* 8, 33–48.
- Bomberg, M.T., Kumaran, M.K., 1995. Procedures to predict long-term thermal performance of boardstock foam insulations. Internal Report.
- Cai, S., Zhang, B., Cremaschi, L., 2017. Review of moisture behavior and thermal performance of polystyrene insulation in building applications. *Build. Environ.* 123, 50–65.
- Costeux, S., Vo, C.V., Hood, L.S., 2010. Long term performance of insulation foams, in: *Foams 2010 SPE Conference*.
- Dechow, F.J., Epstein, K.A., 1978. Laboratory and field investigations of moisture absorption and its effect on thermal performance of various insulations, in: *Thermal Transmission Measurements of Insulation*. ASTM International.
- Ducoulombier, L., Lafhaj, Z., 2017. Comparative study of hygrothermal properties of five thermal insulation materials. *Case Stud. Therm. Eng.* 10, 628–640.

- Duškov, M., 1997. Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures. *Geotext. Geomembr.* 15, 147–181.
- Forgues, A.O., 1983. Laboratory Methods for Determining Moisture Absorption of Thermal Insulations: II: Comparison of Three Water Absorption Test Methods With Field Performance Data. *J. Therm. Insul.* 7, 128–137.
- Gnip, I.Y., Kersulis, V., Vejelis, S., Vaitkus, S., 2006. Water absorption of expanded polystyrene boards. *Polym. Test.* 25, 635–641.
- Hoffee, A.R., 1989. Variability of Water Vapor Transmission Rates of Extruded Polystyrene Using ASTM E 96-80 (Desiccant Method), in: *Water Vapor Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanisms and Measurement*. ASTM International.
- Jerman, M., Černý, R., 2012. Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy Build.* 53, 39–46.
- Lakatos, Á., 2016. Moisture induced changes in the building physics parameters of insulation materials. *Sci. Technol. Built Environ.* 22, 252–260.
- Lakatos, A., 2012. Investigation of water sorption properties of different insulating materials. *Adv Res Sci Areas* 6, 1827–1831.
- Lakatos, Á., Kalmár, F., 2013. Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 34, 407–416.
- Levy, M.M., 1966. Moisture Vapor Transmission and Its Effect on Thermal Efficiency of Foam Plastics. *J. Cell. Plast.* 2, 37–45.
- Lindqvist, K., Tjernsbekk, J.A., Stang, T.A., Andersen, L.-M.B., 2011. Ekspandert polystyren i veibygging, bacheloroppgave. Statens Vegvesen.
- Litovsky, E., Kleiman, J., 2005. Relative influence of heat transfer mechanisms on apparent thermal conductivity of porous materials, in: *26 Th International Thermal Conductivity Conference*. pp. 389–400.
- Litovsky, E., Shapiro, M., Shavit, A., 1996. Gas pressure and temperature dependences of thermal conductivity of porous ceramic materials: Part 2, refractories and ceramics with porosity exceeding 30%. *J. Am. Ceram. Soc.* 79, 1366–1376.
- Mattila, H.-P., 2017. Moisture Behavior of Building Insulation Materials and Good Building Practices. *EPS* 15, 31.
- O'Brien, A.M., Mc Guckin, C., 2016. *The systematic literature review method: trials and tribulations of electronic database searching at doctoral level*. SAGE Publications.
- Ojanen, T., Kokko, E., 1997. Moisture performance analysis of EPS frost insulation, in: *Insulation Materials: Testing and Applications, 3rd Volume*. ASTM International.
- Ossa, A., Romo, M.P., 2012. Confining stress influence on EPS water absorption capability. *Geotext. Geomembr.* 35, 132–137.
- Owens Corning, 2011. *FOAMULAR Extruded Polystyrene Insulation Resisting Water Absorption, the Key for High Performance Foam Plastic Rigid Insulation*.
- Ozkan, E., 1994. Thermal and mechanical properties of cellular polystyrene and polyurethane insulation materials aged on a flat roof in hot-dry climate. *J. Test. Eval.* 22, 149–160.
- Pakkala, T.A., Lahdensivu, J., 2014. Long-term water absorption tests for frost insulation materials taking into account frost attack. *Case Stud. Constr. Mater.* 1, 40–45.
- Papadopoulos, A.M., 2005. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy Build.* 37, 77–86.
- Šadauskienė, J., Bliūdžius, R., Ramanauskas, J., GRICIUTĖ, G., 2009. Analysis of distribution of properties of expanded polystyrene in production and their changes in exploitation conditions. *Mater. Sci. Medžiagotyra* 12, 372–376.
- Sarlin, J., Tormala, P., Jarvela, Pirkko, Jarvela, Pentti, 1986. The effect of moulding on the absorption of water in expanded polystyrene (EPS). *J. Cell. Plast.* 22, 391–403.
- Stagrum, A.E., 2017. *Fukt i isolasjon mot terreng (Project thesis)*. Norwegian University of Science and Technology.

- Szodrai, F., Lakatos, Á., 2014. Measurements of the thermal conductivities of some commonly used insulating materials after wetting. *Environ. Eng. Manag. J.* 13, 2881–2886.
- Tobiasson, W., Greatorex, A., Van Pelt, D., 1986. New wetting curves for common roof insulations. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Vėjelis, S., Vaitkus, S., 2006. Investigation of water absorption by expanded polystyrene slabs. *Mater. Sci.* 12, 134–137.
- Vo, C.V., Bunge, F., Duffy, J., Hood, L., 2011. Advances in thermal insulation of extruded polystyrene foams. *Cell. Polym.* 30, 137.
- Whalen, J., 2002. Performance of molded expanded polystyrene (EPS) thermal insulation in below-grade applications, in: *Insulation Materials: Testing and Applications: 4 Th Volume*. ASTM International.

