



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTETET
MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og Materialer Master i Teknologi/Siv.ing	Vårsemesteret, 2023 <u>Åpen</u> / Konfidensiell
Forfattere: Vegard Nornes Pedersen & Snorre Braut Øksnevad	
Fagansvarlig ved UiS: Kjell Tore Fosså Veileder: Kjell Tore Fosså Ekstern(e) veileder(e): Samdar Kakay, Jarle Berge & Gaute Hagtvedt	
Tittel på oppgaven: Miljøvennlig Betong Engelsk tittel: Environmental Concrete	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Lavkarbonbetong Herdebetingelser Fasthetsutvikling Permeabilitet Kloridinntrengning Miljøregnskap	Sidetall: 94 + vedlegg/annet: 35 Stavanger, 15.06.2023

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler hvordan bruk av forskjellige sementtyper og herdebetingelser vil påvirke en konstruksjonsbetong sine egenskaper. De siste årene er det blitt gjort et omfattende arbeid for å gjøre betongbruken i byggebransjen mer miljøvennlig. Produksjonen av sement står for om lag 90% av betongens samlede klimagassutslipp, og et hovedgrep for å redusere dette utslippet er å erstatte noe av sementinnholdet i betongen med alternative bindemidler som for eksempel flygeaske eller slagg.

Oppgaven består av et prøveprogram hvor det er støpt prøveterninger av tre forskjellige betongresepter, alle med fasthetsklasse B50 og bestandighetsklasse M40. Reseptene bestod av en konvensjonell betong med Norcem Industrisement, og to lavkarbonbetonger der den ene inneholder Schwenk Lavvarmesement, og den andre inneholder Norcem Standard FA med ekstra tilsatt flygeaske opptil 60% av bindemiddelet. Prøveterningene er så blitt delt opp i fire ulike herdebetingelser, herding på *Benk*, i *Vannbad*, først to dager i *Vannbad* og deretter på *Benk*, og *Klimaskap* på 5 °C og 30% RF. Gjennom prøveprogrammet er det kontinuerlig blitt utført diverse tester, både i fersk fase og i herdefasen, for å bestemme ulike betongegenskaper og utviklingsforløp til de forskjellige betongtypene.

Resultatene fra trykktesting opptil 90 dager etter utstøping har vist at, for alle reseptene, har herdebetingelsen *Vannbad* gitt den beste fasthetsutviklingen, etterfulgt av *Vannbad+Benk*, *Benk*, og *Klimaskap* med dårligst fasthetsutvikling. I tillegg viser resultatene at Lavvarmesementen har størst variasjon i utvikling mellom de ulike herdebetingelsene, og blir klart mest negativt påvirket av å herde i *Klimaskap*. Betongen med Standard 60% FA har også en del variasjon mellom herdebetingelsene, men i mindre grad enn Lavvarmen. Industrisementen ser derimot ut til å ikke bli særlig påvirket av de ulike herdebetingelsene, og har veldig lik fasthetsutvikling for alle trykktestene.

Det var også planlagt å utføre en test for temperaturutviklingen til de ulike betongreseptene, men ettersom utstyret sviktet i løpet av denne testen, mangler disse resultatene. Derfor er det kun den teoretiske delen av dette forsøket som er presentert i denne oppgaven.

PF-Metoden er utført både på dag 28 og 56 etter utstøping for å bestemme betongprøvenes porøsitet og permeabilitet. Resultatene fra testene viser generelt sett den samme tendensen

som ved trykktestingen ved at alle tre reseptene har fått lavest porøsitet for herdebetingelsen *Vannbad*, etterfulgt av *Vannbad+Benk*, *Benk*, og til slutt *Klimaskap* med høyest porøsitet. Også her viser resultatene at herdebetingelsene har skapt størst variasjon for Lavvarmen, litt mindre variasjon for Standard 60% FA, og nesten ingen variasjon for Industrisement.

Det ble utført en test etter NT Build 443 for kloridinntrengning. I resultatene vi fikk var det mye usikkerhet, noen målinger var urimelige og måtte ses bort fra, og andre var en del høyere enn vi kunne forvente. Det ble derfor vanskelig å si noe med sikkerhet, men det er allikevel mulig å se noen tendenser. For industriresepten ser vi lignende resultater som på PF-metoden, den blir i liten grad påvirket av herdebetingelser. For miljøreseptene ser vi det motsatte, de blir sterkt påvirket av herdebetingelsene, der vannbad gir best motstand.

Sammenligner vi miljøbetongen med industribetongen ser vi at der miljøbetongen får gode herdebetingelser gir den en bedre motstand mot klorider enn det industrien gjør ved samme herdebetingelser. I motsatt ende ser vi også at dersom miljøbetongen får dårlige herdebetingelser, gir det en mye dårlige motstand enn det industrien gjør ved samme forhold.

Oppgaven består også av et miljøregnskap for bruken av de tre sementtypene fra prøveprogrammet. Resultatene her viser at det er mulig med store besparelser i klimagassutslipp relatert til valg av sementtype. Betongen med Industrisement vil ha klart høyest klimagassutslipp på rundt 294.32 kg CO₂-ekv. pr m³, og karakteriseres med det som en betong på grensen mellom Bransjereferanse og Lavkarbon B. Ved å bruke Standard 60% FA vil man kunne halvere dette utslippet til rundt 147.95 kg CO₂-ekv. pr m³, og oppnå en betong i Lavkarbon Pluss klassen. Å bruke Lavvarmesement vil ytterligere redusere utslippet til rundt 103.8 kg CO₂-ekv. pr m³, noe som tilsvarer en Lavkarbon Ekstrem betong.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	II
Innholdsfortegnelse.....	IV
Figurliste.....	VI
Tabelliste.....	VII
Forord.....	IX
1. Innledning.....	1
2. Teori.....	2
2.1 Hydratisering.....	2
2.2 Sementtyper.....	3
2.3 Støpelighet.....	5
2.4 Tilsetningsstoffer.....	6
2.4.1 Vannreducerende Tilsetningsstoffer.....	6
2.5 Porøsitet og Permeabilitet.....	7
2.6 Riss.....	10
2.6.1 Risstendens i Fersk Fase.....	10
2.6.1.1 Plastisk Svinn.....	10
2.6.1.2 Plastisk Setning.....	11
2.6.2 Risstendens i Herdefasen.....	12
2.6.2.1 Autogent Svinn.....	12
2.6.2.2 Termisk Svinn.....	12
2.6.2.3 Uttørkningssvinn.....	14
2.7 Miljøvennlig Betong.....	15
2.7.1 Lavkarbonbetong.....	15
2.7.2 Betongens Totale Klimagassutslipp.....	17
2.7.2.1 Sementens Klimagassutslipp.....	17
2.7.2.2 Tilsetningsmaterialer.....	18
2.7.3 Levetidsbetraktninger.....	20
2.7.4 EPD.....	20
2.7.5 Regional Tilgjengelighet av Lavkarbonbetong.....	22
2.7.5.1 Tilgjengelig Bindemiddeltyper.....	22
2.7.5.2 Tilgjengelig Tilslag.....	24
2.7.5.3 Råvaretransport.....	24

2.7.5.4 Regionale Variasjoner	24
2.7.6 Tekniske Egenskaper ved Bruk av Lavkarbonbetong	25
2.7.6.1 Støpelighet	25
2.7.6.2 Flygeaske	26
2.7.6.3 Slagg	26
2.7.6.4 Fasthetsutvikling, Temperaturfølsomhet og Vinterstøp	27
3. Metode	29
3.1 Ferske Egenskaper	29
3.2 Herdede Egenskaper	29
4. Prøveprogram	30
4.1 Materialer	30
4.2 Proporsjonering	32
4.3 Ferske Egenskaper	36
4.3.1 Synkmål	36
4.3.2 Fersk Densitet	38
4.3.3 Luftinnhold	38
4.3.4 Temperaturutvikling	40
4.4 Støping av Prøveterning	41
4.5 Herdeforhold	42
4.6 Herdede Egenskaper	43
4.6.1 Trykkfasthet	43
4.6.1.1 Karakteristisk Trykkfasthet, 28 Døgn	45
4.6.2 PF-Metoden – Densitet og Porøsitet	46
4.6.3 Kloridpermeabilitet	51
5. Resultater	54
5.1 Resultater Fersk Betong	54
5.1.1 Synkmål	54
5.1.2 Fersk Densitet	55
5.1.3 Luftinnhold	56
5.1.4 Temperaturutvikling	56
5.2 Resultater Herdet Betong	57
5.2.1 Trykkfasthet	57
5.2.2 PF-Metoden, Dag 28	64
5.2.3 PF-Metoden, Dag 56	71

5.2.4 Kloridpermeabilitet.....	77
6. Miljøregnskap.....	80
6.1 «Case» av Utbygging av Garasjebygg.....	83
7. Konklusjon.....	87
8. Referanser.....	90
9. Vedlegg.....	94

Figurliste

<i>Figur 1: Forhold mellom fast stoff og ulike porer i herdet sementpasta med varierende v/c-tall.....</i>	<i>7</i>
<i>Figur 2: Sammenheng mellom v/c-tall og permeabilitet.....</i>	<i>9</i>
<i>Figur 3: Sammenheng mellom betongens permeabilitet og poretyper.....</i>	<i>9</i>
<i>Figur 4: Plastisk setningsriss hos betong med og uten armering.....</i>	<i>11</i>
<i>Figur 5: Svinn og oppsvelling i betong ved uttørking og fukting.....</i>	<i>14</i>
<i>Figur 6: Klimagassutslipp knyttet til de ulike delmaterialene i en typisk konstruksjonsbetong (NorBetong B30 M60).....</i>	<i>17</i>
<i>Figur 7: Regionale tilgjengelighet av lavkarbonbetong.....</i>	<i>25</i>
<i>Figur 8: Matriksvolum.....</i>	<i>33</i>
<i>Figur 9: Tomrom i sammensatt tilslag.....</i>	<i>34</i>
<i>Figur 10: Målt siktekurve og referanselinje av tilslag brukt i reseptene.....</i>	<i>34</i>
<i>Figur 11: Resept for betong med Lavvarmesement.....</i>	<i>35</i>
<i>Figur 12: Resept for betong med Standard 60% FA.....</i>	<i>35</i>
<i>Figur 13: Resept for betong med Industrisement.....</i>	<i>36</i>
<i>Figur 14: Prinsipp for måling av synkmål.....</i>	<i>37</i>
<i>Figur 15: Former av Synkmål.....</i>	<i>37</i>
<i>Figur 16: Luftporemåler.....</i>	<i>39</i>
<i>Figur 17: Manometerviser til luftporemåleren.....</i>	<i>39</i>
<i>Figur 18: Nystøpt betong i terningformer.....</i>	<i>42</i>
<i>Figur 19: Prøveterning før og etter trykktest.....</i>	<i>44</i>
<i>Figur 20: Oppsett for test av vannabsorpsjon til prøveskive.....</i>	<i>46</i>
<i>Figur 21: Maskin brukt for å kutte prøveterningene.....</i>	<i>46</i>
<i>Figur 22: Betongskivene delvis nedsunket i vann.....</i>	<i>46</i>
<i>Figur 23: Oppsett for veiing under vann (g₃).....</i>	<i>47</i>
<i>Figur 24: Beregning av Kapillaritetstallet og Motstandstall.....</i>	<i>48</i>
<i>Figur 25: Analyse av kvalitet på betongpermeabilitet etter Powers modell.....</i>	<i>49</i>
<i>Figur 26: Hydratiseringsgrad i standard sement med varierende v/c-tall.....</i>	<i>50</i>
<i>Figur 27: Prøveterninger med påført epoksy.....</i>	<i>51</i>
<i>Figur 28: Boremaskin brukt for å samle betongstøv.....</i>	<i>52</i>
<i>Figur 29: Måling av kloridinnhold i herda betong.....</i>	<i>53</i>
<i>Figur 30: Resultater av synkmål til blanding 2 for betong med Lavvarme-,</i>	

<i>Standard 60% FA- og Industrisement</i>	54
<i>Figur 31: Synkmål Standard 60% FA B2</i>	54
<i>Figur 32: Resultater fersk densitet</i>	55
<i>Figur 33: Resultater luftinnholdmålinger</i>	56
<i>Figur 34: Fasthetsutvikling til betong med Lavvarmesement</i>	62
<i>Figur 35: Fasthetsutvikling til betong med Standardsement 60% FA</i>	62
<i>Figur 36: Fasthetsutvikling til betong med Industrisement</i>	62
<i>Figur 37: Porøsitet Skive 1&2 med Lavvarme sement etter 28 dager herding</i>	64
<i>Figur 38: Porøsitet skive 1&2 med Standard 60% FA sement etter 28 dager herding</i>	64
<i>Figur 39: Porøsitet skive 1&2 med Industri sement etter 28 dager herding</i>	64
<i>Figur 40: Kalkulert masseforhold til Lavvarme etter 28 dager ifølge PF-metoden</i>	66
<i>Figur 41: Kalkulert Masseforhold til Standard 60% FA etter 28 dager ifølge PF-Metoden</i>	66
<i>Figur 42: Kalkulert masseforhold til Industri etter 28 dager ifølge PF-Metoden</i>	66
<i>Figur 43: Hydratiseringsgrad Lavvarme, Dag 28</i>	67
<i>Figur 44: Hydratiseringsgrad Standard 60% FA, Dag 28</i>	67
<i>Figur 45: Hydratiseringsgrad Industri, Dag28</i>	68
<i>Figur 46: Motstandstill til betong med Lavvarme sement, Dag 28</i>	69
<i>Figur 47: Motstandstill til betong med Standard 60% FA sement, Dag 28</i>	69
<i>Figur 48: Motstandstill til betong med Industri sement, Dag 28</i>	69
<i>Figur 49: Porøsitet Skive 1&2 med Lavvarme sement etter 56 dager herding</i>	71
<i>Figur 50: Porøsitet skive 1&2 med Standard 60% FA sement etter 56 dager herding</i>	71
<i>Figur 51: Porøsitet skive 1&2 med Industri sement etter 28 dager herding</i>	71
<i>Figur 52: Kalkulert masseforhold til Lavvarme etter 56 dager ifølge PF-metoden</i>	73
<i>Figur 53: Kalkulert Masseforhold til Standard 60% FA etter 56 dager ifølge PF-Metoden</i>	73
<i>Figur 54: Kalkulert masseforhold til Industri etter 56 dager ifølge PF-Metoden</i>	73
<i>Figur 55: Hydratiseringsgrad Lavvarme, Dag 56</i>	74
<i>Figur 56: Hydratiseringsgrad Standard 60% FA, Dag 56</i>	74
<i>Figur 57: Hydratiseringsgrad Industri, Dag 56</i>	74
<i>Figur 58: Motstandstill til betong med Lavvarme sement, Dag 56</i>	75
<i>Figur 59: Motstandstill til betong med Standard 60% FA sement, Dag 56</i>	75
<i>Figur 60: Motstandstill til betong med Industri sement, Dag 56</i>	76
<i>Figur 61: 3D-modell av garasjebygg</i>	83
<i>Figur 62: Plantegning til garasjebygg</i>	83
<i>Figur 63: Fasadetegning for kortsiden til garasjebygg</i>	84

Tabelliste

<i>Tabell 1: Lavkarbonklasser med grenseverdier for klimagassutslipp</i>	16
<i>Tabell 2: Tilgjengelighet av sementer produsert av Aalborg Portland</i>	23
<i>Tabell 3: Tilgjengelighet av sementer produsert av Schwenk</i>	23

<i>Tabell 4: Tilgjengelighet av sementer produsert av Norcem</i>	23
<i>Tabell 5: Materialer brukt under forsøket</i>	30
<i>Tabell 6: Produktdata Schwenk Lavvarmesement</i>	31
<i>Tabell 7: Produktdata Norcem Standard FA</i>	31
<i>Tabell 8: Produktdata Norcem Industrisement</i>	31
<i>Tabell 9: Fasthetsklasse v/c tall Industrisement</i>	32
<i>Tabell 10: Bestandighetsklasse v/c-tall Industrisement</i>	32
<i>Tabell 11: Fasthetsklasse Standard FA</i>	33
<i>Tabell 12: Synklasser fersk betong</i>	37
<i>Tabell 13: Trykkfasthetsklasser for normalbetong og tungbetong</i>	45
<i>Tabell 14: Trykkfasthet, Dag 1</i>	57
<i>Tabell 15: Trykkfasthet, Dag 3</i>	58
<i>Tabell 16: Trykkfasthet, Dag 7</i>	58
<i>Tabell 17: Trykkfasthet, Dag 14</i>	59
<i>Tabell 18: Trykkfasthet, Dag 28</i>	60
<i>Tabell 19: Trykkfasthet, Dag 56</i>	61
<i>Tabell 20: Trykkfasthet, Dag 90</i>	62
<i>Tabell 21: Referanseverdier</i>	77
<i>Tabell 22: Resultater Kloridinntrengning Standard 60% FA</i>	77
<i>Tabell 23: Resultater Kloridinntrengning Lavvarme</i>	78
<i>Tabell 24: Resultater Kloridinntrengning Industri</i>	79
<i>Tabell 25: Produktspesifikasjon Schwenk Lavvarmesement</i>	80
<i>Tabell 26: Miljøpåkjenning Schwenk Lavvarmesement</i>	80
<i>Tabell 27: Produktspesifikasjon Norcem Standardsement FA</i>	81
<i>Tabell 28: Miljøpåkjenning Norcem Standardsement FA</i>	81
<i>Tabell 29: Produktspesifikasjon Norcem Industrisement</i>	81
<i>Tabell 30: Miljøpåkjenning Norcem Industrisement</i>	81

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en avslutning på en 2-årig mastergrad ved Universitet i Stavanger, våren 2023 av Vegard Nornes Pedersen og Snorre Braut Øksnevad. Fokuset i oppgaven har vært på miljøbetong, og hvordan herdebetingelser påvirker den.

Oppgavens praktiske del har vært utført i bygglaboratoriet i Ivar Langens hus ved UiS, med unntak av selve blandingen og støpingen av betongen, som på grunn av oppgraderingsarbeid ble utført hos Sandnes & Jærbetong på Fosseikeland.

Vi vil rette stor takk til veileder Kjell Tore Fosså for god hjelp og veiledning gjennom hele oppgaven. Vi vil også takke Samdar Kakay, Jarle Berge og studentassistent Gaute Hagtvedt for god hjelp med den praktiske delen av oppgaven. Vi vil også takke Sandnes & Jærbetong for at de lot oss låne betongblander og lab til utstøpingen i oppgaven vår.

1. Innledning

Klima og miljø er blitt et viktigere og viktigere tema i dagens samfunn. I 2015 vedtok verdens land Parisavtalen som binder alle land i avtalen til å iverksette klimatiltak. Målet er å nå toppen av klimagassutslipp så fort så mulig, og at vi mellom 2050 og 2100 skal være klimanøytrale. For at det skal være mulig, må alt og alle bidra. I vår bransje hvor betongen står for størsteparten av utslippene er miljøbetong på vei frem og blir mer og mer populært. [1] [2] [3]

I denne oppgaven vil vi se nærmere på miljøbetongen, og hvordan dens egenskaper blir påvirket av forskjellige herdebetingelser. Oppgaven består av en teoridel, en eksperimentell del, og til slutt en del som tar for seg miljøregnskap. I teoridelen gis det en innføring i aktuell betongteknologi og miljøbetong.

I den eksperimentelle delen tester vi 3 resepter av høyfast betong, en som inneholder Standardsement FA med ekstra tilsatt flygeaske opptil 60% av bindemiddelet, en Lavvarmesement med 70% slag, og en Standard Industrisement, som blir brukt som en referanse. Det blir testet noen ferske egenskaper under støpingen, samt trykkfasthet, porøsitet og kloridinntrengning i forskjellige stadier av herdingen.

I den siste delen ses det på effekten de ulike sementtypene fra den eksperimentelle delen ville fått for miljøregnskapet. Dette blir også studert gjennom en «case» med en tenkt garasje.

Problemstilling

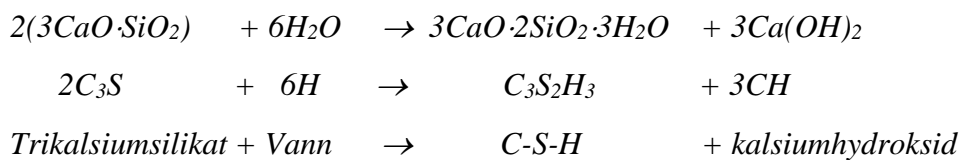
Hvordan blir miljøbetong påvirket av forskjellige herdebetingelser kontra en konvensjonell betong?

2. Teori

2.1 Hydratisering

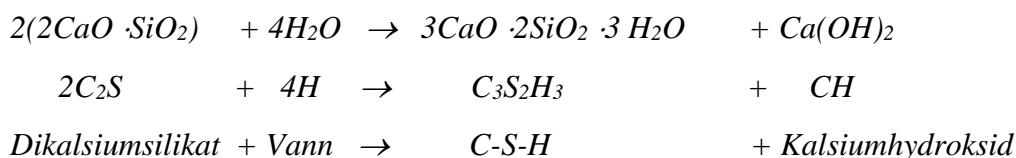
Hydratisering vil si den kjemiske prosessen som oppstår når vann og sement blandes sammen, og som gjør at blandingen går over til en fast form. [4] Sementens hydratisering vil påvirke betongens fasthetsutvikling og langsiktige styrke, i tillegg til temperaturutvikling, holdbarhet og kjemisk motstand. Denne påvirkningen avhenger i stor grad av sementtype og dens innhold av de fire klinkermaterialene C_3S , C_2S , C_3A , og C_4AF . Disse klinkermaterialene vil reagere med vann og påvirke betongen på følgende måte:

C_3S (trikalsiumsilikat):



C_3S utgjør normalt 55-60% av sementinnholdet og vil gi en rask fasthetsutvikling og bidra til høy langsiktig styrke. Den vil også gi relativt høy varmeutvikling på totalt ca. 500 kJ/kg, og være motstandsdyktig mot sulfatløsninger. [5]

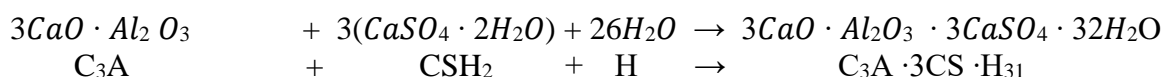
C_2S (Dikalsiumsilikat):

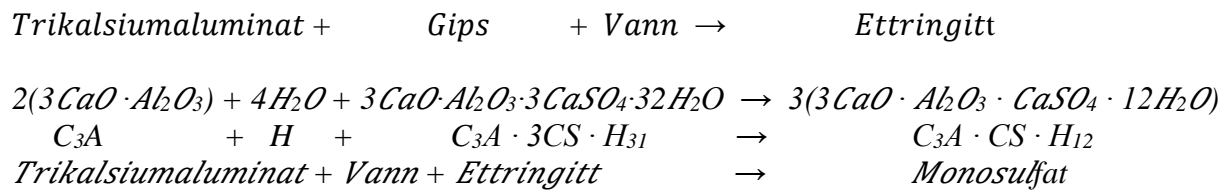


C_2S utgjør normal 18-22% av sementen. Den bidrar også til høy langsiktig styrke og er motstandsdyktig mot sulfatløsninger, men gir en tregere fasthet- og temperaturutvikling. Total varmeutvikling er ca. 260 kJ/kg. [5]

C_3A (trikalsiumaluminat):

C_3A vil ved hydratisering først reagere med gips og vann slik at det produseres ettringitt, som videre vil reagere med C_3A og vann til å produsere monosulfat.





C₃A utgjør normalt 5-10% av sementen, reagerer veldig raskt med vann, har en rask fasthetsutvikling og veldig høy varmetvikling, ca. 900 kJ/kg. Den vil derimot bidra lite til langsiktig styrke, og er ikke motstandsdyktig mot sulfatløsninger. Sementklinker males normalt med 2-5% gips (CaSO₄ · 2H₂O) for å redusere reaksjonshastigheten mellom C₃A og vann. [5]

C₄AF (tetrakalsiumaluminatferritt):

C₄AF vil ha samme hydratiseringsreaksjon som C₃A, men vil ha lite påvirkning på sementegenskapene. Den har en treg varmetvikling og lav total varme på ca. 300 kJ/kg. [5]

I tillegg inneholder sement noe av alkalioksidene Na₂O og K₂O. Sementens alkaliinnhold ligger delvis i sementmineralene og delvis som lettløselig alkalisulfat. Innholdet blir ofte gitt i Na₂O – ekvivalenter, og et økt alkaliinnhold i sementen vil normalt akselerere tidlig styrke, men redusere langtidsstyrken. [5]

Bruk av pozzolaner som flygeaske vil resultere i endring i bindemiddelets kjemiske sammensetning og egenskapsutviklingen i betongen. [5]

2.2 Sementtyper

Norcem Standard

Norcem Standard er en ren portlandsement som vil si at den baserer seg på 95-100 % portlandklinker. Denne sementtypen har et relativt høyt alkaliinnhold, noe som gir en relativt høy tidligfasthet og moderat langtidsfasthet. Det høye alkaliinnholdet gjør derimot at sementen ikke kan brukes i kombinasjon med alkalireaktivt tilslag. Sementens finhet ligger på 345 m²/kg. [6]

Norcem Industri

Norcem Industri har en nokså lik kjemisk sammensetning som Standard-sementen, men den inneholder i tillegg noen prosent nedknust steinmel som er vesentlig finere malt. Industri-

sement har en Blaine-finhet på rundt 550 m²/kg, har en raskere varmeutvikling enn Standardsement som også er noe høyere totalt. Finheten gjør i tillegg at den ferske betongen får en økt seighet ved større innblandinger, men den vil samtidig gjøre den mer stabil, noe som vil gi mindre risiko for separasjon. [6]

Industri-sementens høye varmeutvikling på tidlig tidspunkt vil føre til at hydratiseringsprosessen kommer raskt i gang. Derfor blir denne sementtypen normalt brukt i konstruksjoner der man er avhengig av høye tidligfastheter, spesielt i deler av betongelementproduksjonen, og ved støping i kaldt vær. [6]

Denne sementen har også et høyt alkaliinnhold som gjør at den ikke kan kombineres med reaktivt tilslag, og den høye varmeutviklingen gjør i tillegg at den ikke egner seg for store, massive konstruksjoner. [6]

Norcem Standard FA

Norcem Standard FA ble først introdusert på det norske markedet i 1983, og skulle i utgangspunktet være et rimeligere alternativ til Standardsement, og med identisk fasthets- og varmeutvikling. Standard FA produseres med 20 % flygeaske, og må for å oppnå dette males noe finere til en Blaine-finhet på rundt 450 m²/kg. Alkaliinnholdet er noe lavere enn Standardsement, men ikke lavt nok til å kunne kalles en lavalkalisement. Derimot vil en gunstig innvirkning fra flygeasken gjøre at den kan, ved vanlige mengder per kubikk meter betong, brukes sammen med reaktivt tilslag. Ellers har Standard FA de samme bruksområder som Standardsement. [6]

Når det kommer til bestandighetsegenskaper for Standard FA, er den nokså lik eller bedre enn for Standardsement. For eksempel er motstanden mot kloridinntrengning bedre. [6]

Lavvarmesement

Lavvarmesement er en type Portlandsement som gir svært lav varmeutvikling under hydratisering. Dette oppnås ved å redusere innholdet av C₃S og C₃A, og øke mengden C₂S. Lavvarmesement har normalt et C₃A innhold på rundt 5 % og et C₂S innhold på rundt 46 %. Denne temperaturreduksjonen vil forsinke hydratiseringshastigheten under herding, noe som vil ytterligere begrense hastigheten på varmeutviklingen. Derfor vil varmeutviklingen strekke seg over lengre tid og gjøre at betong med lavvarmesement har en langsom fasthetsutvikling.

Den er dermed ikke særlig egnet for bruk i områder med lave temperaturer. Likevel vil ikke den endelige styrken til betongen bli noe påvirket av denne langsomme fasthetsutvikling. [7]

Fordelene med å bruke lavvarmesement er at den lave varmeutviklingen vil redusere svinn og opprissing i betongen under herdeprosessen. Lavvarmesement kan også brukes til å kontrollere temperaturen ved massestøping hvor varmeutviklingen under hydratiseringsprosessen er veldig høy. I tillegg har denne sementtypen svært lavt innhold av sementklinker, noe som vil gjøre den veldig miljøvennlig. [7]

2.3 Støpelighet

Støpeligheten til betong avgjør hvor lett fersk betong lar seg bearbeides og utfylles i former. En god støpbarhet er viktig for å unngå at det oppstår lommer av betong med høyere v/c-tall, som dermed vil gi betongen en mer porøs struktur. En god utstøping og komprimering av den ferske betongen vil med det være vesentlig for å oppnå en lang levetid. [8]

Betongens støpelighet avhenger av tre forskjellige egenskaper:

1. Mobilitet – den ferske betongens evne til å bevege seg ettersom den blir utsatt for krefter. Det vil altså si hvor lett betongen glir ut i formen av seg selv, eller ved hjelp av vibrator eller lignende. Mobiliteten avhenger av friksjon mellom partikler, intern kohesjon/klebrighet til fast overflate, og motstand mot indre strømminger i væskefasen.
2. Komprimerbarhet – den ferske betongens evne til å utfylle former og fjerne eventuelle luftlommer.
3. Stabilitet – betongens evne til å beholde sin homogenitet gjennom den ferske fasen, både under hvile og utsatt for belastninger fra for eksempel transport, fylling av former og komprimering.

[6] [9]

Disse egenskapene påvirkes igjen av materialer som tilslag, filler, sement, silikastøv og vann. Tilslagets størrelse, form og overflateegenskaper vil både påvirke betongens støpelighet, komprimerbarhet, synkmål og luftinnhold. [9]

Støpelighet kan bli testet med flere ulike metoder, men den mest vanlige er ved testing av synkmål. Denne metoden er beskrevet mer utfyllende i *kapittel 4.3.1*.

2.4 Tilsetningsstoffer

Tilsetningsstoffer blir i henhold til NS 3420 definert som: «*Stoff som tilsettes betongen i små mengder, mindre enn ca. 5 % av sementmengden, for ved sin kjemiske eller fysiske virkning å oppnå eller forbedre spesielle egenskaper*». Bruk av tilsetningsstoffer fikk en stor utvikling i 70- og 80-årene, og i dag er det i større eller mindre mengder tilsatt slike type stoffer i så å si all betong. Bruk av tilsetningsstoffer i betong er altså en god måte å sørge for å oppnå alle de gode egenskapene til betong, samtidig som man unngår alle de uheldige.

Basert på hvilken funksjon tilsetningsstoffene har, deles de inn i fire ulike klasser:

- Klasse P: Vannreducerende
- Klasse L: Luftinnførende
- Klasse R: Retarderende
- Klasse A: Akselererende

En viktig hovedregel her er at tilsetningsstoffer ikke kan gjøre en dårlig betong god, men kan gjøre en god betong bedre. Selv om riktig bruk av tilsetningsstoffer kan gjøre en god betong betydelig bedre, kan samtidig feil bruk ødelegge betongen fullstendig. Det er altså svært viktig å være klar over hvordan de ulike tilsetningsstoffene påvirker betongen. [6]

2.4.1 Vannreducerende Tilsetningsstoffer

Vannreducerende tilsetningsstoff er det mest brukte tilsetningsstoffet i norsk betongproduksjon, og deles inn i to hovedtyper, plastiserende (P) og superplastiserende (SP). Hovedformålet med å bruke slike P- og SP-stoffer er:

- Oppnå ønsket betongkonsistens med mindre vann. Dette vil redusere total vannmengde til betongen, og gi en betong med mindre sementbehov for samme v/c-tall. Man kan med det redusere sementmengden i betongen.
- Gi en bedre støpbarhet og bearbeidbarhet ved lave v/c-tall. Forholdet mellom vann- og sementmengden vil ved lave v/c-tall være såpass liten at selv pastaen vil være svært «tørr». Ettersom den igjen skal blandes med tørt tilslag, vil det naturligvis gi en betongmasse som vanskelig lar seg støpe ut uten bruk av tilsetningsstoffer.

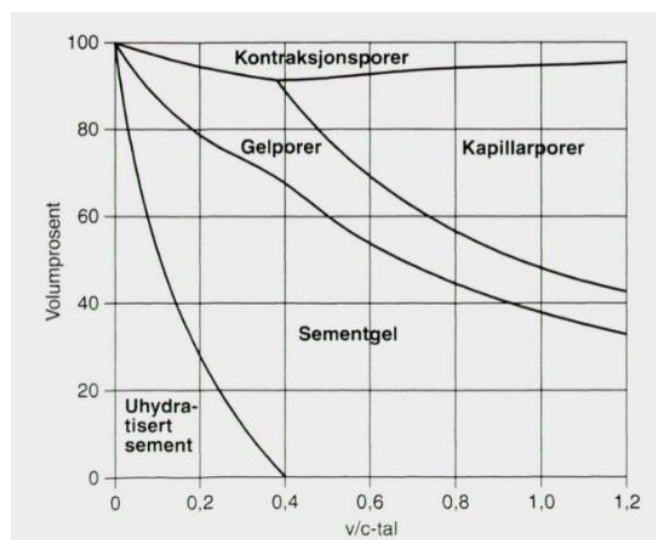
[6]

2.5 Porøsitet og Permeabilitet

Når sement reagerer med vann under hydratiseringsprosessen, forbrukes vannet på to måter. En vannmengde som tilsvarer et v/c-tall på ca. 0,25 er nødvendig for den kjemiske reaksjonen, og blir kjemisk bundet. En annen vannmengde som tilsvarer et v/c-tall på ca. 0,15 blir fysisk bundet til overflaten av reaksjonsproduktene som vann i gelporene, og kalles for gelvann. [6]

Dette vil altså si at for å oppnå 100 % hydratisering av sementen, er det nødvendig med et v/c-tall på minst ca. 0,4, og at vi da i utgangspunktet kun har reaksjonsmasse og gelporer. Dersom man øker v/c-tallet vil man forandre forholdet mellom delene i sementpastaen, og man vil få mer vann i betongblandingen enn det som er nødvendig for at all sement skal hydratisere. Dette vannet vil dermed fordele seg jevnt ut i den ferske pastaen, og når pastaen herder, kan vannet fordampe og etterlate seg relativt store porer, kalt kapillærporer. Slike kapillærporer er rundt 1000 ganger større enn en gelpore. [6]

Figur 1 viser forholdet mellom fast stoff og ulike porer i herdet sementpasta med varierende v/c-tall. Fra figuren ser man at kapillærporene som sagt oppstår ved v/c-tall på 0,4, og mengden øker kraftig med økende v/c-tall. Økende v/c-tall vil altså gi høyere porøsitet, og minke faststoffandelen. Dette vil føre til en stadig mer glissen struktur i den herdede pastaen, gjøre at fastheten synker og at tettheten raskt avtar med økende v/c-tall. [6]



Figur 1: Forhold mellom fast stoff og ulike porer i herdet sementpasta med varierende v/c-tall [6]

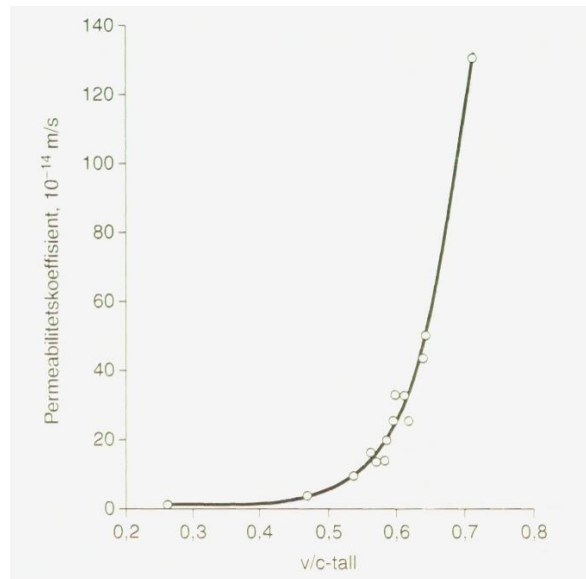
Dersom v/c-tallet er mindre enn 0,4, er det for lite vann til at all sementen vil reagere. Dette er derimot ikke noe problem ettersom det bare vil resultere i et mindre porevolum, og de sementkornene som ikke har reagert kjemisk, vil fungere som et sterkt og godt fyllstoff. [6]

Figur 1 viser også nok en poretype kalt kontraksjonsporer. Dette er porer som kommer av at reaksjonsproduktene mellom vann og sement har et litt mindre volum enn summen av utgangsmaterialene. Det ytre volumet holder seg uendret, slik at denne volumreduksjonen framkommer som jevnt fordelte porer i den herdede sementpastaen. Slike kontraksjonsporer er relativt store og oppfattes som en del av kapillærporesystemet. Ettersom disse porene er et resultat av sementhydratisering, vil poremengden styres av hydratiseringsgraden. Det samme gjelder også for gelporemengden. [6]

I tillegg til disse poretypene som stammer fra hydratiseringsreaksjonen, vil betongen også utvikle porer eller åpninger på grunn av dårlig komprimering og sprekker forårsaket av for eksempel blødning/separasjon, uttørkningssvinn, temperatursprekker, frost, overbelastning og omdanninger.

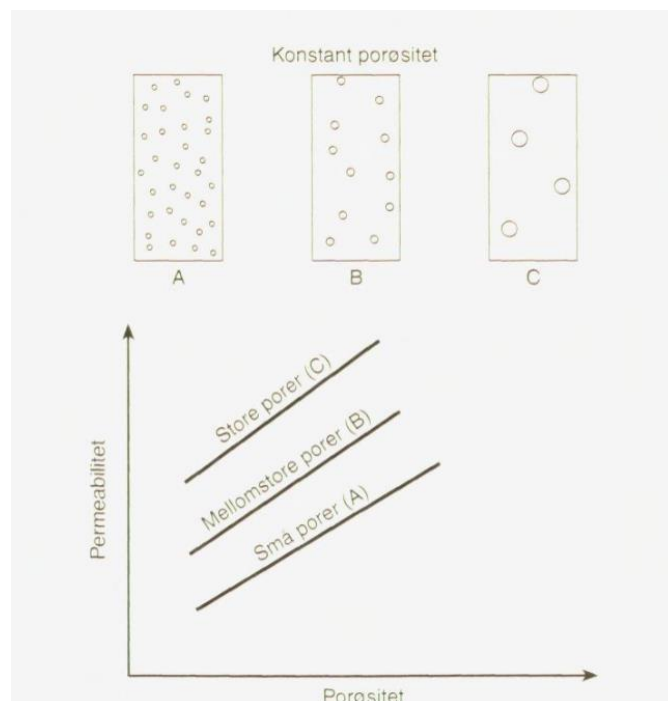
Betongens bestandighet, som vil si dens evne til å motstå nedbryting, avhenger i stor grad av betongens permeabilitet, som går ut på betongens evne til å lede gasser og væsker. Alle nedbrytingsmekanismer i betong innebærer væsker og gasser, slik at betongens porøsitet, poretype og strukturelle oppbygning er svært viktig for betongens bestandighet. Det vil si at jo lavere permeabiliteten er, desto bedre motstand mot nedbryting vil betongen ha. [6]

Poretype og poremengde i betongen har vesentlig betydning for dens permeabilitet. Som sagt vil økende v/c-tall føre til økt mengde kapillærporer som naturligvis vil gjøre betongen mindre tett. *Figur 2* viser hvordan denne økningen påvirker betongens permeabilitet. Ved et v/c-tall på under 0,4 vil det være liten eller ingen vanngjennomgang. Pastaen vil da kun bestå av gelporer, som er såpass små at de ikke bidrar noe særlig til vanngjennomgang. Ved et v/c-tall høyere enn 0,4 derimot, vil betongen utvikle større kapillærporer som ifølge figuren vil gjøre at permeabiliteten vil øke jevnt fra v/c=0,4 til 0,5, og deretter øke kraftig med økt v/c-tall.



Figur 2: Sammenheng mellom v/c-tall og permeabilitet [6]

Porestørrelse vil også ha stor betydning for permeabiliteten. Figur 3 viser at betong med samme porevolum, men med forskjellige porestørrelser, vil ha betydelig høyere vanngjennomgang jo større porene er.



Figur 3: Sammenheng mellom betongens permeabilitet og poretyper [6]

Svinn, plastisk svinn, plastisk setninger, temperaturforskjeller og overbelastning kan også føre til sprekker og øke permeabiliteten kraftig. Derfor er det viktig å prøve å redusere dette mest mulig. Svinn vil i større eller mindre grad oppstå uansett, men ved hjelp av armering kan man fordele svinn til konstruksjonen i mange små riss istedenfor få og store sprekker. Ved å gjøre rissene mindre enn en viss størrelse, vil vanngjennomgangen og permeabiliteten reduseres betydelig. [6]

Betongens støpbarhet og kvalitet på utstøpingen er også avgjørende for permeabiliteten. Ufullstendig komprimering, separasjon og feil utstøping vil gi en inhomogen betong, setningsprekker og store innesluttede luftflommer. En porøs betong vil i seg selv gi rask nedbrytningshastighet, men store grove sprekker og overflateporer vil gi enda raskere vei for væsker og gasser inn i betongen. Dette kan for eksempel føre til at armering svært raskt blir utsatt for aggressive stoffer. [6]

2.6 Riss

Ved støping og herding av betong kan det oppstå flere nedbrytningsmekanismer, både i løpet av den ferske fasen samt herde fasen. Disse kan føre til volumendring og dannelse av sprekker og riss i betongen, og med det redusere betongens kvalitet.

2.6.1 Risstendens i Fersk Fase

2.6.1.1 Plastisk Svinn

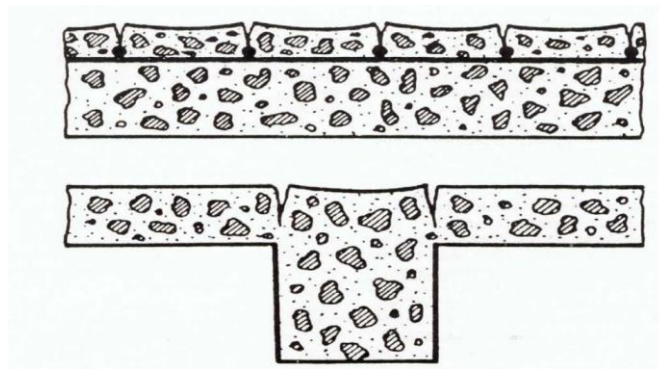
Hovedårsaken til opprissing under den ferske fasen kommer av plastisk- svinn. Plastisk svinn skyldes at vann i betongen fordamper og gir en etterfølgende uttørking av betongoverflaten. Når overflaten blir tørr utvikles det kapillær strekkspenning i betongens porevann som vil gi en sammentrekning i massen. Plastisk svinn kan føre til meget grove riss, opptil 1-2 mm, ofte med helt uregelmessig rissmønster. [6] [10]

Faktorer som øker risikoen for plastiske svinnriss er høy dosering av silikastøv, høy finstoffmengde i betongen, lave v/c-tall og uttørkingshastigheten. Jo raskere betongoverflaten tørker ut, desto større er risikoen for at betongen får opprissing. Kritiske værforhold som kan føre til plastisk svinn vil være både solskinn og vind på sommerstid, og tørr vinterluft mot varm betong. [6]

Tiltak som kan gjøres for å forhindre plastisk svinn handler i stor grad om å redusere vannmengden som fordampes fra overflaten de første timene etter støping. Det kan for eksempel gjøres ved å tilføre vann på betongoverflaten, tildekke betongen med herdemembran eller plast. [11]

2.6.1.2 Plastisk Setning

Plastisk setning skyldes forskjell i densitet mellom de solide partiklene og vann i den ferske betongen. Dette vil føre til at partiklene vil bevege seg nedover mens vannet vil bevege seg oppover (eller holde seg i samme posisjon) i betongmassen. Dette fenomenet med at vannet blir samlet på betongoverflaten kalles for *bleeding*. Ved bleeding vil betongmassen senkes litt og dersom betongen er hindret lokalt, for eksempel av armering, vil det skape spenninger som kan føre til sprekker. [11]



Figur 4: Plastisk setningsriss hos betong med og uten armering [11]

En ustabil betong med tanke på luftinnhold, vil resultere i at luftbobler vil stige oppover og ut av betongen, noe som vil bidra til setninger. I tillegg vil fordamping av vann fra betongoverflaten, plastisk- og autogent svinn bidra til slike setningsriss. [11]

Tiltak for å forhindre plastiske setninger vil være tidlig dekking av betongoverflaten, utstøping lag for lag og med så lav stighastighet at betongen får tid til å sette seg eller revibrere betongen sent i størkningsfasen. [6] [11]

2.6.2 Risstendens i Herdefasen

2.6.2.1 Autogent Svinn

For betonger med relativt lavt v/c-tall, vil autogent svinn kunne bidra til riss i betong under herding. Når vann og sement blandes, vil det dannes solide materialer. Med dette vil det oppstå noe tap av volum ettersom reaksjonsproduktene (solide materialer) har mindre volum enn reaktantene (sement+vann). Det antas at under hydratisering vil den reagerende sementen beholde sitt originale volum, mens det kjemisk bundet vannet vil miste rundt 25,4% av sitt opprinnelige volum. Dette fenomenet kalles for kjemisk svinn og er en grunnleggende faktor innen sementhydratisering som vil føre til dannelse av porer i betongen. Inne i disse porene vil porevann og uhydratisert sement fortsette å reagere selv om betongen har herdet. [11] [12]

Det vil si at kjemisk svinn vil foregå helt fra blandedprosessen og fortsette så lenge sementreaksjonen skjer i betongen, altså i flere måneder. Autogent svinn vil si den ytre effekten av dette kjemiske svinnet. Prosessen ved kjemisk svinn kan føre til selvuttørking, som vil si at porevannet nesten tømmes, slik at betongens relative fuktighet blir redusert. Ved selvuttørking oppstår det kapillærkrefter og undertrykk i porevannet som vil overføres til faste deler av betongen og resultere i bulksammentrekninger. Dersom betongen er fastholdt, vil kjemisk- og autogent svinn føre til strekkspenninger og dannelse av sprekker i betongen. [11]

2.6.2.2 Termisk riss

Betong vil som alle andre materialer utvide seg ved oppvarming og trekke seg sammen ved avkjøling. Dersom noe holder igjen betongkonstruksjonen ved en slik temperaturkontraksjon, vil det oppstå strekkspenninger i betongen som kan føre til riss og sprekker. [6]

Slik termisk utvidelse forårsaket av temperaturendringer kan bestemmes ved hjelp av følgende ligning:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T$$

Hvor:

ε_T er termisk utvidelse

α_T er termisk utvidelseskoeffisient (ofte brukt $\alpha_T = 10 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ for betong)

ΔT er temperaturendring

[11]

Under hydratiseringsreaksjonen mellom sement og vann blir det utviklet varme. Denne varmemengden avhenger av sementinnholdet, eventuelle pozzolaner og av v/c-tallet. Varmeutviklingen for en «vanlig» betong regnes å være ca. 0.14–0.15 °C per kg sement når all varme blir lagret i betongen. Ved massive konstruksjoner kan da temperaturen bli svært høy, rundt 70–80 °C. Grunnen til at betongen sprekker opp er ikke den høye temperaturen i seg selv, men temperaturforskjeller og fastholding ved temperaturbevegelsene. Denne fastholdingen kan skyldes to ulike fenomener, indre- og ytre fastholding. [6]

Indre fastholding kommer av at betongen under varmeutvikling vil alltid være varmest i kjernen, mens betongoverflaten vil alltid bli avkjølt i større eller mindre grad. Det fører til at overflaten utvider seg mindre enn den varme kjernen, og holdes igjen av denne. Fersk betong tåler lite strekk, dette kan føre til at betongen sprekker opp i overflaten. Men ettersom at slike riss oppstår i oppvarmingsfasen og vil lukke seg igjen ved nedkjøling, vil normalt sett dette ikke være noe stort problem. [6]

Ytre fastholding vil for eksempel oppstå dersom man støper imot en eksisterende vegg, et dekke eller et fundament. Da vil den herdnede betongen først utvikle varme, slik at den nystøpte konstruksjonen vil utvide seg. Når den så avkjøles, vil den forsøke å trekke seg sammen, men den eksisterende konstruksjonen vil holde den igjen, og resultere i oppsprekking. [6]

I tillegg til temperaturforskjeller, vil termisk riss også avhenge av:

- Tidspunktet sprekkspenningene dannes. Jo tidligere i herdefasen strekkspenningene oppstår, desto mindre vil betongen tåle av strekk.
- Avkjølingshastighet. Dersom betongen avkjøles langsomt vil spenningene bygge seg opp over lengre tid, og dermed redusere oppsprekking.
- Utforming av konstruksjonen.

[6]

Vanlige metoder for å unngå termisk riss er å:

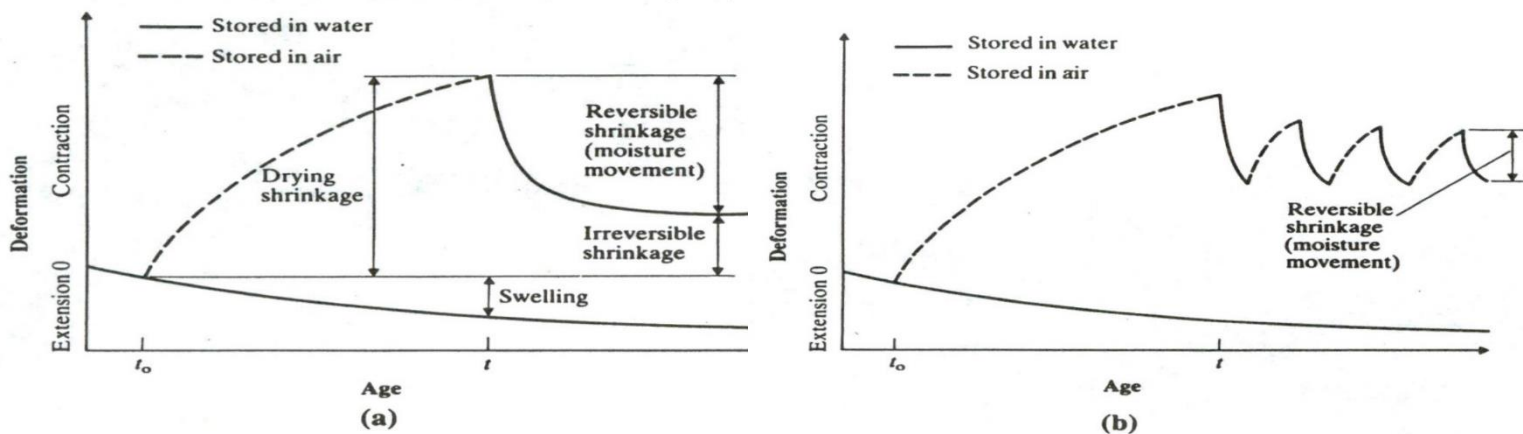
- Bruke kald betong.
- Bruke mindre sement, eventuelt sement med lavere varmeutvikling, for å redusere temperaturøkningen i betongen.
- Dekke til overflaten med presenning eller isolasjon etter avforming.

- Ikke vanne den varme betongen med kaldt vann.
- Varme opp kalde konstruksjonsdeler før man støper ny betong inntil.

[6]

2.6.2.3 Uttørkningsvinn

Herdet betong som er utsatt for luft vil tørke ut og utvikle det vi kaller for uttørkningsvinn. Dette går ut på samme prinsipp som for plastisk svinn, ved at det drives av kapillære strekkspenninger og undertrykk i porevannet ettersom vann fordampes fra betongoverflaten. Uttørkningsvinn består av en reversibel og en irreversibel del. Ved fuktighetsendringer inn og ut av betongen vil normalt betongen krympe ved uttørking og svelle opp igjen ved økt fuktighet. Som vist i *Figur 5* vil kun en del av uttørkningsvinnnet være reversibelt (ca. 40 – 70%), og det er ved den første uttørkingen at det irreversible svinnet er størst. [11] [13]



Figur 5: Svinn og oppsvelling i betong ved uttørking og fukting [11]

Uttørkningsvinn vil øke med mengden sementpasta i betongen og med økende v/c-tall. Vann/sement- reaksjonen vil gi gelmasse, og det er denne som svinner, det gjør at jo mer gelmasse i betongen, desto større er svinnpotensialet. Økende v/c-tall vil også føre til mer kappilærporer, og dreneringen av gelporer vil bli mer omfattende, slik at gelporene lettere tørker ut. Dette vil da gi økt svinn. [6]

For å redusere uttørkningsvinn er det viktig å holde betongen våt etter utstøping. Jo lengre dette gjøres, desto lengre tid vil det ta før betongen får sjanse til å tørke ut, og det totale svinnet vil da reduseres. [6]

2.7 Miljøvennlig Betong

De siste årene er det blitt satt stort fokus på å gjøre byggebransjen mer klimavennlig. Dette har ført til flere klimasmarte bygløsninger som har bidratt til et lavere ressursbruk og langt mindre klimagassutslipp enn tidligere. Utslippet knyttet til betong skyldes hovedsakelig produksjonen av sement, og sementfabrikkene for det norske markedet har derfor gjennom mange år gjort grep for å kutte utslipp fra sin produksjon. Hovedgrepene som er gjort i sement- og betongindustrien er som følger:

- Bruk av alternative råmaterialer, for eksempel andre industrielle avfallsprodukter utgjør en større del av produktmiksen
- Erstatte fossile brensler med alternative brensler
- Standardisering av Lavkarbonbetonger
- Økt kunnskap om design og bygging som har ført til mer klimasmart bygging med betong

[14]

2.7.1 Lavkarbonbetong

Lavkarbonbetong vil si konstruksjonsbetong hvor det er blitt gjort tiltak for å begrense klimagassutslippet. Utslippet blir i denne sammenhengen definert og målsatt etter CO₂ – ekvivalenter, der bidraget fra andre gasser er vektet i henhold til GWP (Global Warming Potential). [15]

Norsk Betongforening Publikasjon 37 har definert klassegrenser for klimagassutslipp og delt konstruksjonsbetong, som er produsert etter reglene i NS-EN 206 +NA, opp i fire ulike nivåer av lavkarbonbetong:

- Lavkarbon B
 - o Kan vanligvis oppnås med ordinære resepttekniske tiltak
- Lavkarbon A
 - o Krever som regel bruk av spesielle resepttekniske tiltak
- Lavkarbon Pluss og Lavkarbon Ekstrem
 - o Krever bruk av spesielle bindemidler, med flere begrensninger i standardverket og ikke allment tilgjengelighet

[15]

Tabell 1 viser lavkarbonklassenes grenseverdier for deklarererte klimagassutslipp for de ulike fasthetsklassene B20-B65. Utslippet er oppgitt per 1 m³ og dekker hele livsløpet fra råvareuttak til den ferdigblandede betongen forlater blandeverket. Bransjereferansen som også er oppgitt i tabellen er norske generiske verdier, innhentet i 2019. Dette kan brukes til å få en oversikt over besparelser i klimagassutslipp som er mulig ved hjelp av lavkarbonbetong.

Tabell 1: Lavkarbonklasser med grenseverdier for klimagassutslipp [15]

Fasthetsklasse ¹⁾ og lavkarbonklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65
Maksimalt tillatt klimagassutslipp [kg CO ₂ -ekv. pr m ³ betong]							
Bransjereferanse	240	260	280	330	360	370	380
Lavkarbon B	190	210	230	280	290	300	310
Lavkarbon A	170	180	200	210	220	230	240
Lavkarbon Pluss ²⁾			150	160	170	180	190
Lavkarbon Ekstrem ²⁾			110	120	130	140	150

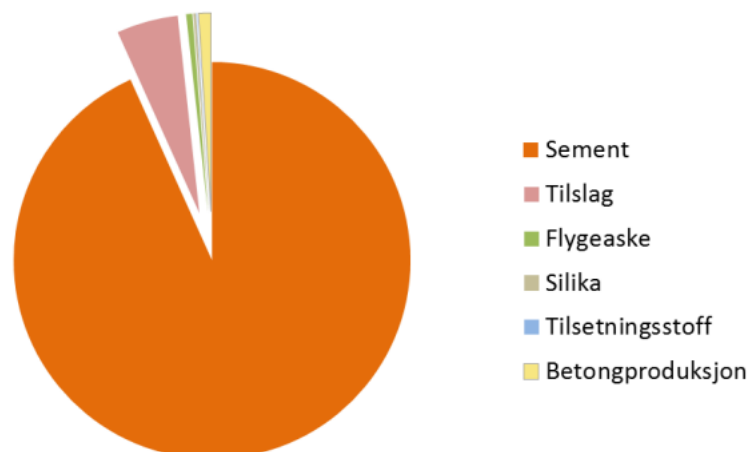
Grenseverdiene for Lavkarbon A er satt slik at de representerer det som er praktisk mulig å oppnå for konstruksjonsbetong, med de bindemidlene som er allment tilgjengelig på det norske markedet i dag. I tillegg vil det være nødvendig å utnytte tradisjonelle proporsjoneringsstekniske virkemidler for å holde bindemiddelmengden nede. Det vil si at det kan være nødvendig å bruke relativt mye grovt tilslag. Betong med mye sand og lite stein, også kalt «reduerte betongsammensetinger», har normalt et høyere bindemiddelvolum og dermed et dårligere utgangspunkt for å tilfredsstille grenseverdiene for Lavkarbon A. [15]

Lavkarbon Pluss og Lavkarbon Ekstrem kan kun oppnås ved bruk av spesielle sementtyper, eller ved tilsetning av store mengder flygeaske eller slagg, gjerne i kombinasjon med store mengder silikastøv. Grenseverdien for Lavkarbon Pluss er satt slik at den i praksis representerer lavest mulig klimagassnivå ved bruk av flygeaske som tilsetningsmateriale etter

rammene gitt i NS-EN 206+NA. Grenseverdiene for Lavkarbon Ekstrem er satt slik at det representerer det nivået som i praksis er oppnåelig ved bruk av sementtyper med høyt slagginnhold eller ved bruk av slagg som tilsetningsmateriale. [15]

2.7.2 Betongens Totale Klimagassutslipp

Figur 6 nedenfor viser grovt hvor mye hvert delmateriale i en konstruksjonsbetong bidrar til karbonregnskapet ved produksjon, og viser at sementen står for mer enn 90 % av betongens samlede klimagassutslipp. Eksempelet er fra en B30 M60 betong produsert av NorBetong i Oslo, og bidraget fra transport av materialer fram til blandeverk er også tatt med for hvert enkelt materiale. Tilslaget som står for mesteparten av det resterende utslippet skyldes energiforbruket ved knusing og oppredning av berg eller naturgrus til tilslag, og transport. [15]



Figur 6: Klimagassutslipp knyttet til de ulike delmaterialene i en typisk konstruksjonsbetong (NorBetong B30 M60) [15]

2.7.2.1 Sementens Klimagassutslipp

Portland sement er den mest brukte sementtypen i betongproduksjon over hele verden. Det produseres ved at kalkstein og mindre mengder kvarts, aluminiumoksid og jernoksid knuses til pulver før det brennes i en sementovn ved ca. 1400°C. Kalkstein består hovedsakelig av kalsiumkarbonat (CaCO_3), som under brenning vil føre til en kjemisk prosess kalt «kalsinering» hvor CO_2 blir spaltet av og gir kalk (CaO). Denne kalken smelter så sammen med de andre mineralene til råproduktet fra sementovnen, såkalt sementklinker. Sementovnen fyres med fossilt brennstoff, noe som i svært stor grad også bidrar til utslipp av CO_2 og andre klimagasser fra sementproduksjon. [15]

Etter nedkjøling males sementklinkeren sammen med gips til ferdig sement. Dette utføres i store møller og er en energikrevende prosess som ytterligere bidrar til karbonregnskapet. Ren portlandsement som produseres i Norge har et totalt klimagassutslipp på ca. 750 kg CO₂-ekvivalenter per tonn sement levert fra fabrikk. Rundt 60 % av dette skyldes kalsinering. Norge har derimot et nokså moderat utslipp sammenlignet med det globale utslippet, hvor det i flere land fortsatt ikke er uvanlig å ha et klimagassutslipp på mer enn 900 kg CO₂-ekvivalenter per tonn portlandsement. [15]

Produksjon av sement står for 5-8 % av de samlede menneskeskapte klimagassutslippene i verden. Den vestlige verden, spesielt Nord-Europa, har derimot de siste 10-20 årene gjort en stor innsats for å redusere dette energiforbruket ved sementproduksjonen. Noen typiske tiltak er bruk av alternativt brennstoff basert på avfall, og varmegjenvinning fra ovnene. [15]

2.7.2.2 Tilsetningsmaterialer

Ved sementproduksjon er det ikke mulig å redusere utslippet fra selve kalsineringsprosessen fra kalkstein. Det er derimot mulig å redusere mengden sementklinker ved bruk av tilsetnings-/erstatnings- materialer som har gode bindemiddelegenskaper i tillegg til at de har mye mindre klimagassutslipp enn sementklinker. Pozzolaner og hydrauliske bindemidler, også kalt type II tilsetningsmaterialer, er eksempler på dette. Begge disse typene av tilsetningsmaterialer vil i praksis kun fungere som bindemiddel ved kombinasjon med portlandsement. Sementen må altså alltid inneholde en viss mengde sementklinker.

Typiske pozzolaner:

- Flygeaske (restprodukt fra kullfyrte kraftverk)
- Silikastøv (kondensert røykgass fra produksjon av ferrosilisium- eller silisiummetall)

Typisk hydraulisk bindemiddel:

- Slagg (normalt masovnslag fra råjernproduksjon)

[15]

Alle de nevnte tilsetningsmaterialene ovenfor er restprodukter fra industri som i seg selv er kilder til store klimagassutslipp. Per dags dato knyttes klimagassutslipp alltid til hovedproduktene, mens restproduktene regnes som energi- og karbonnøytrale. Derfor vil ikke

tilsetningsmaterialene bidra noe til sementens karbonregnskap. I fremtiden kan det tenkes at politiske beslutninger kan gjøre at noe av klimagassutslippet overføres fra hovedproduktene til restproduktene, noe som vil ha store konsekvenser for bruk av tilsetningsmaterialer i sement- og betongindustrien. [15]

Silikastøv er et meget effektivt tilsetningsmaterial, som ifølge NS-EN 206+NA gjør det mulig å regne med en silikastøvmengde på inntil 11 % av den totale mengden bindemiddel ved beregning av betongens masseforhold vann/bindemiddel. Silikastøv kan altså kun gi et begrenset bidrag med tanke på reduksjon av klimagasser. [15]

Flygeaske er et mindre effektivt bindemiddel, men kan brukes i større mengder. Ifølge NS-EN 206+NA kan man regne med inntil 35 % flygeaske av den totale mengden bindemiddel ved beregning av betongens masseforhold vann/bindemiddel. Norcem bruker flygeaske i flere av sine sementer, og den mest brukte sementen, Norcem Standardsement FA, har et flygeaskeinnhold på rundt 18 %. Denne sementtypen har med det et klimagassutslipp på ca. 600 kg CO₂-ekvivalenter per tonn sement levert fra fabrikken i Brevik. Det tilsvarer 150 kg mindre enn deres rene portlandsement, Norcem Industrisement. [15]

Kalksteinsmel er et inert materiale, som vil si at det ikke gir noen bindemiddeleffekt i seg selv. Derimot vil det å kombinere små mengder kalksteinsmel med flygeaske gi en bedre utnyttelse av flygeasken. Norcem Standardsement FA inneholder for eksempel 4 % kalksteinsmel, noe som bidrar til reduksjon i klimagassutslippet per tonn sement produsert. [15]

Slagg kan tilsettes sement i store mengder og har med det et stort potensial som miljøtiltak. NS-EN 206+NA gir bruksregler for sementer med slagginnhold på opptil 80 %. Både Norcem og Schwenk er eksempler på produsenter av slaggsement som leveres til oss i Norge. Schwenk Miljøsement inneholder ca. 30% slagg og har et klimagassutslipp på ca. 570 kg CO₂-ekvivalenter per tonn sement. Ulempen med slagg er at det på verdensbasis ikke finnes tilstrekkelige mengder til at det kan brukes på generell basis. [15]

2.7.3 Levetidsbetraktninger

Et viktig element når det kommer til bruk av miljøbetong er konstruksjonens levetid. Det er fullt mulig å gjøre tiltak som reduserer betongens karbonregnskap i stor grad, men som samtidig kan svekke betongens bestandighetsegenskaper, og dermed også forkorte konstruksjonens levetid. Dette kan føre til at konstruksjonen enten må rives og erstattes, eller må gjennomgå omfattende rehabilitering tidligere enn antatt, noe som vil gi en negativ miljøeffekt. [15]

For å forhindre dette har betongstandardene satt minimumskrav til materialsammensetningen, og til overdekningen, som vil si den minste betongtykkelsen fra armeringsstålet til betongoverflaten. Disse kravene er tilpasset de egenskapene som tilsetningsmaterialene tilfører betongen. [15]

Bruk av flygeaske eller slagg i sement vil som sagt redusere klimagassutslippet, men det vil i tillegg normalt gi betongen dårligere motstand mot karbonatisering. Tilsetningsmaterialene øker altså faren for armeringskorrosjon i løpet av prosjektert levetid. NS-EN 206+NA forhindrer derimot dette problemet ved å sette krav om at sementer i konstruksjoner som er utsatt for karbonatisering må bruke et litt lavere masseforhold enn om betongen var basert på ren portlandsement. Lavere masseforhold vil øke betongens tetthet og vil kunne gi konstruksjonen den ønskede levetiden. Ulempen med bruk av slike sementer i betong utsatt for karbonatisering er at en reduksjon av masseforholdet også vil gi økt sementforbruk, og vil dermed i realiteten svekke det positive bidraget til karbonregnskapet. [15]

Flyge- og slaggsementer bidrar derimot positivt til betongens motstand mot kloridinntrengning og kjemisk nedbrytning. NS-EN 206+NA krever dermed ikke noe spesielle tiltak for å opprettholde bestandigheten ved bruk av slik type sement i betongkonstruksjoner utsatt for kloridholdige eller kjemisk aggressive miljøer. [15]

2.7.4 EPD

Økt fokus på hvordan produkter, tjenester, forbruk og annet påvirker miljøet, har ført til et behov for å dokumentere og deklare produkter og tjenester på en standardisert, enkel, objektiv og sammenlignbar måte. EPD-er har med det blitt utviklet for å tilfredsstille dette behovet. EPD står for *Environmental Product Declaration* og er standardiserte

miljødeklarasjoner, som vil si et kortfattet dokument som oppsummerer miljøprofilen til en komponent, et ferdig produkt eller en tjeneste. En EPD bygger på livsløpsvurderinger av miljødata fra råvareuttak, produksjon, bruksfase og avhandling. [15]

EPD-ene er delt inn fire forskjellige indikatorer for sementens GWP: *GWP Total*, *GWP Fossil*, *GWP Biogenic* og *GWP Luluc*. GWP står for *Globalt Oppvarmingspotensial* og er en målenhet som angir klimagassenes akkumulert oppvarmingseffekt i forhold til CO₂ over et valgt tidsrom. Normalt brukes det en tidshorison på 100 år og enhetene omtales som CO₂-ekvivalenter. De ulike indikatorene blir etter LCA.no beskrevet på følgende måte:

- «*GWP Total – Summen av Fossil, Biogenic og Luluc*».
- «*GWP Fossil – tar hensyn til GWP for klimagassutslipp og binding i alle medier som følge av oksidasjon eller reduksjon av fossilt brensel eller fossile karbonholdige stoffer (f.eks. Forbrenning, deponi, etc.). Denne indikatoren inkluderer også binding eller utslipp av klimagasser i uorganiske materialer (f.eks. Kalsinering, karbonering av sement- eller kalkbaserte byggematerialer)*».
- «*GWP Biogenic – biogent CO₂ lagret I produktet/materialet. Det vil si mengden CO₂ som absorberes fra atmosfæren under veksten av biomasse og bindes over materialets levetid, samt biogent utslipp til luft gjennom oksidasjon eller nedbrytning av biomasse (f.eks. forbrenning)*».
- «*GWP Luluc – Landbruk og landbruksendringer. indikator for klimagassutslipp og bindinger (CO₂, CO og CH₄) som oppstår i forbindelse med endringer i spesifisert karbonlager som følge av arealbruk og arealbruksendring*».

[16]

Disse indikatorene er i tillegg delt inn i 4 systemgrenser (A1-A4), som dekker klimagassutslippet under hele produksjonsprosessen til materialet:

- A1 – *Fremstilling av råvarer*. Utslipp fra produksjon av materialets råvarer (som f.eks.. kalkstein, flygeaske, gips og slagg).

- A2 – *Transport av råvarer til fabrikk.* Utslipp knyttet til transport av råvarene til råmølle eller sementmølle.
- A3 – *Produksjon av betongen.* Utslipp fra tilvirkning av råmaterialene i råmølle, ovn eller sementmølle.
- A4 – *Utslipp knyttet til transport av sementen til markedet.*

2.7.5 Regional Tilgjengelighet av Lavkarbonbetong

Betongens klimagassutslipp og hvilke lavkarbonklasse som vil være oppnåelig avhenger i stor grad geografisk plassering og parametere som:

- Tilgjengelige bindemiddeltyper
- Medgått bindemiddelmengde ved bruk av lokale tilslag
- Transport av råvarer til betongfabrikk

En hovedregel er derfor alltid å forhøre seg med betongleverandøren i det aktuelle området før man spesifiserer krav til klimagassutslipp. [15]

2.7.5.1 Tilgjengelig Bindemiddeltyper

En utslagsgivende faktor for betongens klimagassutslipp er tilgjengeligheten på bindemidler med lavt klimagassutslipp. I dag er bindemidler med særlig lavt klimagassutslipp kun tilgjengelig langs kysten i Sør-Norge. Ved forespørsel er det mulig å levere langs resten av kysten nordover, men på grunn av begrenset lagerkapasitet vil dette ofte bare være aktuelt for større prosjekter. *Tabell 2-4* viser en oversikt over de ulike sementproduktene som per dags dato er tilgjengelige på det norske markedet, og i hvilke områder de er tilgjengelige [15]

Tabell 2: Tilgjengelighet av sementer produsert av Aalborg Portland [15]

Produktnavn	Aalborg Hvitsement ^d	Aalborg Rapitsement ^f
Produsent	Aalborg Portland	Aalborg Portland
Type iht. NS-EN 197-1:2011	CEM I 52,5 R	CEM I 52,5N
CO ₂ utslipp (GWP, A1-A4) (kgCO ₂ -ekv/tn) ^a	1100 ^b	871
Produksjonssted	Aalborg, Danmark	Aalborg, Danmark
Leveringsstatus	Prosjektsement ^e	Ordinært produkt
Tilgjengelighet ^c	^c	Østlandet ^f
Normal anvendelse	Bygg/Element	Bygg/Anlegg
Bestandighetsklasser iht. NS-EN 206+NA	Alle	Alle

- a) A4 representerer transport til lokal silo i Norge
 b) A1-A3. Transport til Norge blir gjennomført på ulike måter og kommer i tillegg til 1100 kg CO₂-ekv/tn. Data per juni 2019.
 c) Sementprodusent må kontaktes for lokalisering av silostasjonene.
 d) Norcem forhandler Aalborg Hvitsement i Norge.
 e) Betongprodusent må kontaktes for hvert enkelt prosjekt for mulig leveranse.
 f) Aalborg Rapid seiment brukes kun av betongprodusenten Unicon i Østlandsområdet. Ved å kombinere Aalborg Rapid og flygeaske kan Unicon tilby lavkarbonbetong. I andre deler av landet bruker Unicon Norcem sementer.

Tabell 3: Tilgjengelighet av sementer produsert av Schwenk [15]

Produktnavn	Hvitsement	Lavvarmesement	Miljøsement	Rapitsement
Produsent	Schwenk	Schwenk	Schwenk	Schwenk
Type iht. NS-EN 197-1:2011 /9/	CEM I 52,5 R	Cem III/B 42,5 L-LH/SR (na)	Cem II/B-S 52,5 N	Cem I 52,5 R (ft)
CO ₂ utslipp (GWP, A1-A4) (kgCO ₂ -ekv/tn) ^a	1240	347	570	799
Produksjonssted	Bunol, Spania	Eisenhüttenstadt, Tyskland	Rüdersdorf, Tyskland	Rudersdorf, Tyskland
Leveringsstatus	Ordinært produkt	Ordinært produkt	Ordinært produkt	Ordinært produkt
Tilgjengelighet ^b	^b	Østlandet og Vestlandet	Østlandet og Vestlandet	Østlandet og Vestlandet
Normal anvendelse	Bygg/Element	Anlegg	Alt	Bygg/Element
Bestandighetsklasser iht. NS-EN 206+NA	Alle	M40, M45, M60, M90	Alle	Alle

- a) A4 representerer transport til silo i Oslo. Data per juni 2019
 b) Sementprodusent må kontaktes for lokalisering av silostasjonene.

Tabell 4: Tilgjengelighet av sementer produsert av Norcem [15]

Produktnavn	Norcem Anleggsement FA	Norcem Industrisement	Norcem Industrisement	Norcem Lavkarbonsement	Norcem Standardsement FA	Norcem Standardsement FA	Flygeaske
Produsent	Norcem	Norcem	Norcem	Norcem	Norcem	Norcem	Norcem ^d
Type iht. NS-EN 197-1:2011	CEM II/A-V 42,5N	CEM I 52,5R	CEM I 52,5R	CEM II/B-V 42,5N	CEM II/B-M 42,5R	CEM II/B-M 42,5R	NS-EN 450-1:2012 Category A
CO ₂ utslipp (GWP, A1-A3) (kgCO ₂ -ekv/tn) ^a	637	748	774	503	604	625	-
Produksjonssted	Brevik, Norge	Brevik, Norge	Kjøpsvik, Norge	Brevik, Norge	Brevik, Norge	Kjøpsvik, Norge	Hamburg, Tyskland
Leveringsstatus	Ordinært produkt	Ordinært produkt	Ordinært produkt	Prosjektsement ^c	Ordinært produkt	Ordinært produkt	Ordinært produkt
Tilgjengelighet ^b	Hele landet	Østlandet Sørlandet Sør-Vestlandet	Nord-Vestlandet Midt-Norge Nord-Norge	^b	Østlandet Sørlandet Sør-Vestlandet	Nord-Vestlandet Midt-Norge Nord-Norge	Hele landet
Normal anvendelse	Anlegg	Bygg/Element	Bygg/Element	Bygg/Element	Alt	Alt	Alt
Bestandighetsklasser iht. NS-EN206+NA	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle

- a) Fra silo på fabrikk i hhv. Brevik og Kjøpsvik. Data per juni 2019
 b) Sementprodusent må kontaktes for lokalisering av silostasjonene.
 c) Betongprodusent må kontaktes for hvert enkelt prosjekt for mulig leveranse.
 d) Flygeaske som selges til sement- og betongproduksjon. Leveres fra silo på Slemmestad og Kjøpsvik.

2.7.5.2 Tilgjengelig Tilslag

Nødvendig bindemiddelvolum for å oppnå en ønskelig støpelighet bestemmes i høy grad av tilslagetts egenskaper. Etter at nødvendig bindemiddelsammensetning er gitt, bestemmer altså tilslaget betongens sementinnhold, og dermed også klimagassutslippet. Generelt gir tilslag fra Nord-Norge, Midt-Norge og det indre Østlandet større bindemiddelvolum enn ellers i landet. [15]

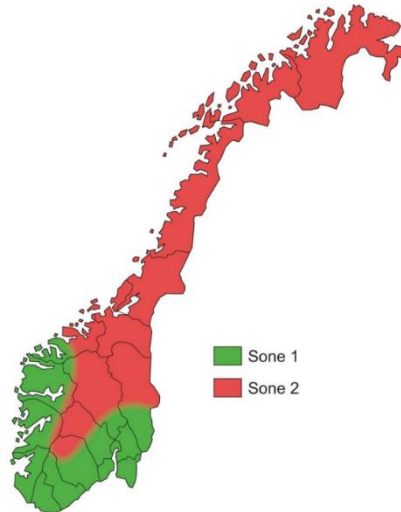
2.7.5.3 Råvaretransport

Transport av delmaterialene til betongen inngår også i karbonregnskapet. Klimagassutslippet til den ferdige betongen påvirkes av blant annet betongfabrikkens beliggenhet, transportform (bil, båt), råmaterialenes opphavssted og plassering av silo for bindemidler. Dette gjør at betongen i Innlands-Norge og Nord-Norge typisk vil ha råvaretransport med vesentlig høyere klimagassutslippet. [15]

2.7.5.4 Regionale Variasjoner

Hva som er mulig å oppnå i klimagassutslipp for ulike betongtyper varierer som sagt fra region til region på grunn av variasjoner i tilgjengelig bindemiddel, tilsetningsegenskaper og transportforhold.

Figur 7 viser grovt tilgjengeligheten til lavkarbonbetong. Norge deles inn i to soner som illustrerer betongens typiske klimagassutslipp i et område basert på summen av tilgjengelighet av bindemidler, tilslagskvalitet og transport. Sonene er ikke absolutte, men kun en indikasjon. Sone 1 består av områder rundt byene Oslo, Bergen og Stavanger, og det er per dags dato kun i dette området som har ordinær tilgang til bindemiddel for å kunne produsere Lavkarbon Ekstrem. Sone 2 utgjør resten av Norge hvor betongen ofte produseres med tilslag som gir større bindemiddelvolum enn gjennomsnittet, i tillegg til at i store deler av sonen vil transportavstander for sementen føre til høyere klimagassutslipp for betong produsert i denne sonen. [15]



Figur 7: Regionale tilgjengelighet av lavkarbonbetong. Enklere å produsere lavkarbonbetong i sone 1 enn i sone 2 [15]

Det at lavkarbonbetong er enklere å oppnå i sone 1 gjør at slike betongtyper kan brukes med større fleksibilitet, ettersom flere betongfabrikker vil kunne klare å levere for eksempel betong med redusert steinstørrelse og selvkomprimerende-resepter innenfor de aktuelle lavkarbonklassenes grenseverdier. I sone 2 vil det normalt være nødvendig med større tiltak for å komme innenfor grenseverdien, noe som ofte vil påvirke betongens ferske og herdede egenskaper. Det kan også være nødvendig med enda sterkere tiltak, som kan gjøre det vanskelig å fortsatt tilfredsstille reglene satt i NS-EN 206+NA. Når det er sagt, kan situasjonen endres dersom miljøvennlige bindemidler gjøres tilgjengelige i nye områder, så det er viktig å undersøke med den aktuelle betongleverandøren. [15]

2.7.6 Tekniske Egenskaper ved Bruk av Lavkarbonbetong

2.7.6.1 Støpelighet

Silikastøv, flygeaske og slagg som tilsetningsmaterialer vil til en viss grad påvirke betongens støpelighet, men i de fleste tilfeller vil endringene fortsatt være akseptable og lett forutsigbare. Sementtyper med høyt slagginnhold (CEM III/A og CEM III/B) vil ofte gi betonger med god støpelighet ved svært lavt bindemiddelinhold. Slik betong har derimot ofte redusert komprimerbarhet, slik at det er bør gjennomføres prøvestøp før bruk av denne betongtypen. [15]

Betong i klasse Lavkarbon B vil normalt ikke ha noen støpelighetsegenskaper som skiller seg merkbart fra tradisjonell betong. Det er først ved klassene Lavkarbon A, Pluss og Ekstrem at

man kan forvente litt større forskjeller, avhengig av hvilke virkemidler som er brukt for å oppnå karbonreduksjonen. Likevel vil det i de fleste tilfeller være uproblematisk å oppnå ønsket støpelighet ved riktig tilpassede tiltak. [15]

2.7.6.2 Flygeaske

Flygeaske brukes som tilsetningsmateriale både ved produksjon av sement og ved betongproduksjonen. Under sementproduksjonen vil flygeaske bli malt sammen med sementen og bli mer finkornet, noe som vil gi en litt annen påvirkning på støpeligheten enn flygeaske som er tilsatt ved betongproduksjonen. Flygeaskesementer blir samtidig ofte malt en del finere enn standard portlandsement for å kompensere for en mer langsom fasthetsutvikling. Det bidrar positivt til betongens stabilitet, uten at støpeligheten målt ved synkmål nødvendigvis reduseres. [15]

Flygeaske som tilsettes i betongproduksjonen skal i henhold til NS-EN 206+NA brukes med en virkningsfaktor på $k=0,4$ eller $k=0,7$, avhengig av bestandighetsklassen. Det totale bindemiddelinholdet vil derfor bli noe større enn både ren portlandsement og flygeaskesementer. [15]

Dette gjør totalt sett at det ikke er mulig å forklare flygeaske sin påvirkning på betongens støpelighet på en enkel måte. Likevel kan man si at betonger med flygeaske generelt sett har minst like god støpelighet som betonger uten flygeaske, og ofte bedre stabilitet. Dette gjør det også normalt enklere å produsere selvkomprimerende betong ved bruk av flygeaske enn uten. [15]

2.7.6.3 Slagg

Hovedsakelig brukes slagg som tilsetningsmateriale ved produksjon av sementer av type CEM II og CEM III. Samtidig blir slagg til en viss grad brukt i Storbritannia som tilsetningsmateriale også ved betongproduksjonen. Også i Sverige begynner slagg som tilsetningsmateriale å bli mer og mer tatt i bruk. [15]

Slaggsementer oppnår en gitt støpelighet ved lavt sementforbruk, noe som i seg selv gir en positiv effekt på klimagassutslippet, og et godt utgangspunkt for å oppnå ønsket lavkarbonklasse. Mange av betongprodusentene som bruker slaggsementer, produserer Lavkarbon A betong som standard vare. [15]

Slaggsementer med høyt slagginnhold (CEM III) vil ha liten sement- og vannmengde, noe som kan føre til høy viskositet. Betongen vil altså få en høy væskeseighet og det blir nødvendig å gi betongen litt høyere synkmål enn normalt for å oppnå ønsket støpelighet. Det lave vanninnholdet vil også gjøre betongen mer følsom for endring i mengden superplastiserende tilsetningsstoff. Derfor vil det i mange tilfeller være fornuftig å gi slaggbetong et litt høyere sement- og vanninnhold enn det som er teoretisk mulig. Det vil redusere væskeseigheten, og unngå stabilitetsproblemer relatert til høy følsomhet i dosering av superplastiserende.

[15]

2.7.6.4 Fasthetsutvikling, Temperaturfølsomhet og Vinterstøp

Bruk av flygeaske og slagg som tilsetningsmaterialer vil gi en mer langsom fasthetsutvikling enn betong uten disse materialene. Dersom det er lagt opp til korte produksjonssykluser, som for eksempel i elementindustrien, vil dette være ugunstig. For å delvis kompensere for den langsomme fasthetsutviklingen er det vanlig å øke finmalingsgraden på det ferdige sementproduktet etter at tilsetningsmaterialene males inn som en del av sementen. Når flygeaske eller slagg tilsettes direkte i betongproduksjonen er det derimot ikke mulig å kompensere for denne langsomme fasthetsutviklingen uten å senke masseforholdet. Dette vil altså øke bindemiddelinholdet, noe som normalt vil være uaktuelt når hensikten er å oppnå lavkarbonbetong. I praksis er det likevel bare i Lavkarbon A, Pluss og Ekstrem at effekten på fasthetsutviklingen er så stor at den vil kunne påvirke rivningstiden og produksjonssyklusene.

[15]

Selv om flygeaskebetong alltid har en langsommere fasthetsutvikling, er den mindre temperaturfølsom ved lave temperaturer enn vanlig konstruksjonsbetong. Det vil si at forskjellen i fasthetsutvikling mellom betong med og uten flygeaske er mindre ved lave temperaturer enn ved høye. [15]

Lavkarbonbetong kan derfor være gunstig for vinterbruk. Lavkarbon B kan fint brukes om vinteren med helt ordinære tiltak, mens Lavkarbon A kan kunne kreve noen ekstra tiltak som for eksempel økt bruk av isolasjonsmaterialer. Dersom redusert varme- og fasthetsutvikling skal kompenseres med fyring, økt temperatur i fersk betong eller andre energikrevende tiltak, må dette tas med i det totale karbonregnskapet for prosjektet. I tillegg må det tas med i betongens EPD dersom vintertiltakene fører til endringer i sammensetningen, som for

eksempel bruk av størknings- eller herdeakselerator. For betong klassene Lavkarbon Pluss og Ekstrem må det regnes med spesielle tiltak ved vinterproduksjon, som for eksempel kombinasjon av tildekking med isolasjonsmaterialer og fyring. [15]

Flygeaske vil som tilsetningsmateriale gi redusert total varmeutvikling, og betong med mer enn 30 % flygeaske brukes derfor også som lavvarmebetong. Dette er gunstig når det kommer til begrensning av maksimumstemperaturen i grove konstruksjoner, og vil også redusere faren for opprissing når temperaturtøyningene er fastholdt i støpeskjøter, eller ved kontaktstøp mot fjell. [15]

Ulike typer slagg har ulik effekt på varmeutviklingen, men de fleste vil gi en mindre markert effekt enn flygeaske. For å oppnå lavvarmebetong basert på slagg må ofte mer enn 50 % av det totale bindemidlet være slagg. Det vil gi en svært langsom varmeutvikling, som vil bidra til å redusere maksimaltemperaturen i konstruksjonen. Betonger med slaggsement kan også ha et relativt høyt autogent svinn, noe som delvis kan oppheve den gunstige effekten av lav varmeutvikling på tendensen til opprissing på grunn av fastholdt termisk utvidelse [15]

3. Metode

3.1 Ferske Egenskaper

Synkmål: utført i henhold til NS-EN 12350-2: *Prøving av fersk betong - Del 2: Synkmål* [17]

Fersk densitet: utført i henhold til NS-EN 12350-6: *Prøving av fersk betong - Del 6: Densitet* [18]

Luftinnhold: utført i henhold til NS-EN 12350-7: *Prøving av fersk betong - Del 7: Luftinnhold - Trykkmetoder* [19]

3.2 Herdede Egenskaper

Trykkfasthet: utført i henhold til NS-EN 12390-3: *Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet* [20]

PF-Metoden: utført i henhold til Statens vegvesen 14.637: *Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF* [21]

Kloridpermeabilitet: utført i henhold til NT Build 443 [22]

4. Prøveprogram

Dette kapitlet beskriver alle de ulike praktiske forsøkene som er blitt gjennomført til denne oppgaven. Hensikten med prøveprogrammet var å undersøke egenskapene og hvordan ulike herdebetingelser vil påvirke lavkarbonbetong i forhold til en mer konvensjonell betong. Derfor er det blitt støpt og utført forsøk på tre forskjellige betongtyper, en med Norcem Industrisement, og to mer miljøvennlige betonger. Den ene inneholder Schwenk Lavvarmesement, mens den andre inneholder Norcem Standard FA med ekstra tilsatt flygeaske opptil 60% av bindemiddelet.

Ettersom betonglabben ved UiS har vært under oppussing under gjennomføringen av denne oppgaven, har alt av materialer blitt nødt til å bli transportert fra UiS til lokalene til *Sandnes & Jærbetong*, hvor alt av blandedprosessen har blitt utført. I tillegg var den opprinnelige veilederen vår sykemeldt på dette tidspunktet, på bakgrunn av dette fikk vi hjelp av studentassistent Gaute Hagtvedt under denne prosessen.

4.1 Materialer

Tabell 5 viser alle materialer som er brukt under prøveprogrammet for denne oppgaven, mens *Tabell 6-8* presenterer produktdata for de tre ulike sementtypene.

Tabell 5: Materialer brukt under prøveprogrammet

Materiale	Type
Sement	Schwenk Lavvarmesement Norcem Standardsement FA Norcem Industrisement
Tilslag	Sand: 0 – 8 mm Stein: 8 – 16 mm
Tilsetningsmaterialer	Flygeaske
Tilsetningsstoff	Superplastiserende: Mapai Dynamon SX-N
Vann	

Schwenk Lavvarmesement:

Tabell 6: Produktdata Schwenk Lavvarmesement [23]

Fysiske data		
Finhet (Blaine m ² /kg)		470
Densitet (kg/dm ³)		2,98
Bulkdensitet (g/cm ³)		1,1
Andel slagg (%)		≈ 70
Bindetid (min)		230
Ekspansjon (mm)		0,3
Trykkfasthet (MPa)	2 døgn	28
	7 døgn	36
	28 døgn	58
	56 døgn	64
Kjemiske data		
Kalk (% CaO)		49
Silisium (% SiO ₂)		31
Aluminium (% Al ₂ O ₃)		8,3
Magnesium (% MgO)		6,1
Sulfat (% SO ₃)		2,1
Jern (% Fe ₂ O ₃)		1,6
Kalsium (% K ₂ O)		0,6
Natrium (% Na ₂ O)		0,3
Alkalier (% Na ₂ O _{ekv})		0,79
Trikalsiumaluminat (% C ₃ A)		5,3

Norcem Standardsement FA:

Tabell 7: Produktdata Norcem Standard FA [24]

Fysiske data		
Finhet (Blaine m ² /kg)		450
Densitet (kg/dm ³)		3
Bindetid (min)		140
Ekspansjon (mm)		1
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	20
	2 døgn	31
	7 døgn	42
	28 døgn	55
Kjemiske data		
Sulfat (% SO ₃)		≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085
Alkalier (% Na ₂ O _{ekv})		1,4
Klinker (%)		78
Flygeaske (%)		18
Kalkmel (%)		4

Norcem Industrisement:

Tabell 8: Produktdata Norcem Industrisement [25]

Fysiske data		
Finhet (Blaine m ² /kg)		550
Densitet (kg/dm ³)		3,13
Bindetid (min)		110
Ekspansjon (mm)		1
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	33
	2 døgn	41
	7 døgn	50
	28 døgn	59
Kjemiske data		
Sulfat (% SO ₃)		≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085
Alkalier (% Na ₂ O _{ekv})		1,3
Klinker (%)		96
Sekundære bestanddeler (%)		4

4.2 Proporsjonering

Vi ville teste 3 resepter med fasthetsklasse B50 og bestandighetsklasse M40, men med 3 forskjellige typer sementer.

V/b forhold

Lavvarme:

Foreslåtte v/b-tall følgende til for SCHWENK/lavvarme

B35	0,45
B45	0,42
B55	0,38
B65	0,35

v/b tall = 0,38, anbefalt fra «Foreslåtte v/b-tall følgende til for SCHWENK/lavvarme» i faget betongteknologi [27]

Industrisement

Tabell 9: Fasthetsklasse v/c tall Industrisement [28]

Fasthetsklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,82	0,75	0,66	0,57	0,48	0,38

Tabell 10: Bestandighetsklasse v/c-tall Industrisement [28]

Valg av bestandighetsklasse (nasjonale krav)

Eksponeringsklasse	M90	M60	M45	MF45*	M40	MF40*
X0	*	*	*	*	*	*
XCl, XC2, XC3, XC4, XF1		*	*	*	*	*
XD1, XS1, XA1, XA2, XA4			*	*	*	*
XF2, XF3, XF4				*		*
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					*	*
XSA	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstille kravene til M40.					
Største masseforhold $v/(c+\Sigma k_p)$	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40

*Minst 4% luft

Ut ifra tabellene ovenfor har vi valgt et v/c-tall på 0.39 for resepten med Industrisement.

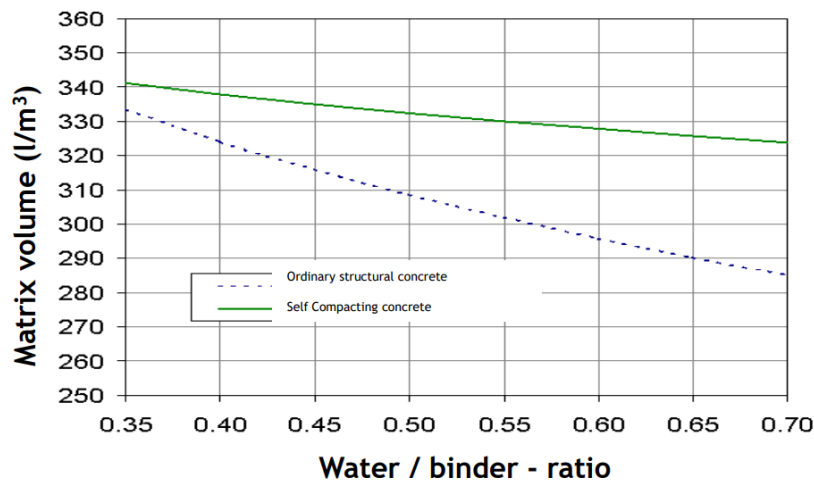
Standard FA:

Tabell 11: Fasthetsklasse Standard FA [29]

FASTHETSKLASSE – MASSEFORHOLD						
Fasthetsklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55
Masseforhold minste - største	0.65-0.73	0.60-0.65	0.53-0.60	0.46-0.53	0.40-0.46	0.35-0.40

Fra Tabell 11 vil v/b være mellom 0,35-0,40, og vi har med det valgt et v/b-tall på 0,39.

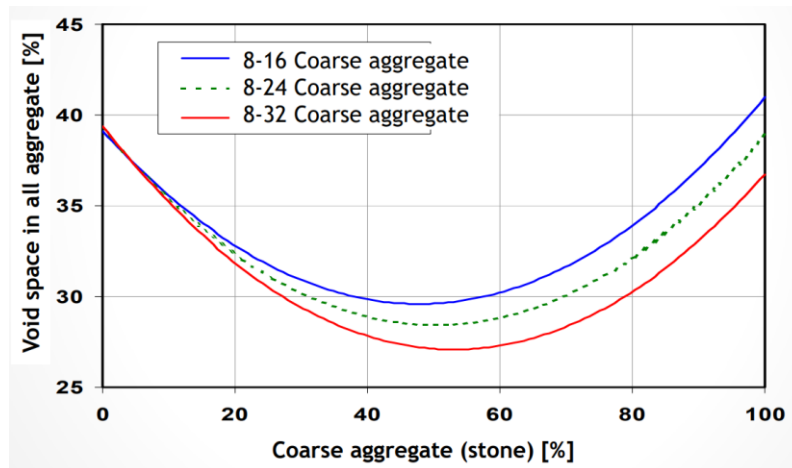
Matriksvolum



Figur 8: Matriksvolum [30]

Fra figuren ovenfor valgte vi opprinnelig matrixvolum på 325 l/m^3 for alle 3 reseptene. I resepten med 60% Flyveaske hadde vi en $k=0,7$ for flyveaske opp til 35%, og fra 35-60% $k=0$. Dette førte til at vi fikk ekstra bindemiddel uten ekstra vann og fikk derfor et veldig lavt vanninnhold. Av den grunn økte vi matrixvolumet gradvis til vi fikk et vanninnhold større enn 130 l/m^3 . Vi endte opp med matrixvolum 370 l/m^3 for Flyveaskeresepten og beholdt 325 l/m^3 for de to andre reseptene.

For å få minst mulig tomrom i betongen vår brukte vi figuren under. Vi hadde 8-16 mm tilslag og leste av fra den blå kurven at vi måtte ha 48% 8-16 mm tilslag og 52% 0-8 mm sand for minst mulig tomrom.



Figur 9: Tomrom i sammensatt tilslag [30]

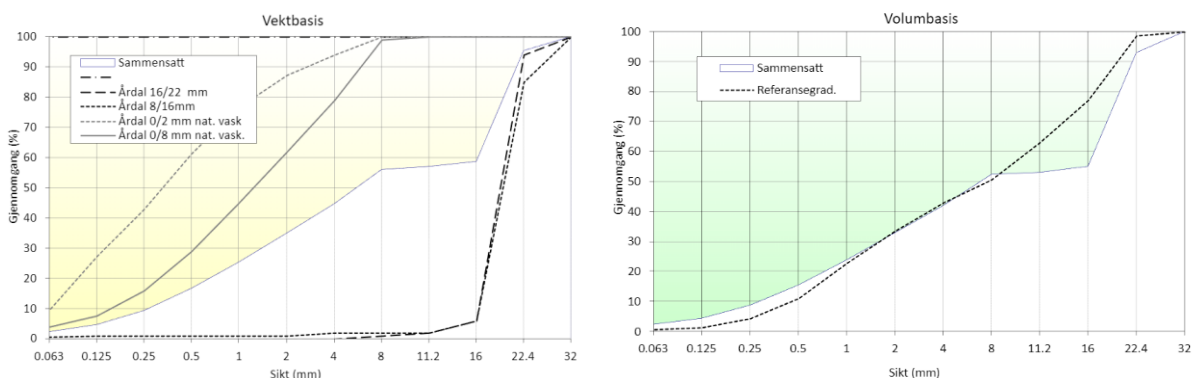
Tilsetningsstoffer

Mapei Dynamon SX-N

For å få en betong som er lettere å arbeide med kan man tilsette 0,3-2% superplastiserende Dynamon SX-N. Vi satte den til 0,8% i excelarket for en omtrentlig verdi, men under selve blandingen ble Dynamon SX-N titrert inn litt etter litt for å unngå å tilsette for mye.

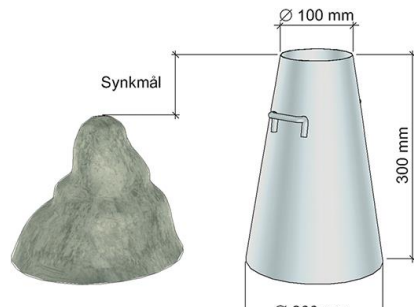
Deretter la vi inn siktekurvene for tilslagene vi skulle bruke, og justerte fuktigheten på tilslagene som vi målte på blandedagen ved hjelp av speedy moisture test.

Fra figurene under kan vi se at den målte siktekurven og referanselinjen ligger veldig nærme, men vi får en liten forskjell. En årsak til dette kan være at referanselinjen tar med 16-22mm tilslag, noe vi ikke hadde i reseptene våre.



Figur 10: Målt siktekurve og referanselinje av tilslag brukt i reseptene

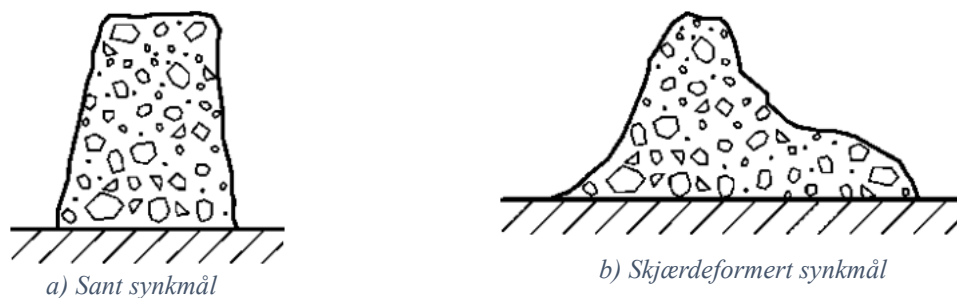
Til slutt satte vi ønsket volum til 87 liter og fikk ut reseptene som vises i Figur 11-13 under.



Figur 14: Prinsipp for måling av synkmål [31]

En slik test egner seg hovedsakelig for betonger med et synkmål på mellom 10 – 210 mm, slik at et ved et synkmål utenfor disse ytterverdiene bør det vurderes å bruke andre metoder for å bestemme konsistensen. [31]

For at prøvingen skal være gyldig må resultatet i tillegg gi et sant synkmål som vil si at betongmassen forblir hovedsakelig intakt og symmetrisk, se *Figur 15*. Dersom massen får skjærdeformasjoner, se *Figur 15 b*), anses resultatet som ugyldig og prosedyren må gjentas med en ny prøve. Hvis denne prøven også skulle gi skjærdeformasjoner, vil det bety at betongen ikke har nødvendig plastisitet og kohesjon til at synkprøving er egnet. [17]



Figur 15: Former av Synkmål [17]

Resultatene fra synkmålstesten kan i henhold til NS-EN 206 [32] brukes til å klassifisere den ferske betongens konsistens etter *Tabell 12* nedenfor.

Tabell 12: Synklasser fersk betong [32]

Synkklasse	Synkmål [mm]	Betegnelse
S1	10 til 40	Stiv plastisk
S2	50 til 90	Plastisk
S3	100 til 150	Tungt flytende
S4	160 til 210	Flytende
S5	≥ 220	

4.3.2 Fersk Densitet

Betongens densitet ble målt etter NS-EN 12350-6 [18] ved å veie en beholder med et kjent volum, for så å fylle beholderen med betong og igjen veie den totale vekten. Fyllingen av betongen ble gjort i tre lag hvor det ble komprimert med en komprimeringsstav 25 ganger for hvert lag. Beholderen som ble brukt hadde et volum på 3 L (0,003 m³), og densiteten kunne dermed beregnes etter følgende formel:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Hvor

D = Densitet av fersk betong [kg/m³]

m₁ = Vekt av tom beholder [kg]

m₂ = Vekt av full beholder [kg]

V = Volum av beholder [m³]

4.3.3 Luftinnhold

Luftinnholdet til betongblandingene ble målt etter NS-EN 12350-7 [19] hvor prinsippet er å sette fersk betong under trykk og måle volumendringene i forhold til normalt lufttrykk. Prosedyren gikk ut på å fylle en bøtte helt opp med betong. Bøtten rommet 8 liter og ble fylt i tre lag, hvor det for hvert lag ble komprimert ved hjelp av 25 støt av en stikkstang jevnt fordelt på overflaten, i tillegg til 10 -15 slag med en gummiklubb mot beholderen. Dette ble gjort for å fjerne eventuelle luftlommer i betongen. Etter at alle lagene var fylt og komprimert ble toppen avrettet med stikkstangen i flukt med bøttekanten. Deretter ble bøttekanten rengjort med en svamp, og en overdel (pos. 4) ble montert på bøtta og klemt fast med hurtigklemmere (pos. 7), se *Figur 16* for illustrasjon av apparatets deler. Kuleventilene (pos. 5 og 6) ble så åpnet, og en av dem ble fylt med vann ved hjelp av en sprøyteflaske helt til det kom ut vann, fri for luftbobler, gjennom den andre ventilen.

Neste steg var å la justeringsventilen (pos. 3) være lukket og skru løs luftpumpehåndtaket. Trykket ble så pumpet opp til manometerviseringen sto på ca. 10 mm forbi det røde

justeringsmerket, se *Figur 17*. Trykket ble deretter regulert ved å forsiktig skru opp justeringsventilen (pos. 3) inntil manometerviseren sto rett over det røde justeringsmerket. Etter at trykket var regulert ble begge kuleventilene lukket, og testen kunne starte fra det røde justeringsmerket. Det ble gjort ved å trykke hevarmen (pos. 2) ned, slik at luft fra trykkammeret ble sluppet ned i bøtta, og trykket utjevnes. Hevarmen ble trykt ned i ca. 20 sek helt til manometerviseren falt til ro. Luftmengden i prosent kunne da leses direkte av på manometeret.

Pos. 1 – Luftpumpe

Pos. 2 – Hevarm-ventil

Pos. 3 – Justeringsventil

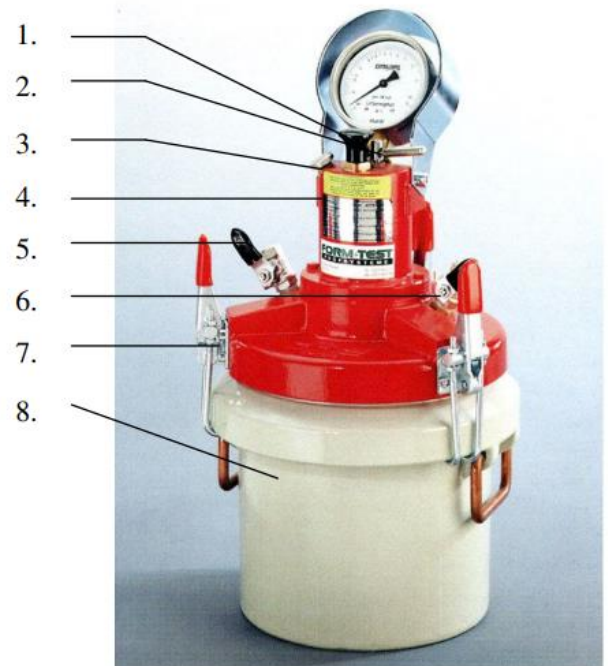
Pos. 4 – Overdel

Pos. 5 – Kuleventil

Pos. 6 – Kuleventil

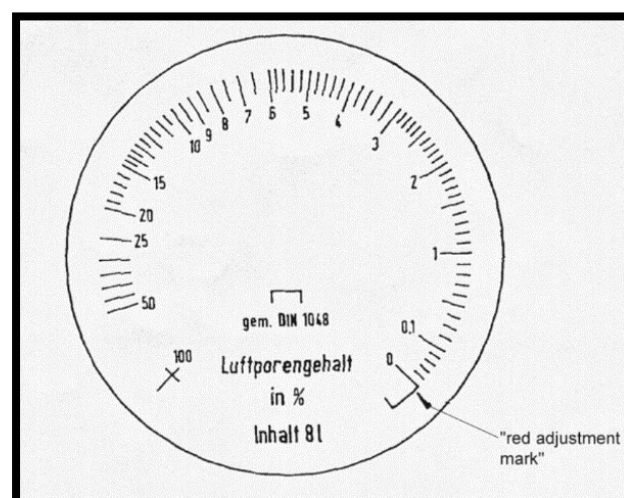
Pos. 7 – Hurtigklemme

Pos. 8 – Bøtte



Figur 16: Luftporemåler [33]

[33]



Figur 17: Manometervisere til luftporemåleren [33]

4.3.4 Temperaturutvikling

Noe av den ferske betongen ble brukt til å måle temperaturutviklingen til de ulike betongtypene i løpet av de første dagene med herding. Det ble gjort ved at én isolert isoporkasse for hver betongresept ble fylt opp med rundt 6 liter betong, for så å stikke termometer i midten av hver kasse. Kassene ble deretter godt isolert, lagt til side og et måleapparat koblet til tre termometrene registrerte temperaturen til de ulike betongtypene hvert 15. minutt.

For å få et estimat på akkumulert isoterm varmeutvikling av betongtypene er det brukt Excel regnearket *Adiabatic temperature and isothermic heat* utviklet av Sverre Smedplass. Dette regnearket beregner betongens reelle modenhet (herdetid) basert på herding ved 20 °C ved hjelp av følgende formel:

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta_i) * \Delta t_i$$

Der:

M = Modenhet;

n = Antall tidsintervall;

H(θ_i) = Hastighetsfunksjon av gjennomsnittlig temperatur θ_i i tidsintervall i;

Δt_i = Lengden på tidsintervallet i.

Videre blir denne verdien av modenhet brukt til å beregne akkumulert isotermisk varmeutvikling ved hjelp av følgende formel:

$$Q(M) = Q_{\infty} * e^{(-\frac{\tau_e}{M})^{\alpha}}$$

Der

Q(M) = Varmeutvikling ved modenhet M;

Q_{∞} = Total varmeutvikling;

τ_e = Retardasjonsstyrke;

α = Krumningsparameter

[11] [34]

Det er også mulig å estimere den maksimale temperaturøkningen for en betong under herding ved hjelp av følgende formel:

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} * C}{\rho_r * c_b}$$

Der

$\Delta\theta$ = Temperaturøkning, [°C];

Q_{∞} = Varmeutvikling per enhet sement, [kJ/kg sement];

C = Sementinnhold, [kg/m³];

ρ_r = Betongdensitet, [kg/m³];

c_b = Spesifikk varme kapasitet, [kJ/kg*°C], (Normalt 1.1 kJ/kg*°C);

[11]

4.4 Støping av prøveterninger

Etter at alle testene på den ferske betongen var gjennomført, ble betongblandingene støpt til prøveterninger i former på 100x100x100 mm. Formene ble på forhånd smurt med olje slik at betongen ikke ville sette seg fast og sørge for at terningene fikk en fin overflate. Også her ble formene fylt i tre lag og stampet 25 ganger per lag for å unngå luftbobler og gi en best mulig utfylling av formen.

For å kunne utføre alle planlagte tester, ble det støpt 62 terninger for hver av de tre betongreseptene. På grunn av begrenset antall liter som var mulig å blande samtidig i den betongblander vi hadde tilgjengelig, ble vi nødt til å dele hver resept opp i to separate blandinger. Blandingene til de ulike reseptene blir dermed videre i denne oppgaven beskrevet etter B1 og B2. For hver blanding ble det dermed støpt 31 terninger.

Når all støpingen var gjennomført, ble formene tildekket med plastposer og lagt til herding i ca. ett døgn. På grunn av redusert oppbevaringsplass hos *Sandnes & Jærbetong*, hvor vi hadde utført støpingen, ble noen av blandningene (Lavvarme B1 og Standard FA B1) plassert i et nokså høyt temperert rom, men resten måtte bli plassert i et kaldt verksted. Herdeforholdene det første døgnet ble altså utilsiktet noe forskjellig mellom de ulike blandningene.

Etter at terningene hadde herdet i ca. et døgn, ble de tatt ut av formene og transportert til laboratoriet ved UiS hvor de ble plassert i forskjellige herdeforhold, som beskrevet i neste kapittel.



Figur 18: Nystøpt betong i terningsformer

4.5 Herdeforhold

For å undersøke hvordan bruk av miljøbetong vil påvirke herdeprosessen og de ulike egenskapene til den støpte betongen, ble prøveterningene fra hver blanding delt opp og utsatt for følgende fire ulike herdeforhold:

1. Plassert på benk og eksponert for romtemperatur og 50 % RF (Relativ Fuktighet)
2. Klimaskap på 5 grader celsius og rundt 30 % RF
3. Vannbad med 20 grader celsius
4. Lagret 3 døgn i vannbad på 20 grader celsius, deretter på benk ved romtemperatur og 50 % RF

Disse herdebetingelsene blir brukt for å kunne simulere flere ulike scenarioer som er vanlig for betong som blir støpt ute på byggeplass. Herdebetingelse 1. vil representere en betongkonstruksjon som blir støpt innendørs uten noe etterbehandling av betongen. Typisk for mindre betongkonstruksjoner, der styrken og kvaliteten på betongen ikke er veldig kritisk. Herdebetingelse nummer 2 kan ses på som en betong støpt utendørs og på vinterstid i Norge. Nummer 3 er et scenario med et optimalt herdeforhold hvor den støpte betongen etterbehandles i vannbad under hele herdeprosessen. Herdebetingelse 4 er derimot et mer realistisk scenario for herdeforholdet ute på en byggeplass, og ved et normalt bruk av etterbehandlingen av betongen for å hindre uttørking og vanntap de første dagene etter støping.

I tillegg var den opprinnelige planen å også ha en herdebetingelse hvor terningene var plassert i et klimaskap på 30 grader celsius og 50 % RF, for å representere et scenario av herding av betong ved varme sommerdager. Ettersom vi kun hadde tilgang til ett klimaskap på labben, valgte vi derfor å heller prioritere et klimaskap på 5 grader celsius ettersom dette vil være mest relevant for de norske forholdene.

4.6 Herdede Egenskaper

4.6.1 Trykkfasthet

For å få en oversikt over fasthetsutviklingen til de ulike betongtypene og hvordan de påvirkes av herdeforholdene ble det jevnlig utført trykktesting av prøveterningene. Trykktestingen ble utført i henhold til NS-EN 12390-3 [20]. Prøveterningene ble plassert nøyaktig sentrisk i en pressemaskin med de glatte overflatene mot maskinens berøringspunkter. Deretter ble de belastet med økende kraft helt til det oppstod brudd og betongen begynte å sprekke, se *Figur 19*. Alle terningene ble på forhånd rensset for eventuelle partikler på overflatene, og terningene som hadde ligget i vannbad ble tørket rene. Etter brudd kunne man avlese den maksimale kraften terningene kunne motstå, og beregne prøvestykkenes trykkfasthet ved ulike tidspunkt ved hjelp av følgende formel:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Hvor:

f_c (σ_m) er trykkfasthet [N/mm^2];

F (F_m) er den maksimale trykkraften prøvene kan motstå før brudd [N];

A_c er tversnittarealet til prøvene hvor trykkraften virker mot [mm^3]

[20]



Figur 19: Prøveterning før og etter trykktest

Dette ble utført på dag 1, 3, 7, 14, 28, 56 og 90 av herdeprosessen til de ulike betongreseptene. På dag 1, ett døgn etter at betongen ble støpt i former, ble det trykktestet 2 terninger fra hver av de tre betongreseptene, mens for de resterende test-dagene ble det for hver betongresept testet 2 terninger for hver herdebetingelse. Altså 8 betongterninger per blanding, og dermed et totalt antall tester per dag på 24. Grunnen til at det ble testet 2 terninger for hver resept og herdebetingelse var for å ha mulighet til å observere eventuelle avvik under testene og dermed få et mest mulig riktig bilde på trykkfasthetsutviklingen. Dette var spesielt viktig for dette forsøket ettersom hver betongresept ble delt i to separate blandinger, noe som fort kan ha ført til noe avvik under testene. Optimalt sett burde man ha testet enda flere terninger for hver betongtype, men på grunn av begrenset tid og ressurser, var dette ikke mulig for denne oppgaven.

4.6.1.1 Karakteristisk trykkfasthet 28 døgn

Kravene til trykkfasthet for de forskjellige norske fasthetsklassene er gitt i Nasjonalt Tillegg til NS-EN 206 [32], ved følgende tabell:

Tabell 13: Trykkfasthetsklasser for normalbetong og tungbetong [32]

Nasjonal trykkfasthetsklasse	B10	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65	B75	B85	B95
Europeisk betegnelse		C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C55/67				
Karakteristisk sylindrefasthet $f_{ck,cyl}$ [MPa]	10	20	25	30	35	45	55	65	75	85	95
Karakteristisk terningfasthet $f_{ck,cube}^a$ [MPa]	12	25	30	37	45	55	67	80	90	100	110
a For trykkfasthetsklasse B55 og høyere kan andre verdier for karakteristisk terningfasthet benyttes hvis forholdet mellom disse og karakteristisk sylindrefasthet er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen.											

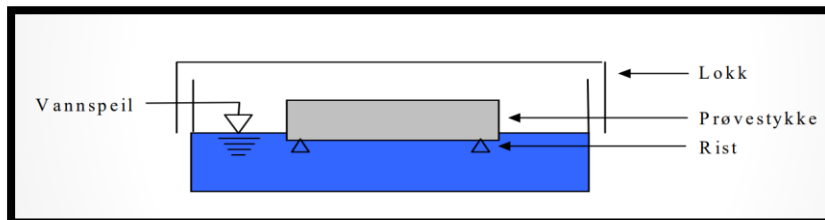
Ved trykktesting av få prøveterninger per betongtype (<15), er det i tillegg et krav om at gjennomsnittet av testene skal være større eller lik $f_{ck,cube} + 5$ MPa, og at alle individuelle testresultater skal være større eller lik $f_{ck,cube} - 5$ MPa. [35]

4.6.2 PF-Metoden – Densitet og Porøsitet

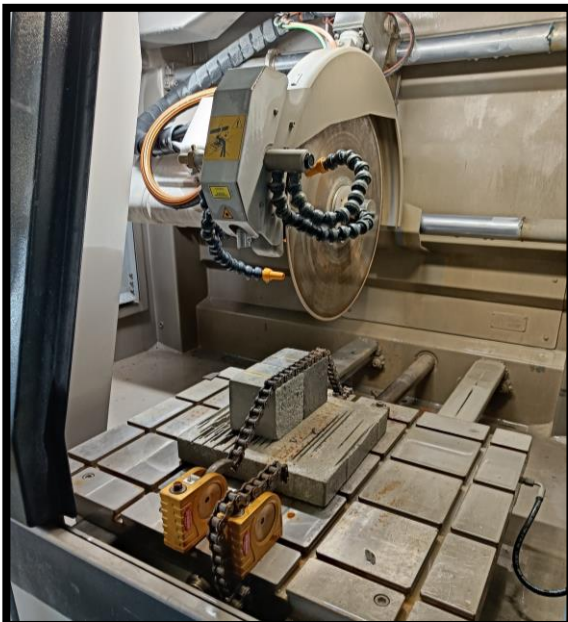
PF-metoden ble brukt for å bestemme densitet, kapillær sugeshastighet og porøsitet for den herda betongen. Dette ble utført i henhold til «Statens vegvesen 14.637 Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF» [21], både etter 28 og 56 dager med herding.

Metoden gikk ut på å kutte en prøveterning til to skiver med en tykkelse på ca. 20 mm, for så å tørke dem i et klimaskap på 105 °C i 7 dager, helt til vekttapet ble mindre enn 0,01 % pr. time. Deretter avkjøltes prøvestykkene i minimum 2 timer i luft ved romtemperatur, tildekket med plastfolie. Skivene ble så veid (g_1) før overflaten av skivene ble sunket 1-2 mm ned i et vannbad. Skivene ble liggende slik i 4 døgn samtidig som det ble veid etter:

- 10 og 30 minutter
- 1, 2, 3, 4 og 6 timer
- 1, 2, 3 og 4 døgn



Figur 20: Oppsett for test av vannabsorpsjon til prøveskive [36]

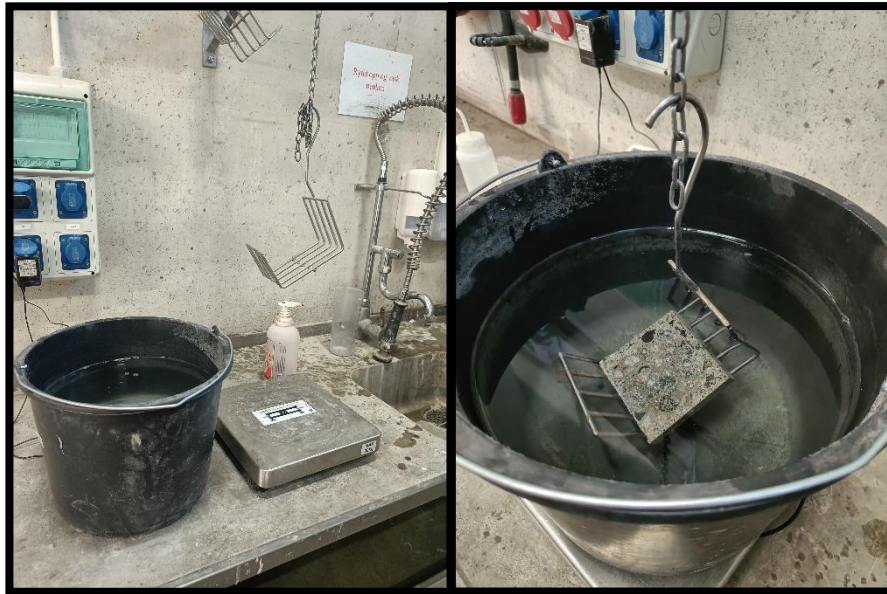


Figur 21: Maskin brukt for å kutte prøveterningene



Figur 22: Betongskivene delvis nedsunket i vann

På den fjerde dagen ble prøvestykkene helt nedsunket i vann og liggende i tre dager før de igjen ble veid. Da ble det både veid vekten i luft (g_2), og vekten under vann (g_3). Veiingen under vann ble gjort ved å plassere en bøtte med vann på en vekt, synke en «metallhenger» delvis ned i vannet, og nullstille vekten. Betongskiven ble så plassert i «metallhengeren» og nedsunket i vannet igjen, se *Figur 23*. Ettersom at vann har en densitet på 1000 kg/m^3 , vil den avleste verdien representere skivens volum.



Figur 23: Oppsett for veiing under vann (g_3)

Til slutt ble betongskivene nedsunket i en trykktank, hvor de ble utsatt for et trykk på rundt 50 atm. i 1 døgn, for så å bli veid igjen (g_4). Resultatene fra PF-metoden ble deretter beregnet ved hjelp av følgende formler:

- Prøvestykkets volum: $V = g_3$ (m^3)
(Statens Vegvesen oppgir volumet som: $V = \frac{g_2 - g_3}{\rho_w}$, men ettersom vi bruker en annen veiemetode for g_3 , vil vi få prøvestykkets volum direkte ut fra veiingen under vann)
- Tørr densitet: $\rho_1 = \frac{g_1}{V}$ (kg/m^3)
- Fast-stoff densitet: $\rho_{fs} = \frac{g_1}{V - \frac{g_4 - g_1}{\rho_w}}$ (kg/m^3)
- Sug porøsitet: $P_s = \frac{g_2 - g_1}{V * \rho_w}$

- Makro porøsitet: $P_m = \frac{g_4 - g_2}{V \cdot \rho_w}$
- Total porøsitet: $P_t = P_s + P_m$

ρ_w er vannets densitet (settes lik 1000 kg/m³)

[21]

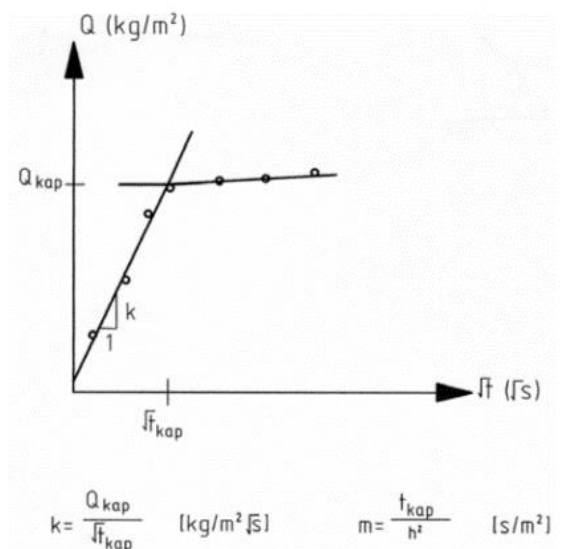
Tørr densitet vil si betongens densitet uten vann i kapillær- og gelporene, mens fast-stoff densitet er betongens densitet uten porer. Sug porøsitet går ut på betongens proporsjon av kapillære- og gelporer og dens evne til å trekke til seg vann, mens makro porøsitet handler om betongens evne til å trekke til seg vann i makro- og luftporer ved utsettelse for trykk. [34] [37]

De målte absorpsjonsverdiene, målt i mengde vann pr. arealenhet (kg/m²), ved angitte tidspunkter ble så brukt til å bestemme tidspunkt (t_{kap}) og en tilhørende absorpsjonsverdi (Q_{kap}) som tilsvarer at vannfronten akkurat har nådd toppflaten på prøvestykket, dvs. en stighøyde (h). Disse verdiene er beregnet ved hjelp av Geogebra og lineær regresjonsanalyse for å finne skjæringspunktet mellom de to kurvedelene (t_{kap} , Q_{kap}) som vist i *Figur 24*.

Kapillaritetstallet (k) og motstandstallet (m) kan dermed bestemmes med formlene:

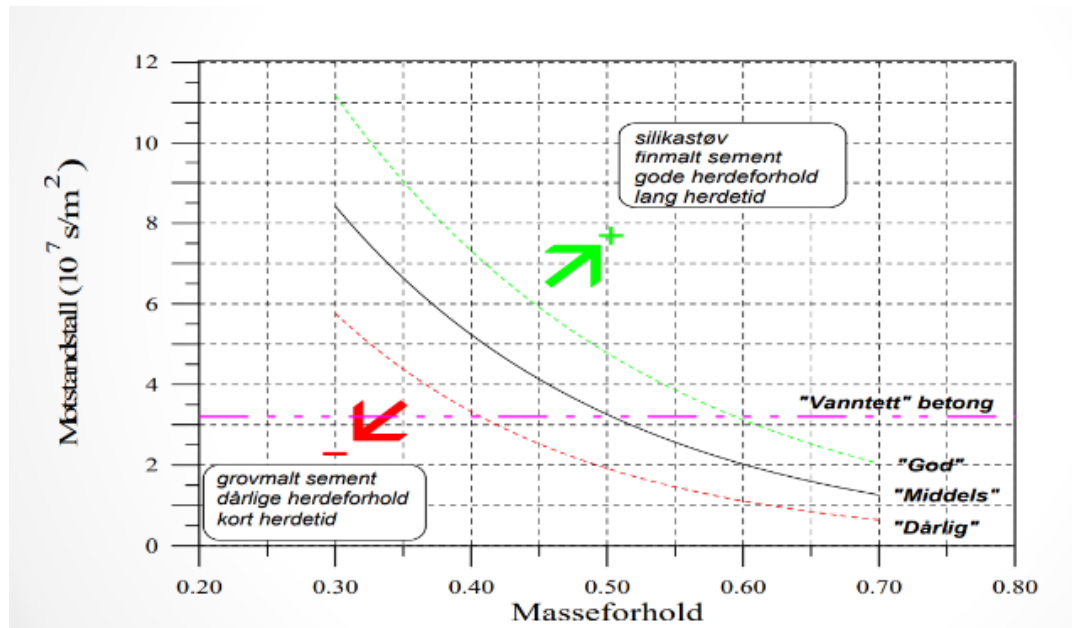
- Kapillaritetstallet: $k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}} \quad (\text{kg/m}^2 \sqrt{\text{s}})$
- Motstandstall: $m = \frac{t_{kap}}{h^2} \quad (\text{s/m}^2)$

[21]



Figur 24: Beregning av Kapillaritetstallet og Motstandstall [21]

Etter å ha kalkulert betongprøvens motstandstall, kan man ved hjelp av Powers modell og Figur 25 nedenfor avgjøre betongens kvalitet med tanke på permeabilitet.



Figur 25: Analyse av kvalitet på betongpermeabilitet etter Powers modell [36]

Resultatene fra PF-Metoden brukes også til å regne ut betongprøvenes PF-verdi ved hjelp av følgende formel:

$$PF = \frac{P_m}{P_t}$$

Til slutt oppgir også PF-Metoden en formel for å estimere betongprøvenes masseforhold (effektivt v/c) ut ifra prøvenes sugporøsitet. Dette baserer seg på Powers formel og en antagelse om at betongen inneholder 30 % volumprosent bindemiddel med 75 % hydratiseringsgrad av sementen:

$$\text{Estimat av masseforholdet: } \frac{v}{c} = \frac{0,32P_s + 0,04}{0,3 - P_s}$$

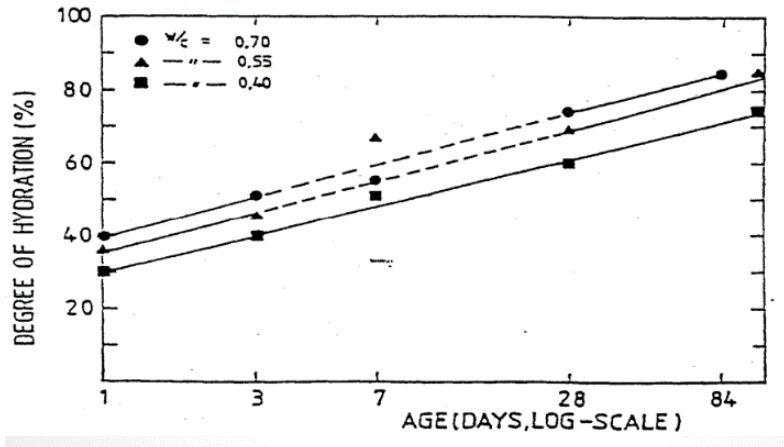
Dette v/c estimatet er en god måte å gjøre reseptkontroll eller vurdere feltbetong med ukjent resept. Estimaten forventes å ha en nøyaktighet på $\pm 0,05$ for betong eldre enn 2 måneder, og med v/c-tall større enn 0,40. [21]

Ifølge Powers modell kan betongens totalporøsitet også beregnes etter følgende formel:

- Total Porøsitet: $\varepsilon_{tot} = \frac{\frac{w}{c} - 0,172\alpha}{\frac{w}{c} + 0,317}$

[36]

α er betongens hydratiseringsgrad som kan bestemmes ut ifra *Figur 26* nedenfor. I vårt tilfelle, med et v/c-tall på 0.8 og 0.39, skal hydratiseringsgraden normalt ligge på rundt 60 % etter 28 dager og rundt 65 % etter 56 dager.



Figur 26: Hydratiseringsgrad i standard sement med varierende v/c-tall [36]

Ved å fikse v/c-tallet til det som er brukt i proporsjoneringen til de forskjellige betongtypene, sette totalporøsiteten lik sugporøsiteten kalkulert i PF-metoden, og dele den på reseptens forhold mellom mengde sement+vann av totalt liter betong, kan likningen ovenfor omformuleres til å få et estimat av betongprøvenes hydratiseringsgrad:

$$\alpha = \frac{\frac{w}{c} - P_s \left(\frac{w}{c} + 0.317 \right)}{0.172}$$

4.6.3 Kloridpermeabilitet

Testen for kloridpermeabilitet ble utført etter NT Build 443 [22]

Utstyr:

- Vann
- Kalsiumhydroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Natriumklorid (NaCl)
- Epoksy (Vi brukte Sikadur -30)
- Ekstraksjonsvæske i ampuller
- Kalibreringsvæsker
- Vekt med nøyaktighet $\pm 0,01$ g
- Plastbeholder
- Bor til å samle betongstøv
- Elektrode
- Elektrometer

Etter standarden skal metoden utføres på prøvestykkene etter de har fått herdet i 28 modenhetsdager, tilsvarende 28 dager ved 20°C . I vårt forsøk ble testen utført etter 28 dager uavhengig av modenhetsdager for å se på effekten herdeforholdene har på kloridpermeabilitet.

Først veide vi terningene, deretter ble de lagt i en tett beholder med et bad som hadde en løsning av 2 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$ per liter vann. Terningene ble liggende i badet til endringen i vekt per 24 timer var mindre enn 0,1 % av massen. Når terningene var mettet, la vi epoksy på alle sidene utenom flaten som skulle eksponeres for kloridinntrengning. Epoksyen skal etter standarden legges i to lag for å sikre at den er tett, men da det var mangel på epoksy kunne vi bare ta ett lag og måtte derfor være ekstra nøye for å unngå hull.



Figur 27: Prøveterninger med påført epoksy

På grunn av tidsmangel og et trolig lite utslag på testene ble steget med å legge terningene tilbake i $CA(OH)_2$ løsningen etter epoksyen var hardnet hoppet over. Dermed, når epoksyen var hardnet ble terningene lagt i en NaCl løsning med konsentrasjon av 165 g NaCl per liter vann. Der skulle de ligge i minimum 35 dager ved en temperatur mellom 21°C. og 25 °C.

Når terningene hadde ligget i saltbadet i 35 dager ble de tatt ut og det ble samlet betongstøv av terningene. Etter standarden skal det bores sakte inn i prøvestykkene med ett stort bor og samle betongstøv fra totalt 8 sjikt. Opprinnelig ville vi bore 8 sjikt på 5 mm hver, men på grunn av mangel på store og effektive bor bestemte vi oss for å bore 3 sjikt på 10 mm hver. Ettersom boret var mye mindre måtte vi bore 3 hull per sjikt for å få samlet nok støv og få en mer representativ prøve.

Vi startet med å bruke boremaskinen på bildet under, hvor vi kunne se hvor langt ned vi hadde boret med en nøyaktighet på 0,1 mm. På grunn av feil bor og en høyfast betong måtte vi skifte over til en håndholdt drill med slag for å få gjennomført testingen på alle terningene. Med den håndholdte drillen kontrollmålte vi sjiktene og fant en sikkerhet på +-2 mm. Det må dermed betraktes som en unøyaktighet og feilkilde.

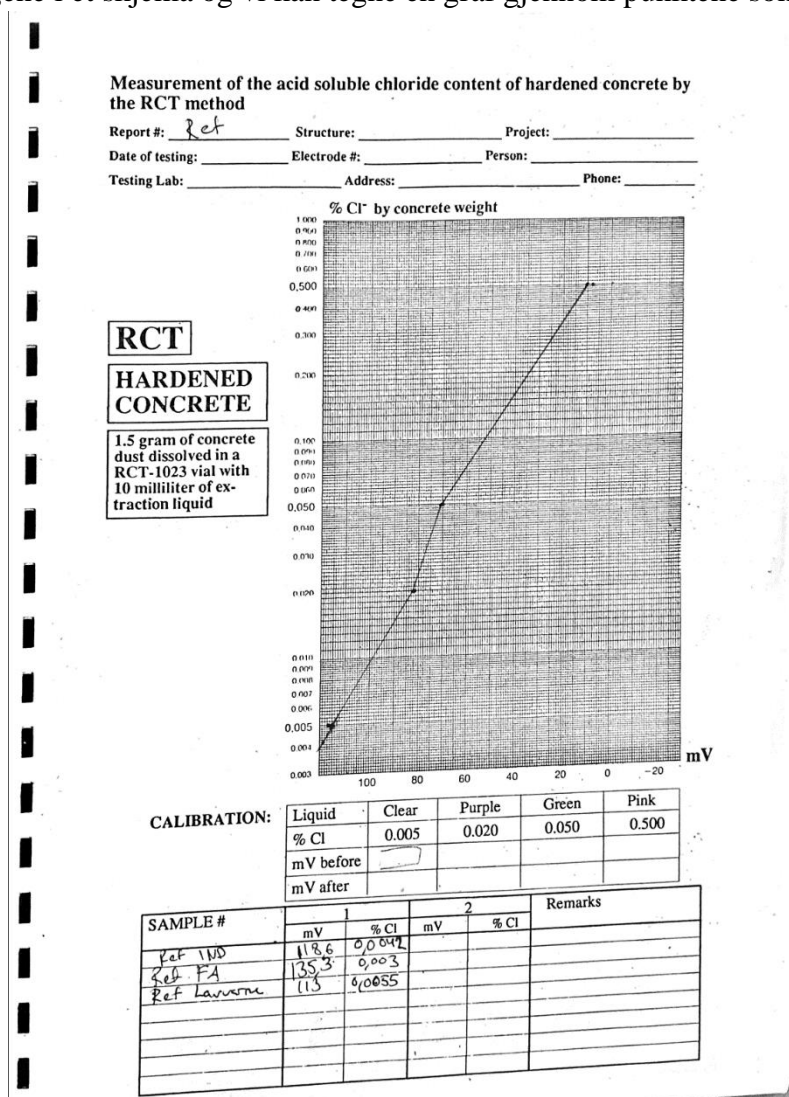


Figur 28: Boremaskin brukt for å samle betongstøv

Mellom hvert sjikt måtte vi passe på å nøye rengjøre boreutstyret, samt det utstyret vi brukte for å samle opp støvet, for å unngå at støvprøvene fra de forskjellige sjiktene skal bli blandet.

Etter at støv fra alle terningene var samlet boret vi ut referanseprøver fra en terning av hver betongtype som ikke var eksponert for NaCl for å få en grunnlinje for kloridnivået i betongene. Til slutt brukte vi en Rapid Chloride test til å måle kloridinnholdet i støvprøvene vi hadde samlet. 1,5 g betongstøv fra hvert sjikt ble veid opp og lagt i hver sin ampulle med ekstraksjonsvæske, ampullene ble ristet godt et par ganger før de skulle stå i minimum 12 timer.

Når ampullene hadde stått i 24 timer startet vi neste steg i prosessen. Først kalibrerte vi elektroden vi skulle bruke. Det gjøres ved å måle spenningen i 4 kalibreringsvæsker, deretter settes målingene i et skjema og vi kan tegne en graf gjennom punktene som på bildet under.



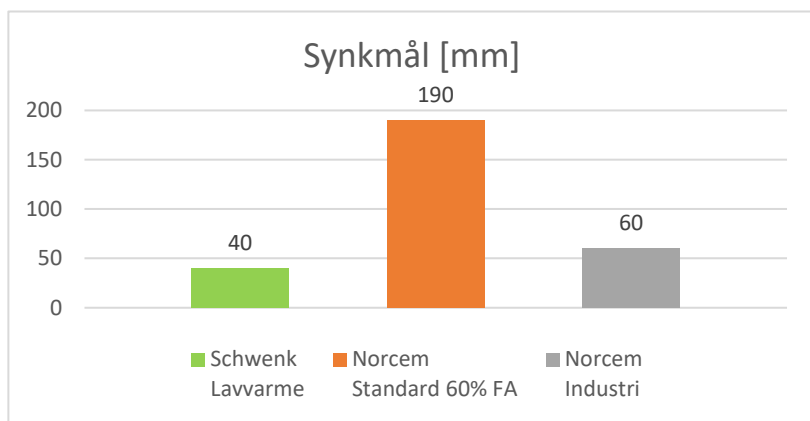
Figur 29: Måling av kloridinnhold i herda betong

Deretter målte vi spenningen i alle sjiktene for en terning. Fra grafen vi fikk av kalibreringen kunne vi lese av kloridinnholdet i støvprøvene fra spenningen vi målte. Kalibreringen måtte gjøres på ny for hver terning.

5. Resultater

5.1 Resultater Fersk Betong

5.1.1 Synkmål



Figur 30: Resultater av synkmål til blanding 2 for betong med Lavvarme-, Standard 60% FA- og Industrisement



Figur 31: Synkmål Standard 60% FA B2

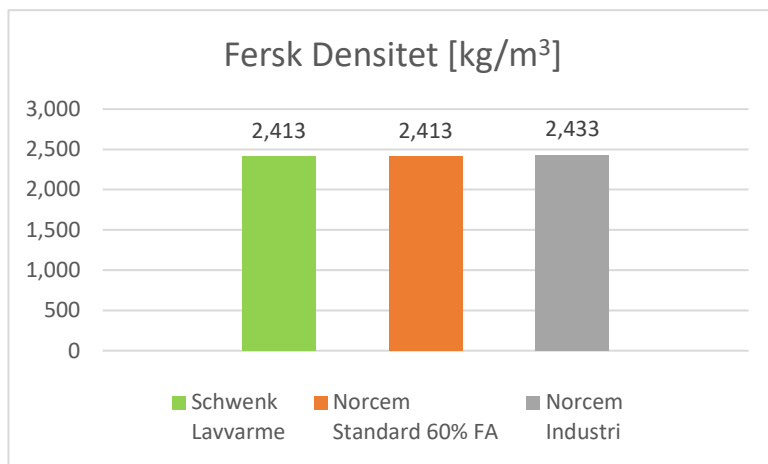
Kommentar:

Testen av synkmål ble for alle reseptene utført med blanding nummer 2 (B2). Ifølge Tabell 12 fra kapittel 4.3.1 hentet fra NS-EN 206 [32] vil betongen med Standard 60% FA ha synkklasser S4, mens blandingene med Lavvarme og Industri tilsvare synkklassene S1 og S2. Betongen med Standard 60% FA vil betegnes som flytende, den med Industrisement vil betegnes som plastisk, mens blandingen med Lavvarme hadde en stiv plastisk konsistens.

Det at Standard 60% FA gir et såpass høyere synkmål kan skyldes både det at denne resepten har en del høyere matriksvolum (370 l/m^3) enn de to andre (325 l/m^3), og at det ble brukt mye mer superplastiserende under denne blandingen.

Resultatene ovenfor viser samtidig at synkmålet ble en god del mindre enn det som egentlig er ønskelig, spesielt for betongene med Lavvarme og Industri som ble i overkant stive. Et såpass lavt synkmål vil føre til at betongen ikke har særlig god støpelighet, og det vil være vanskelig å oppnå en tilstrekkelig god komprimering og utfylling av formene. I ettertid ser vi at det gjerne burde bli tilsatt enda mer superplastiserende under blandingene for å oppnå et høyere synkmål og en bedre støpelighet. På grunn av manglende erfaring og feiltolkning av betongkonsistens under blandedprosedyren, ble resultatene fra synkmålstesten dermed ikke helt ideelle, og dette har muligens også hatt en del innvirkning på senere tester og resultater.

5.1.2 Fersk Densitet



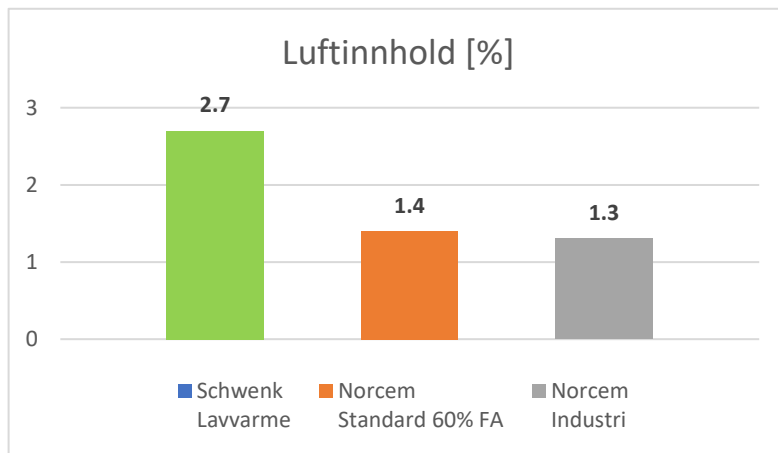
Figur 32: Resultater fersk densitet

Kommentar:

Målt densitet var så å si helt lik for alle de tre betongtypene. Verdiene er som forventet ettersom at de stemmer godt overens med det som er beregnet teoretisk i Excelprogrammet (2 443-, 2 410- og 2 452 kg/m³).

I tillegg viser resultatene på at alle reseptene karakteriseres som normalbetong ved at de har en densitet på mellom 2 000 kg/m³ og 2 600 kg/m³. [4]

5.1.3 Luftinnhold



Figur 33: Resultater luftinnholdmålinger

Kommentar:

Luftinnholdet som ble brukt i proporsjoneringsarket for alle reseptene var på 2 %. Testene av luftinnhold som ble gjort under blandingen, viste at betongen med Lavvarme hadde 0,7 % høyere luftinnhold enn det som var proporsjonert, mens betongene med Standard FA og Industri hadde 0,6 og 0,7 % lavere luftinnhold. Det sies at betongens fasthet reduseres med 5 % for hver prosent luftinnholdet øker [35], dermed vil en såpass liten økning som i dette tilfellet være av liten betydning.

5.1.4 Temperaturutvikling

Prosedyren for å måle temperaututviklingene de første dagene etter støping ble utført etter metoden beskrevet i *Kapittel 4.3.4*. Dessverre hadde temperaturmåleapparatet slått seg av i løpet av de første tre døgn, og alle målingene var blitt slettet. På grunn av manglende ressurser ved universitetet, var det ikke mulig å støpe å gjøre forsøket om igjen, så vi mangler derfor resultatene fra denne testen.

5.2 Resultater Herdet Betong

5.2.1 Trykkfasthet

Trykkfasthet, 1 døgn

Tabell 14: Trykkfasthet, Dag 1

Trykkfasthet, 1 døgn [MPa]		
Lavvarme	3.2	1.6
Standard 60% FA	3,5	3,5
Industri	19,3	19,2

Kommentar:

Etter 1 døgn kan vi se store forskjeller mellom trykkfastheten til de forskjellige betongtypene. Som forventet er det betongen med industrisement som har betraktelig høyere fasthet enn Standard 60% FA og Lavvarmen med sitt høye innhold av flygeaske og slagg.

Det må samtidig nevnes at disse resultatene er preget en del av diverse feilkilder som oppstod under blandedagen. Ved testing av Standard 60% FA- og Industrisement ble det brukt prøvestykker fra deres blanding 2 (B2), mens for Lavvarmen ble det brukt en fra blanding 1 (B1) og en fra blanding 2. Som nevnt tidligere *kapittel 4.4* herdet B1 for Lavvarme og Standard 60% FA inne i et godt oppvarmet romm, mens resten herdet i en kald garasje. Resultatene viser at for Lavvarme har B1 dobbelt så høy trykkfasthet enn B2, og dette skyldes nok disse ulike herdeforholdene det første døgnet.

I tillegg gjør nok også herdetiden at resultatene ikke er helt representative for å sammenligne fasthetsutviklingen det første døgnet. Alle de 6 blandingene ble blandet på samme dag, og det er derfor rundt 7-8 timer mellom den første og den siste blandingen. Ved testing dagen etter, hadde derfor naturligvis noen av prøveterningene fått herdet en god del lenger enn andre.

Trykkfasthet, 3 døgn

Tabell 15 viser resultatene fra trykktestingen etter at prøveterningene først hadde herdet 1 døgn i formene, og så 2 døgn med de ulike herdebetingelsene. Fra og med dette tidspunktet ble det for hver trykktest forsøkt å bruke en prøveterning fra hver blanding (B1 og B2).

Tabell 15: Trykkfasthet Dag 3

Trykkfasthet, 3 døgn [MPa]								
	Benk		Klimaskap		Vannbad		Vannbad+Benk	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
Lavvarme	13.1	14.1	7.3	3.2	11.9	11.3	11.9	11.3
Standard 60% FA	30.7	22.4	14.3	22.9	32.0	27.6	32.0	27.6
Industri	54.9	50.2	48.4	42.9	55.7	50.5	55.7	50.5

Trykkfasthet, 7 døgn

Tabell 16: Trykkfasthet, Dag 7

Trykkfasthet, 7 døgn [MPa]								
	Benk		Klimaskap		Vannbad		Vannbad + Benk	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
Lavvarme	36.3	33.2	15.0	15.7	40.7	35.6	39.5	43.4
Standard 60% FA	39.5	36.3	31.9	28.4	41.5	41.4	46.1	44.5
Industri	60.9	64.3	59.5	27.9	61.7	61.2	63.4	65.6

Trykkfasthet, 14 døgn

Tabell 17: Trykkfasthet, Dag 14

Trykkfasthet, 14 døgn [MPa]								
	Benk		Klimaskap		Vannbad		Vannbad + Benk	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
Lavvarme	43.7	45.0	26.6	24.5	59.0	54.0	57.1	54.2
Standard 60% FA	48.9	45.0	40.8	37.4	50.0	47.8	54.2	56.6
Industri	70.1	68.4	67.1	61.9	68.2	68.0	70.1	70.5

Kommentar:

Etter 3, 7 og 14 døgn kan man se at industrisementen fortsatt har klart høyest trykkfasthet etterfulgt av Standard 60% FA og til slutt Lavvarme. Resultatene viser også at fasthetsutviklingen for alle reseptene er nokså lik for prøveterningene som har herdet i *Vannbad*, *Vannbad+Benk*, og kun *Benk*. Det er egentlig forventet at herdebetingelsen *Vannbad* skal gi den raskeste utviklingen, men i våre resultater har faktisk *Vannbad+Benk* og *Benk* gitt litt raskere fasthetstvikling. Dette skyldes trolig at terningene som er plassert på benk har herdet i et rom med en del høyere temperatur enn det som er normal romtemperatur (20 °C). Betonglabben ved UiS har gjennom hele forsøket hatt veldig variert romtemperatur, og temperaturen har blitt spesielt høy etter varme solskinnsdager. Terningene som er lagt i *Vannbad* har også blitt plassert i et mindre rom på labben som har hatt noe lavere temperatur. Denne temperaturforskjellen kan ha økt hydratiseringsgraden og fasthetsutviklingen til betongprøvene som har herdet på *Benk*.

I tillegg viser resultatene at trykkfastheten for alle reseptene er lavest for terningene som har ligget i *Klimaskap* på 5 °C og 30 % RF, og at denne herdebetingelsen påvirker betongen med Lavvarme klart mest. Dette er som forventet ettersom hydratiseringshastigheten vil reduseres ved lavere temperaturer, og på grunn av Lavvarmes allerede lave varmeutvikling, vil fasthetsutviklingen til denne sementen påvirkes i størst grad.

Som nevnt tidligere, vil ifølge Norsk Betongforening, en betong med flygeaske og slagg ha langsommere fasthetsutvikling, men bruk av flygeaske vil gjøre betongen mindre

temperaturfølsom ved lave temperaturer. [15] Dette kan man også se ut ifra våre resultater ved at fasthetsutviklingen for prøveterningene med Standard 60% FA har mindre forskjeller mellom *Klimaskap* og de andre herdebetingelsene, sammenliknet med Lavvarmesement.

Det har oppstått noe avvik under trykktestingen, spesielt hvis man ser på resultatene fra *Dag 3-Lavvarme-Klimaskap*, og *Dag 7-Industri-Klimaskap*. På begge disse testene fikk B1 mer enn dobbelt så høy trykkfasthet enn B2. Dette kan skyldes små forskjeller mellom de ulike blandingene av samme resept, forskjellige herdeforhold det første døgnet, og/eller dårlig komprimering og utstøping av terningene. Selv om det er noe forskjeller i trykkfasthet mellom B1 og B2 av prøveterningene, viser resultatene samtidig at forskjellene generelt sett blir mindre og mindre utover herdeprosessen.

Trykkfasthet, 28 døgn

Tabell 18: Trykkfasthet, Dag 28

Trykkfasthet, 28 døgn [MPa]								
	Benk		Klimaskap		Vannbad		Vannbad + Benk	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
Lavvarme	54.2	44.4	32.0	32.3	59.7	58.2	67.0	65.8
Standard 60% FA	57.9	56.0	48.8	45.1	63.1	58.4	68.9	70.7
Industri	76.2	67.5	70.0	67.5	75.6	73.6	78.4	80.2

Kommentar:

Etter 28 døgn kan man se at betongen med Industrisement fortsatt har en del høyere trykkfasthet, og at herdebetingelsen *Vannbad+Benk* har gitt den største fastheten for alle tre reseptene

Samtidig ser man at Lavvarmen nærmer seg mer og mer samme trykkfasthet som Standard 60% FA for terningene som har ligget på *Benk* og i *Vannbad*. Også på dette tidspunktet ser vi at trykkfastheten for terningene i *Klimaskap* henger en del etter de andre herdebetingelsene for disse to sementtypene.

Kravene om karakteristisk trykkfasthet etter 28 dager er tidligere beskrevet i *kapittel 4.6.1.1*. Disse kravene tilsier at for å oppnå en betong med fasthetsklasse B50, skal gjennomsnittet av testene etter 28 dager ikke være lavere enn rundt 66 MPa, og ingen individuelle tester skal være lavere enn 56 MPa.

Resultatene våre etter 28 døgn viser at det foreløpig kun er betongen med Industrisement som fullstendig tilfredsstillende kravene om trykkfasthet for alle herdebetingelsene. Både for Lavvarme og Standard 60% FA er det kun terningene fra *Vannbad+Benk* som tilfredsstillende kravene, mens resten av herdebetingelsene fortsatt henger litt etter.

Trykkfasthet, 56 døgn

Tabell 19: Trykkfasthet, Dag 56

Trykkfasthet, 56 døgn [MPa]								
	Benk		Klimaskap		Vannbad		Vannbad+Benk	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
Lavvarme	60.0	40.7	35.1	33.9	77.4	69.4	77.2	56.4
Standard 60% FA	64.0	55.1	55.1	51.5	75.7	71.6	72.2	68.8
Industri	80.1	76.0	77.2	75.4	76.5	77.3	79.1	78.3

Kommentar:

Etter 56 dager ser vi at trykkfastheten fortsetter å stige for alle reseptene og herdebetingelsene, men i ulik grad. Lavvarmen har steget en god del for prøveterningene fra *Vannbad* og *Vannbad+Benk*, mens terningene på *Benk* og i *Klimaskap* har steget minimalt, og fortsatt ligger under det som er karakteristisk trykkfasthet etter 28 dager. Også på dette tidspunktet ser man nokså store avvik mellom blanding 1 og blanding 2. Dette skyldes som tidligere nevnt, mest sannsynlig forskjellig kvalitet på utstøyping og komprimering. Prøveterningene med Lavvarme var også uten tvil de terningene som hadde mest varierende mengde synlige sprekker og skader på overflatene, noe som kan føre til disse avvikene.

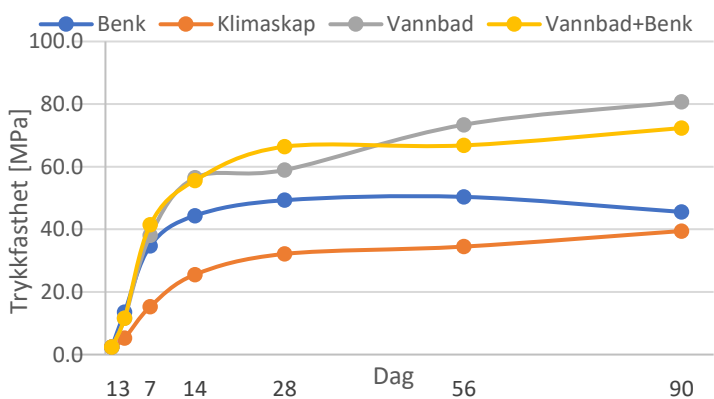
Terningene med Standard 60% FA har nå steget i trykkfasthet slik at de fra *Vannbad* også har oppnådd karakteristisk styrke, mens de fra *Benk* og *Klimaskap* begynner å nærme seg, men fortsatt ikke tilfredsstillende kravene helt. Betongen med *Industri*, som allerede har oppnådd karakteristisk trykkfasthet etter 28 dager, har også økt noe, men ser nå ut til å begynne å stabilisere seg på rundt 80 MPa.

Trykkfasthet, 90 døgn

Tabell 20: Trykkfasthet, Dag 90

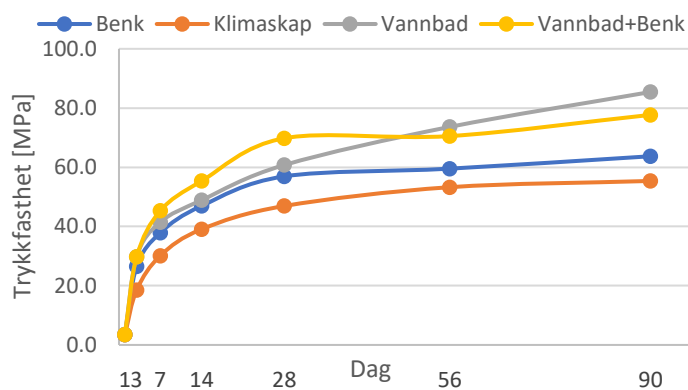
Trykkfasthet, 90 døgn [MPa]								
	Benk		Klimaskap		Vannbad		Vannbad+Benk	
Lavvarme	40,6	50,6	37,1	41,8	84,2	77,3	79,3	65,4
Standard 60% FA	57,3	70,2	56,5	54,3	89,9	81,0	80,3	75,1
Industri	77,2	75,7	78,7	75,5	83,0	84,7	84,7	85,7

Fasthetsutvikling Lavvarme



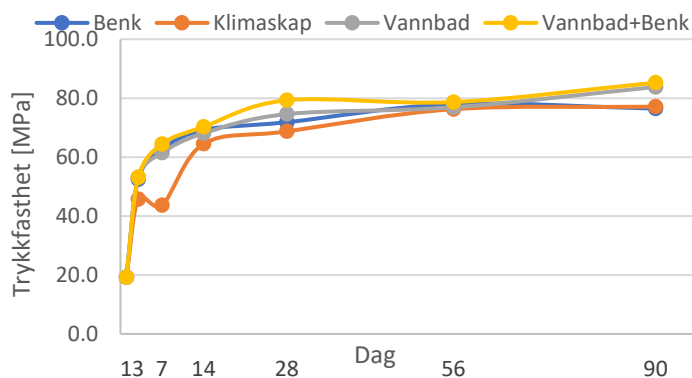
Figur 34: Fasthetsutvikling til betong med Lavvarmesement

Fasthetsutvikling Standard 60% FA



Figur 35: Fasthetsutvikling til betong med Standardsement 60% FA

Fasthetsutvikling Industri



Figur 36: Fasthetsutvikling til betong med Industrisement

Kommentar:

Resultatene etter trykktest på dag 90 viser noe endring av fasthet siden dag 56. Noen av terningene har fortsatt nokså lik trykkfasthet, mens andre har fått en økning av ulik grad.

For betongen med Lavvarmen ser det ut til at terningene som har herdet på *Benk* har sluttet å øke i fasthet, mens resten av herdebetingelsene har økt en liten del. Terningene som har ligget i *Klimaskap* og på *Benk* er med det fortsatt et godt stykke unna den karakteristiske trykkfastheten.

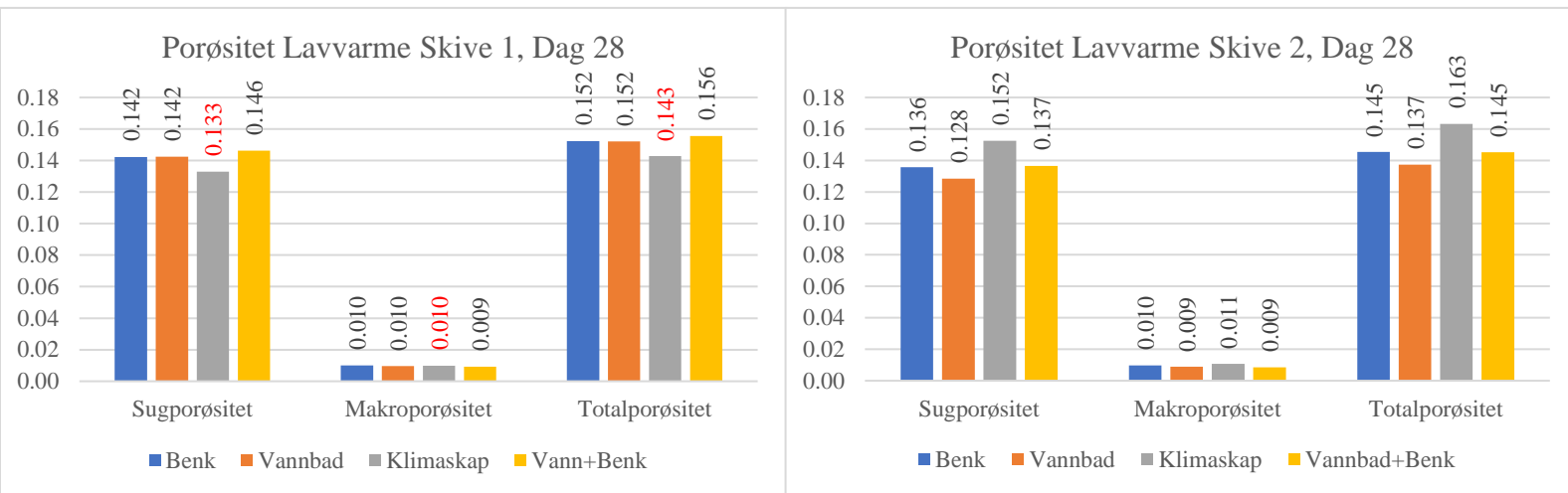
Utviklingen til betongen med Standard 60% FA ser ut til å ha økt minimalt for terningene fra *Benk* og *Klimaskap*, mens *Vannbad* og *Vannbad+Benk* har økt en god del. Akkurat det samme kan sies å gjelde for betongen med Industrisement, hvor som sagt, den karakteristiske trykkfastheten allerede er oppnådd for alle de ulike herdebetingelsene.

Figur 34-36 illustrerer fasthetsutviklingene til de forskjellige betongtypene og herdeforholdene de er blitt utsatt for. Grafene er tegnet ut ifra gjennomsnittsfastheten til de to testene som er gjort per resept og herdebetingelse, og noen av dem har derfor fått litt spesiell kurve på grunn av enkelte avvik. Likevel ser man en tydelig tendens av at alle sementtypene vil få høyest fasthet av herdebetingelsene *Vannbad* og *Vannbad+Benk*, mens de alle vil få lavest fasthet av å ha herde på *Benk* og i *Klimaskap*.

Figurene viser også at forskjellen mellom de ulike herdebetingelsene er klart størst for terningene med Lavvarmesement. Variasjonen for Standard 60% FA er litt mindre, mens utviklingen for Industrisement er nesten helt lik mellom de forskjellige herdebetingelsene.

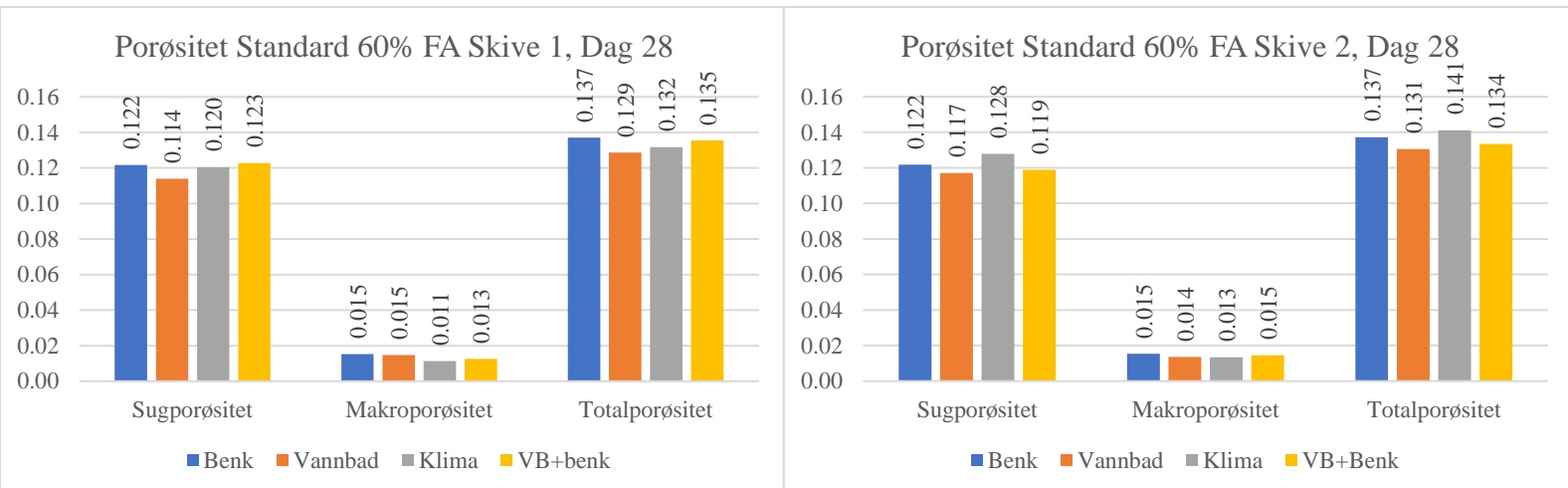
Fasthetsutviklingene viser også at frem til dag 28 er det herdebetingelsen *Vannbad+Benk* som har gitt den beste fasthetsutviklingen. Mellom dag 28 og dag 90 vil derimot *Vannbad* for alle reseptene ta igjen dette forspranget, og ende opp med den høyeste endelige trykkfastheten, som opprinnelig forventet. Dette tyder på at herdetemperaturen på *Benk* har bidratt en god del til fasthetsutviklingen i starten, men at dette også til slutt kan ha ført til en økt uttørking av betongen, som har gjort at utviklingen har begynt å stagnere.

5.2.2 PF-Metoden, Dag 28

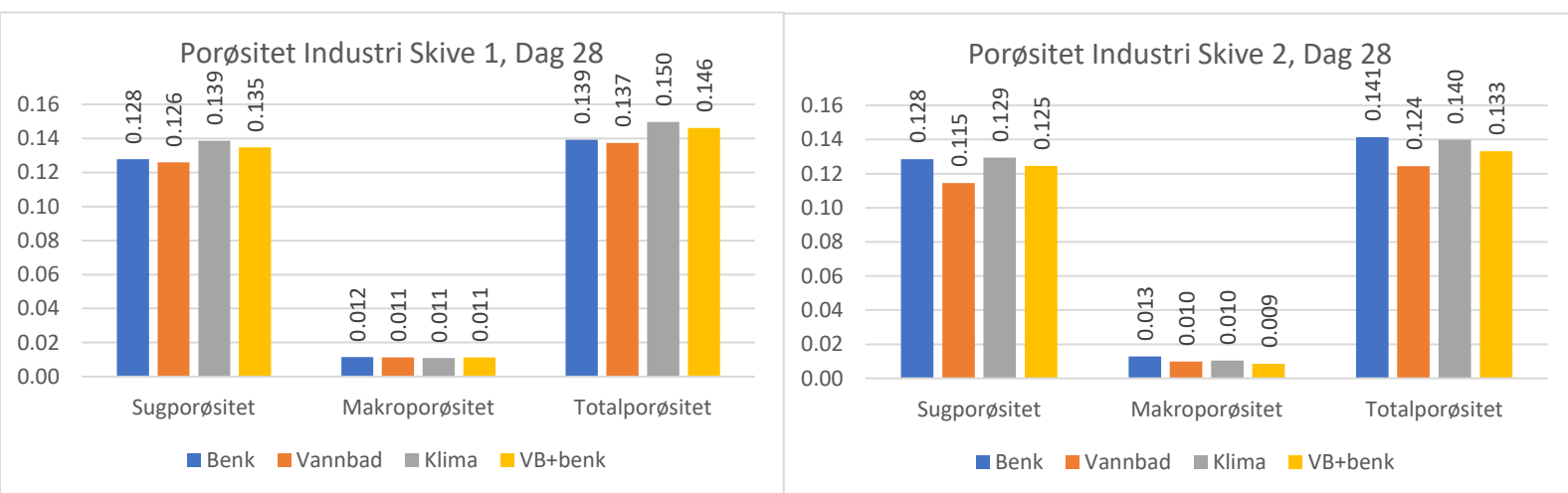


Figur 37: Porøsitet Skive 1&2 med Lavvarme sement etter 28 dager herding.

Resultat skive 1 Lavvarme Klimaskap ikke representativt ettersom den ble mistet i bakken og mistet noe vekt.



Figur 38: Porøsitet skive 1&2 med Standard 60% FA sement etter 28 dager herding.



Figur 39: Porøsitet skive 1&2 med Industri sement etter 28 dager herding.

En mer utfyllende oversikt over alle kalkulasjoner og resultater relatert til PF-Metoden står beskrevet i *Vedlegg A*

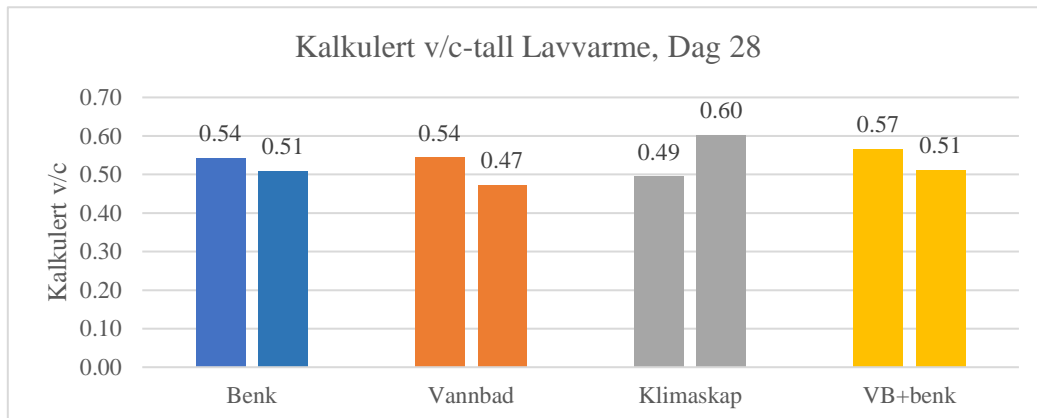
Figur 37-39 på forrige side viser at det er noe variasjon i porøsiteten til de ulike betongtypene og herdebetingelsene. Generelt sett virker det som at, for alle herdebetingelsene, er det Lavvarmen som har fått høyest totalporøsitet, etterfulgt av Industri og deretter Standard 60% FA. I tillegg har alle betongtypene fått høyest totalporøsitet for skivene som har herdet i *Klimaskap*. Dette kan skyldes at hydratiseringshastigheten vil avhenge av herdetemperaturen. Lav temperatur vil redusere hydratiseringshastigheten som igjen vil øke betongens porøsitet. I tillegg kan den lave luftfuktigheten i klimaskapet ha ført til uttørkningssvinn i større grad enn for resten av herdebetingelsene. Eventuelle sprekker som har blitt dannet på grunn av uttørkningssvinn, vil naturligvis føre til dårligere permeabilitet.

For de resterende herdebetingelsene er porøsiteten nokså lik. Likevel kan man se en tendens til at, for de aller fleste, har skivene fra *Vannbad* fått lavest porøsitet, etterfulgt av *Vannbad+Benk* og deretter *Benk*. Dette er som forventet ettersom jo lengre man holder betongen våt etter utstøping, desto lengre tid tar det før betongen får sjanse til å tørke ut, og dermed reduseres sannsynligheten for rissdannelser på grunn av plastisk svinn og uttørkningssvinn.

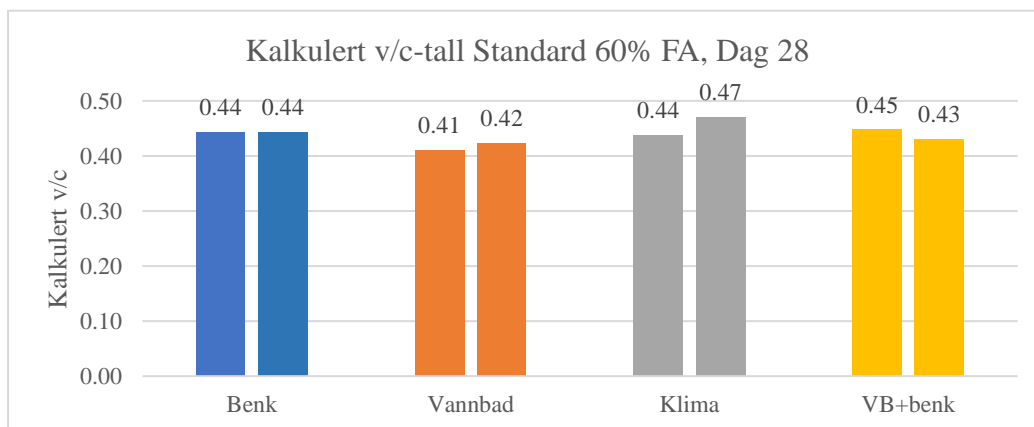
Det må også nevnes at disse resultatene nok er noe preget av litt avvik i kvalitet av betongen på grunn av en dårlig støpe- og komprimeringsprosess, etter en i overkant stiv fersk betong (se *Kapittel 5.1.1*). Unøyaktighet under tørking og veiing kan også ha vært av betydning. Samtidig viser resultatene en del forskjell mellom de ulike skivene av samme type betongprøve. Dette kan skyldes hvordan terningene har begynt å tørke ut ettersom de har herdet. Under kuttingen av betongterningene til PF-metoden ble det kuttet 2 skiver fra hver betongprøve, slik at den ene skiven er fra ca. midt i terningen, mens den andre er litt nærmere betongoverflaten. Ettersom betongen raskere vil tørke ut ved overflaten, kan skivene dermed få noe forskjellig porøsitet.

Det er også en betraktelig forskjell i porøsitet mellom skive 1 og 2 for Lavarmen fra *Klimaskap*, men dette skyldes at skive 1 ble mistet i bakken under veiing, og mistet med det en del av sin masse og vekt. Dette er grunnen til at porøsiteten for *Klimaskap* er en del lavere i

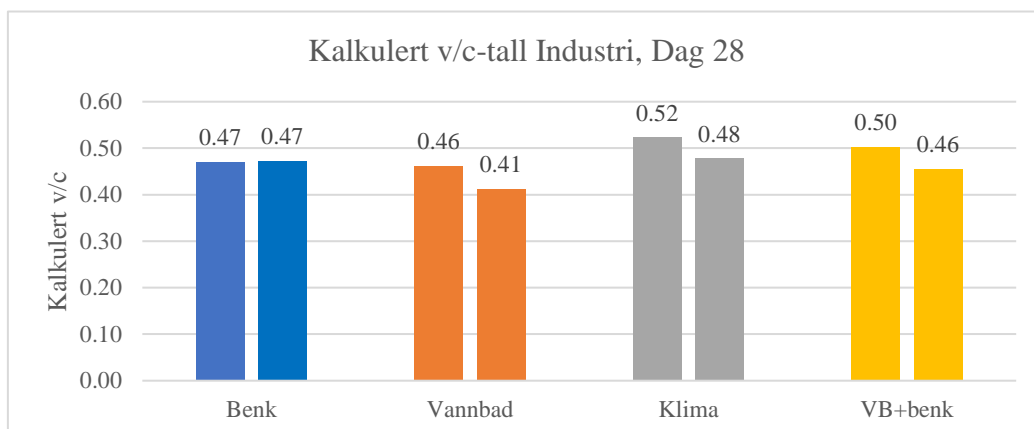
Figur 37, og akkurat dette resultatet er derfor ikke helt representativt for betongens porøsitet og permeabilitet.



Figur 40: Kalkulert masseforhold til Lavvarme etter 28 dager ifølge PF-metoden



Figur 41: Kalkulert Masseforhold til Standard 60% FA etter 28 dager ifølge PF-Metoden

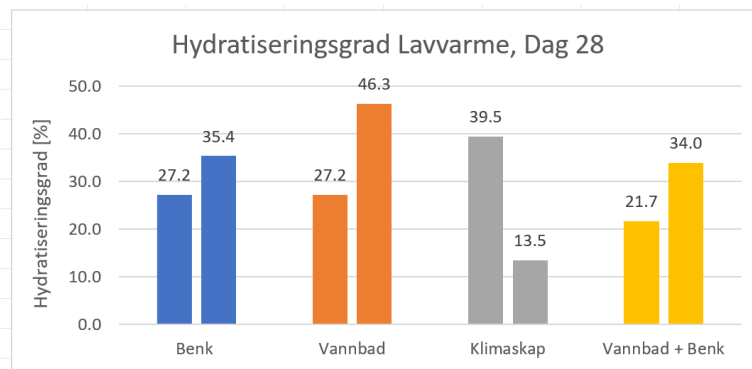


Figur 42: Kalkulert masseforhold til Industri etter 28 dager ifølge PF-Metoden

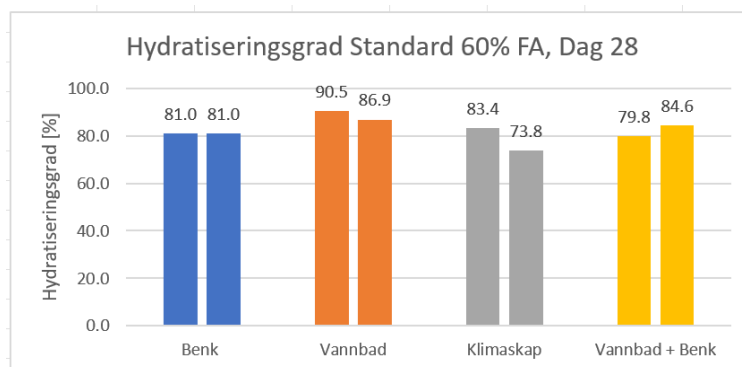
Det kalkulerede masseforholdet for skivene ble en del større enn det som opprinnelig var proporsjonert (0.38 og 0.39). Dette skyldes at formelen i PF-metoden som er oppgitt for å kalkulere masseforholdet, antar at betongen som er testet er gammel og har en

hydratiseringsgrad på 75%. I vårt tilfelle skal hydratiseringsgraden, ifølge *Figur 26* i *kapittel 4.6.2*, være noe lavere, på rundt 60 %.

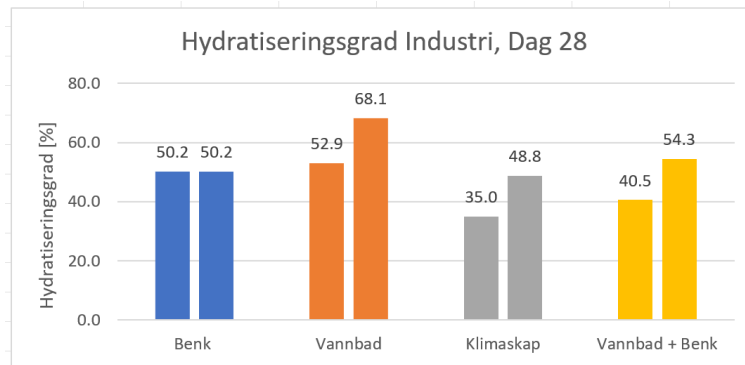
Formelen for kalkulert masseforhold i PF-Metoden avhenger også av betongens sugporøsitet, slik at en høy sugporøsitet vil gi et større masseforhold. Det at vårt kalkulerte masseforhold ble såpass mye større kan også skyldes, som nevnt tidligere, lavt synkmål som har ført til en dårlig støpelighet og komprimering, som igjen har gitt en høyere porøsitet enn planlagt. Det er også Lavvarmen og Industri som generelt sett har størst avvik fra det proporsjonerte v/c-tallet, noe som gir mening ettersom disse hadde betraktelig lavere synkmål enn betongen med Standard 60% FA. Også her er det forskjeller mellom de ulike skivene, trolig av samme grunn som nevnt tidligere, med at det er forskjell i porøsitet mellom den ytterste og innerste skiven.



Figur 43: Hydratiseringsgrad Lavvarme, Dag 28



Figur 44: Hydratiseringsgrad Standard 60% FA, Dag 28

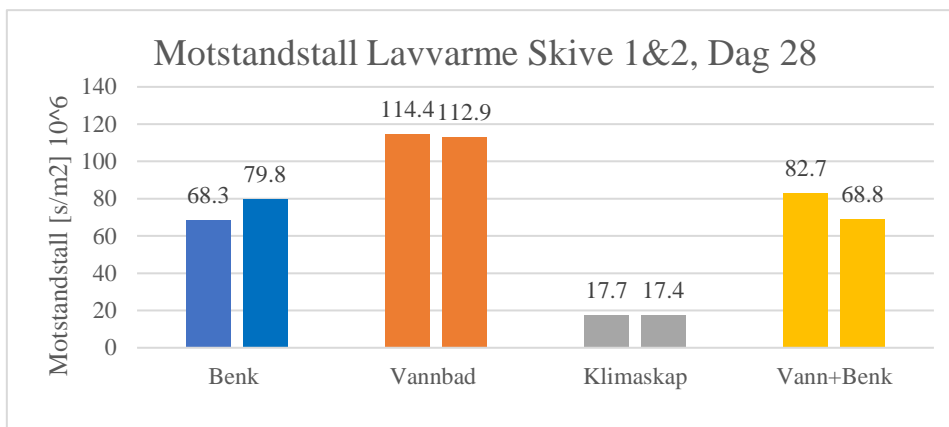


Figur 45: Hydratiseringsgrad Industri, Dag28

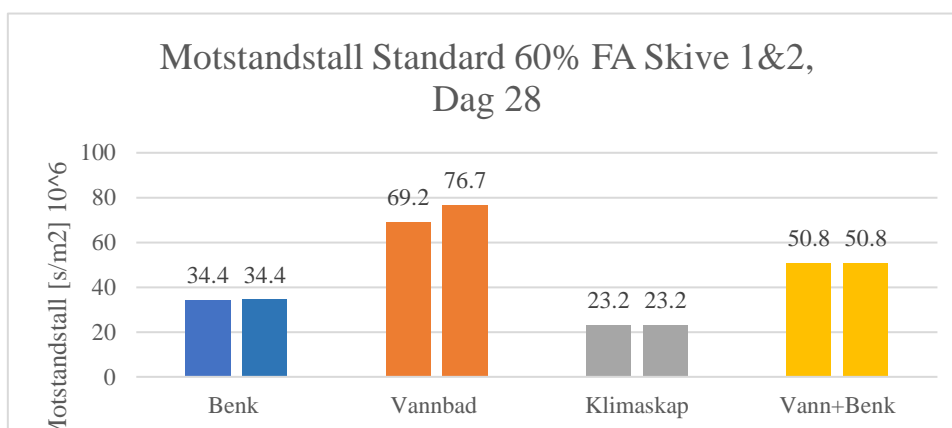
Figur 43-45 viser estimatene av hydratiseringsgraden til de ulike skivende brukt i PF-Metoden. På grunn av noe avvik i sugporøsitet mellom skivene, har det også blitt en del forskjeller i hydratiseringsgradene, spesielt for betongen med Lavvarmesement. Hydratiseringsgraden for Lavarme og Industri (bortsett fra *Vannbad*) har også blitt litt lavere enn det som var forventet ut ifra Figur 26 i kapittel 4.6.2. Den lave hydratiseringsgraden til Lavvarmen blir også gjenspeilet resultatene fra trykktestingen og dens trege fasthetsutvikling.

For betongen med Standard 60% FA, har derimot hydratiseringsgraden blitt en god del høyere enn forventet. Det kan skyldes at klinkerinnholdet er såpass lavt på grunn av det høye innholdet av flygeaske. Dette gjør at ved denne sammenhengen mellom porøsitet og hydratiseringsgrad vil v/c-tallet (spesielt verdien på «c») brukt i formelen ikke bli helt riktig.

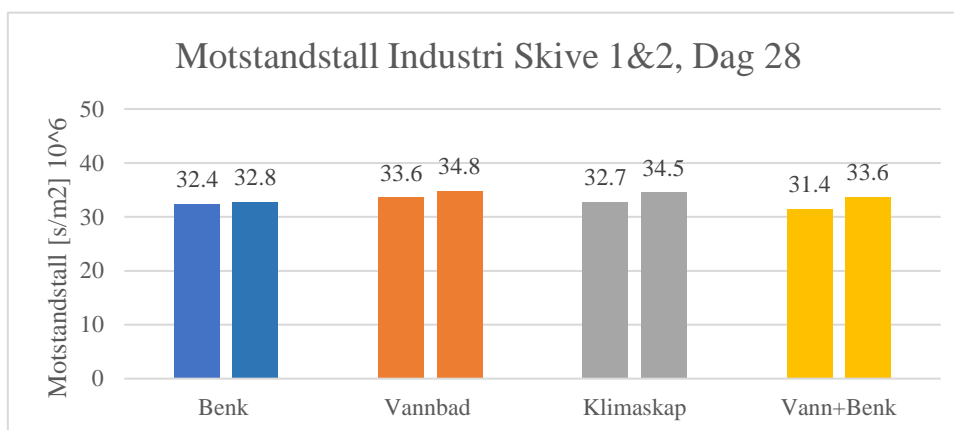
Selv om det er noe avvik i resultatene, tyder de likevel på at alle betongtypene generelt sett får høyest hydratiseringsgrad ved å ligge i *Vannbad*, deretter *Vannbad+Benk*, *Benk*, og til slutt *Klimaskap*. Dette er som forventet, bortsett fra at det er veldig liten forskjell mellom herdebetingelsene *Vannbad+Benk* og *Benk*, og i noen tilfeller har betongen faktisk høyere hydratiseringsgrad ved å kun ligge på *Benk*. Dette skyldes trolig, som nevnt tidligere, at disse prøveterningene har herdet i et rom med en del høyere temperatur enn det vannbadet har hatt. Høyere temperatur vil altså bidra til å øke hydratiseringsgrad og -hastighet.



Figur 46: Motstandstall til betong med Lavvarme sement, Dag 28



Figur 47: Motstandstall til betong med Standard 60% FA sement, Dag 28



Figur 48: Motstandstall til betong med Industri sement, Dag 28

Selv om disse resultatene nok er preget en del av diverse feilkilder under forsøket, er det fortsatt meget interessant å sammenligne de kalkulerte motstandstallene mellom de ulike betongtypene og herdebetingelsene. *Figur 46* og *47* viser at Lavvarme og Standard 60% FA har store forskjeller mellom de ulike herdebetingelsene. Begge har desidert høyest motstandstall for betongen som har ligget i *Vannbad* og lavest for betongen som har herdet i

Klimaskap. Lavvarmen har også høyere motstandstall enn Standard 60% FA for alle herdebetingelsene unntatt *Klimaskap*, hvor Standard 60% FA har litt høyere verdi. Dette gir også mening ved at dette er en flygeaskebetong, som ifølge *Norsk Betongforening Publikasjon 37* [15], vil gjøre den mindre temperaturfølsom ved lave temperaturer.

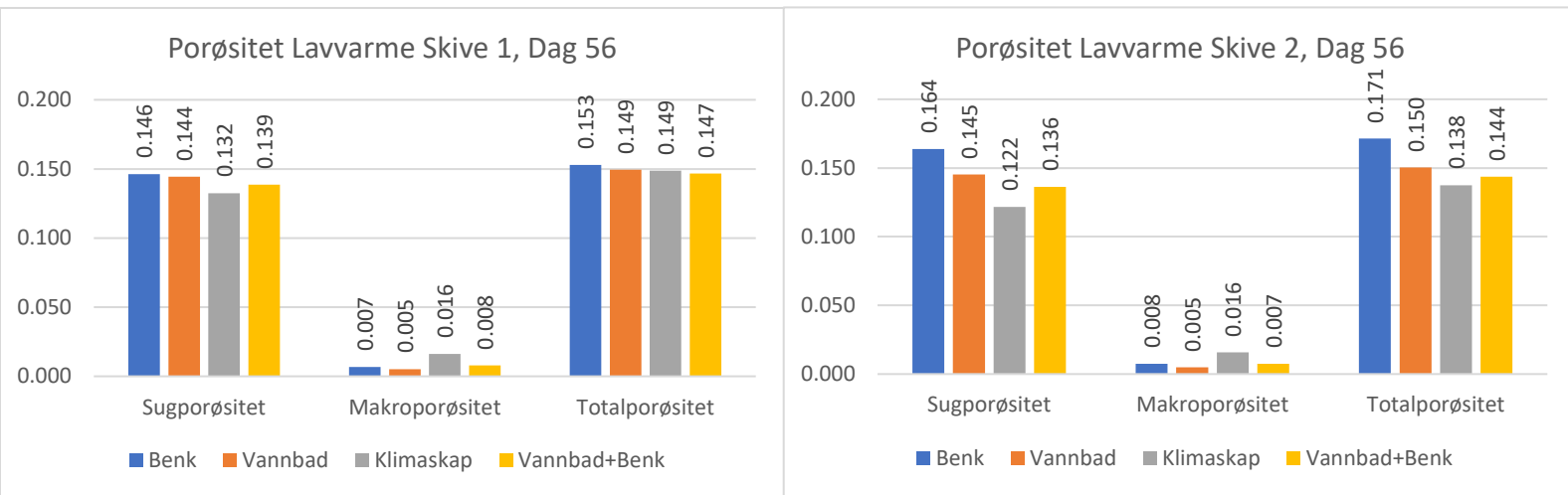
For betongen med Industrisement har resultatene gitt svært like verdier for motstandstall mellom de ulike herdebetingelsene. Det tyder på at permeabiliteten til denne betongtypen ikke blir særlig påvirket av hvilke herdeforhold den blir utsatt for under herdeprosessen.

Ved hjelp av *Figur 25* fra *kapittel 4.6.2*, proporsjonert v/c-tall (0.38 og 0.39) og kalkulert motstandstall til de ulike testskivene, kan man se at for Lavvarmen vil skivene fra *Benk* og *Vannbad+Benk* ligge i området for det som ses på som en nokså god permeabilitet for betong. Skivene som har herdet i *Vannbad* har en veldig god permeabilitet, mens de fra *Klimaskap* vil betraktes som en betong med ganske dårlig permeabilitet.

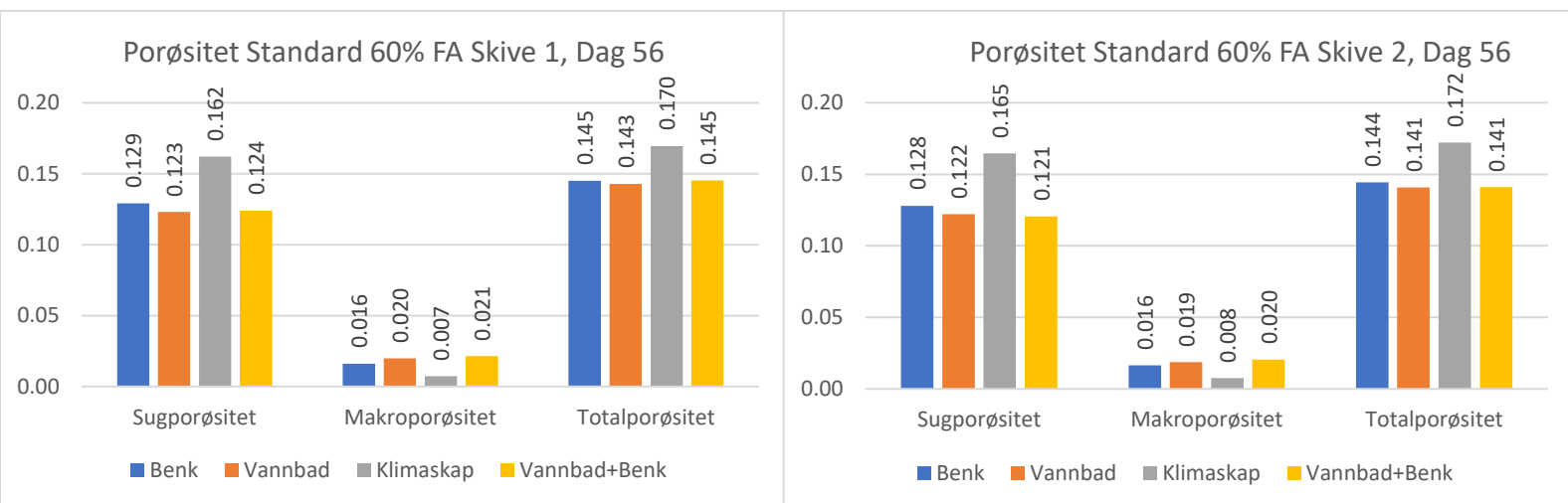
Motstandstallet for skivene med Standard 60% FA vil som sagt ha nokså lik tendens som for Lavvarmen, men med en del lavere verdier. Det gjør at skivene fra *Vannbad* vil betraktes som betong med god permeabilitet, *Vannbad+Benk* vil være helt på grensen til middels, mens *Benk* og *Klimaskap* vil ha en dårlig permeabilitet.

For betongen med Industrisement hvor herdeforholdene ikke vil ha noe særlig påvirkning på porøsitet, tyder resultatene på at denne betongen har en dårlig permeabilitet for alle herdebetingelser. Dette kan skyldes den dårlige støpingen og komprimeringen under blandedagen på grunn av i overkant stiv betong. Dette gjelder nok for de to andre betongtypene også, men for dem ser det ut til at gode herdeforhold i større grad vil klare å «redde» denne opprinnelige dårlige betongkvaliteten.

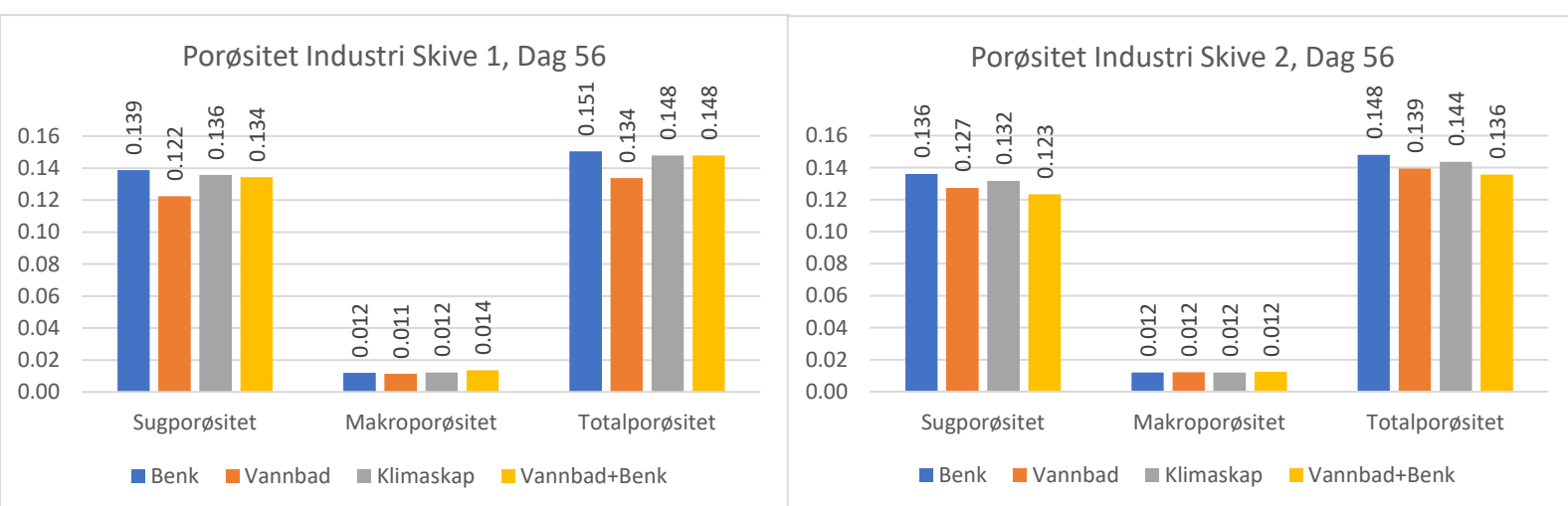
5.2.3 PF-Metoden, Dag 56



Figur 49: Porøsitet Skive 1&2 med Lavvarme sement etter 56 dager herding.



Figur 50: Porøsitet skive 1&2 med Standard 60% FA sement etter 56 dager herding.



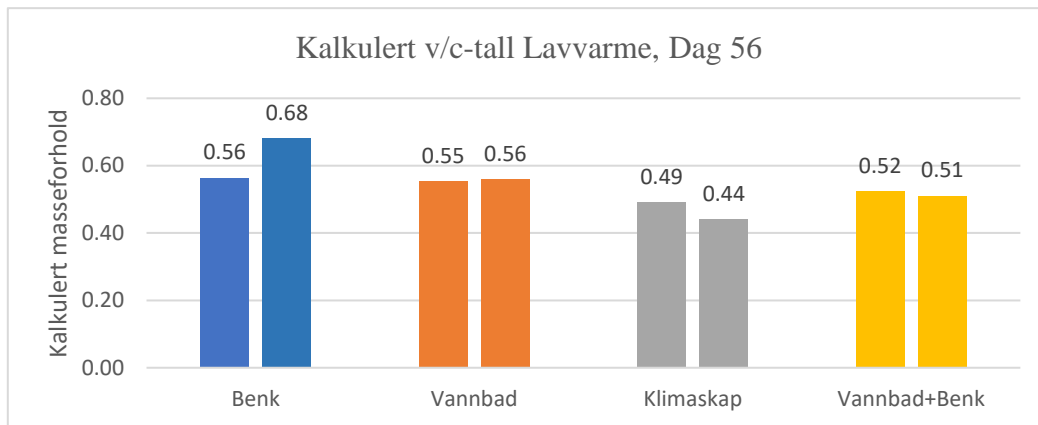
Figur 51: Porøsitet skive 1&2 med Industri sement etter 28 dager herding.

Også etter 56 dager viser PF-metoden at for de fleste herdebetingelsene vil betongen med Lavvarme generelt sett ha høyest totalporøsitet, etterfulgt av Industri og deretter Standard 60% FA.

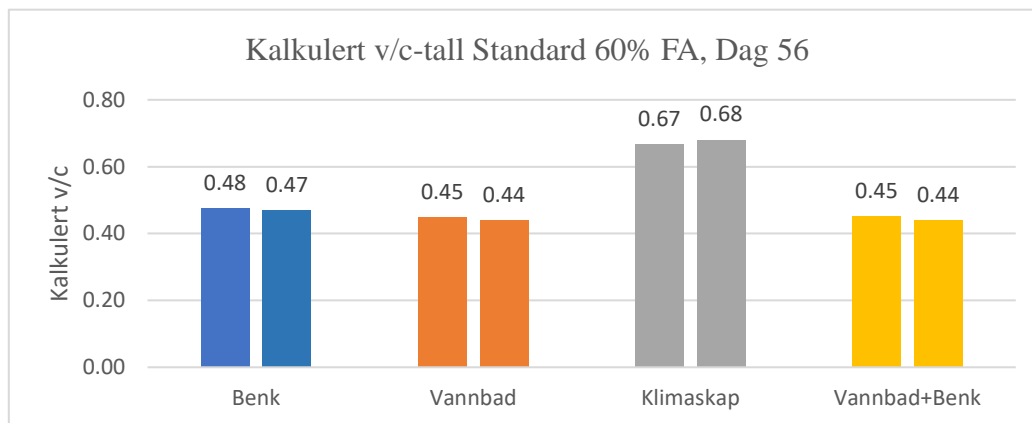
Også nå er det forventet at porøsiteten er lavest etter *Vannbad*, så *Vannbad+Benk*, så *Benk*, og til slutt *Klimaskap* med høyest porøsitet. Resultatene ovenfor varierer derimot noe fra denne forventningen. For betongen med Lavvarme vil nå porøsiteten være lavest etter å ha herdet i *Klimaskap*. En forklaring på dette kan være at ved lav temperatur vil hydratiseringen gå senere slik at porestrukturen som da dannes vil bli finere og tettere. Dette er også årsaken til at betong som herdner ved 5 °C kan oppnå en høyere langtidsfasthet enn betong herdnet ved for eksempel 35 °C.

Betongen med Standard 60% FA har svært like verdier for alle herdebetingelsene utenom *Klimaskap*, men følger til en viss grad det som er forventet. Skivene med Industrisement skiller seg derimot også litt ut ved at den nå har fått høyere porøsitet av herdebetingelsen *Benk* enn *Klimaskap*. Dette kan igjen skyldes den høye temperaturen på betonglabben, som nå har i lengre tid gjort at terningene har tørket ut og muligens ført til enda mer uttørkningssvinn.

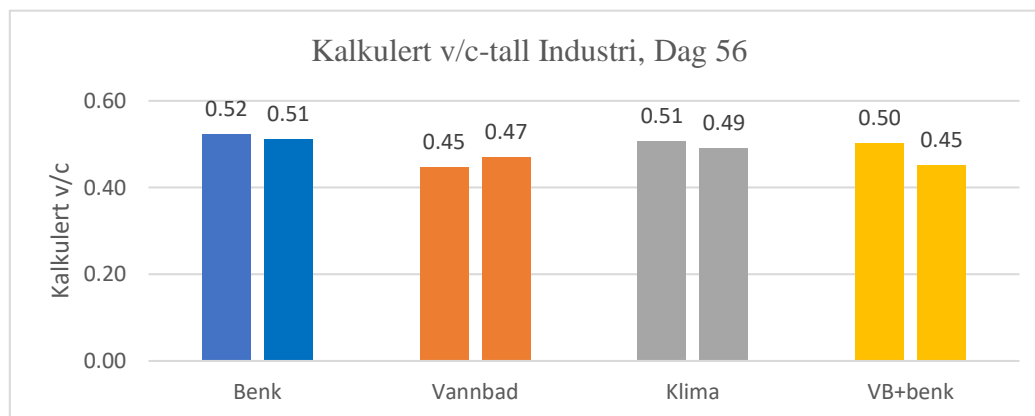
Resultatene viser også nå at betongene med Lavvarme og Standard 60% FA har en mye større variasjon i makroporøsitet mellom de forskjellige herdebetingelsene. Lavvarme har klart høyest makroporøsitet for skivene fra *Klimaskap*, mens Standard 60% FA har klart lavest makroporøsitet for skivene med samme herdebetingelse.



Figur 52: Kalkulert masseforhold til Lavvarme etter 56 dager ifølge PF-metoden

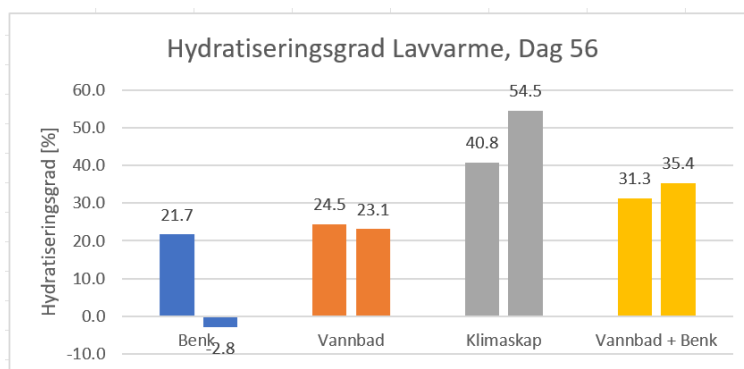


Figur 53: Kalkulert Masseforhold til Standard 60% FA etter 56 dager ifølge PF-Metoden

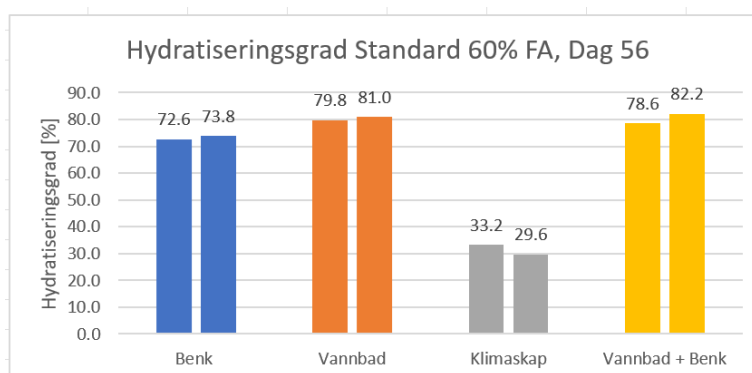


Figur 54: Kalkulert masseforhold til Industri etter 56 dager ifølge PF-Metoden

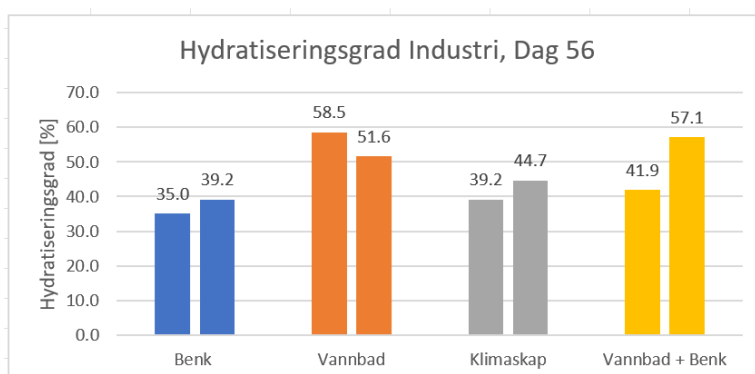
De kalkulte masseforholdene fra PF-Metoden etter 56 dager har også gitt en del høyere verdier enn det som opprinnelig var proporsjonert (0.38 og 0.39). Dette skyldes trolig det samme som nevnt ved dag 28, at den stive ferske betongen har ført til en dårlig utstøping og komprimering, som igjen har gitt en mer porøs betong enn forventet.



Figur 55: Hydratiseringsgrad Lavvarme, Dag 56



Figur 56: Hydratiseringsgrad Standard 60% FA, Dag 56

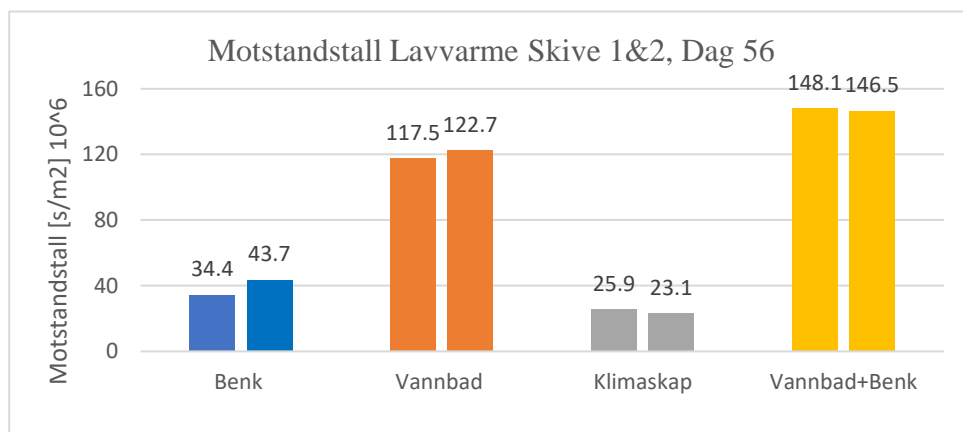


Figur 57: Hydratiseringsgrad Industri, Dag 56

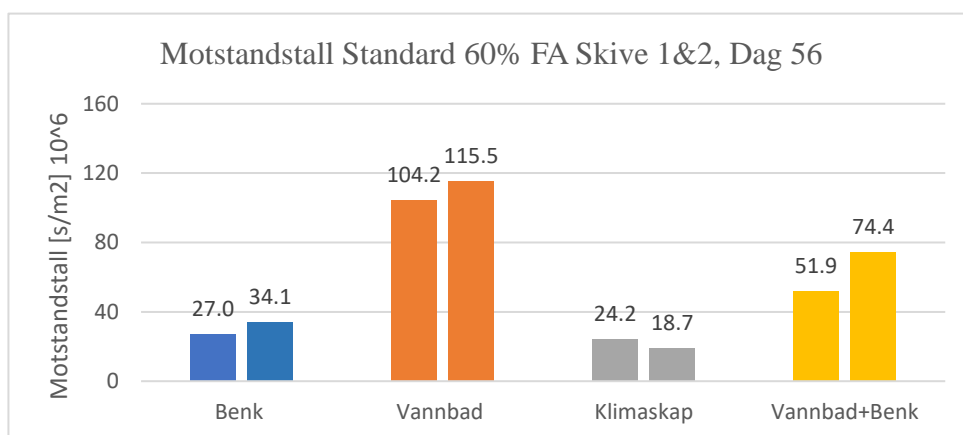
Resultatene av hydratiseringsgrad etter 56 døgn med herding viser en god del endring i hydratiseringsgraden siden dag 28. For Lavvarmen har den gått ganske mye ned for herdebetingelsen *Benk*, mens den har gått en god del opp for *Vannbad* og *Klimaskap*. Dette kan skyldes den trege utviklingen til lavarmesement som gjør at det tar litt tid før hydratiseringsgraden komme ordentlig i gang. Terningene fra *Benk* har trolig fått lavere hydratiseringsgrad ettersom den i stor grad har tørket ut og fått høy sugporøsitet.

Hydratiseringsgraden til den ene skiven for Lavvarme *Benk* har også fått negativ verdi, noe som ikke gir mening i denne sammenheng. Vi er litt usikre på årsaken til dette, men det kan muligens tyde på at akkurat denne prøven har hatt en unormal høy sugporøsitet, som gjør den uegnet for bruk i formelen for hydratiseringsgrad.

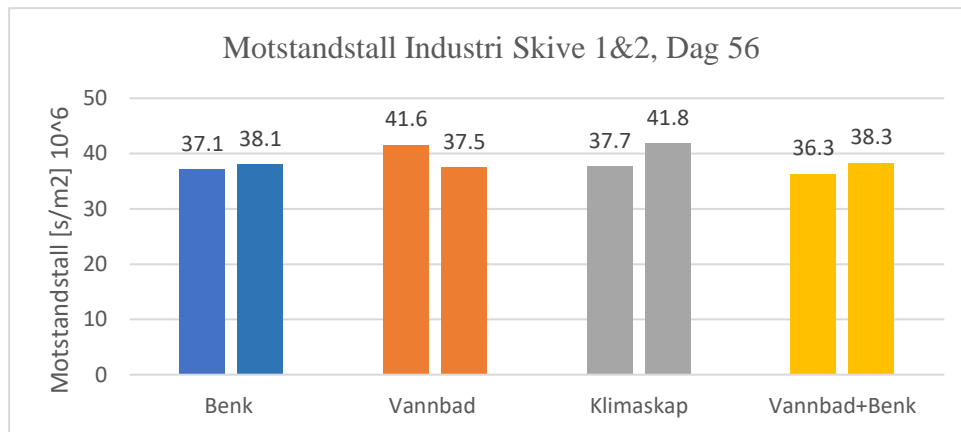
For betongen med Industrisement og Standard 60% FA har hydratiseringsgraden gått en god del ned for de fleste herdebetingelsene (spesielt mye for Standard 60% FA *Klimaskap*). Ifølge *Figur 26 kapittel 4.6.2* burde hydratiseringsgraden egentlig heller ha gått litt opp nå, og vi er usikre på hva som er årsaken akkurat til dette.



Figur 58: Motstandstall til betong med Lavvarme sement, Dag 56



Figur 59: Motstandstall til betong med Standard 60% FA sement, Dag 56



Figur 60: Motstandstall til betong med Industri sement, Dag 56

Når det kommer til motstandstallene etter 56 dager er det også en del endringer siden dag 28. For betongen med Lavvarme har motstandstallet blitt redusert nokså mye for skivene fra *Benk*. Dette kan skyldes at de har over lengre tid blitt utsatt for uttørking, noe som kan ha ført til økt sprekkdannelse og porøsitet. Samtidig viser resultatene at skivene som først lå noen dager i vannbad for å så å herde på benk, nå har fått betraktelig høyere motstandstall siden sist. Skivene med Lavvarme som har ligget i *Vannbad* og *Klimaskap* har nokså likt, men litt høyere motstandstall som det de hadde etter 28 dager.

Motstandstallene til betongprøvene med Standard 60% FA har nokså lik tendens som ved 28 dager, bortsett fra at skivene som har ligget i *Vannbad* har økt betraktelig. Det kan tyde på at ved denne herdebetingelsen vil hydratiseringen i stor grad fortsette etter 28 døgn ettersom det fortsatt er nok fukt til stede i betongen. Dette vil dermed føre til at motstandstallet øker.

For betongen med Industrisement vil motstandstallet være nesten helt likt motstandstall uavhengig av de ulike herdebetingelsene, og kun minimalt høyere verdi, sammenlignet med resultatene etter 28 dager. Dette tyder igjen på at betongen med Industrisement ikke vil bli særlig påvirket av hvilke herdeforhold den blir utsatt for.

Ved å igjen analysere resultatene fra PF-Metoden etter 56 dager ved hjelp av *Figur 25* fra *kapittel 4.6.2*, vil man nå se at for Lavvarmen har herdebetingelsene *Benk* og *Klimaskap* gitt en dårlig permeabilitet, mens *Vannbad* og *Vannbad+Benk* har gitt en veldig god permeabilitet.

Prøvene med Standard 60% FA har en veldig god permeabilitet etter å ha ligget i *Vannbad*, middels kvalitet for herdebetingelsen *Vannbad+Benk*, og dårlig kvalitet for herding på *Benk* og i *Klimaskap*.

Motstandstillene for betongen med Industrisement har som sagt kun økt minimalt siden testen ble gjort etter 28 dager. Derfor vil alle prøvene og alle herdebetingelsene fortsatt gi en dårlig permeabilitet ifølge *Figur 25*. Igjen, så kan dette skyldes den dårlige blandeprosessen. Det kan altså tenkes at ved å bruke en del mer superplastiserende i den ferske betongen, kunne vi fått en bedre støpelighet og komprimering, som igjen kunne gitt en bedre og mer akseptabel kvalitet med tanke på permeabilitet til denne betongtypen også.

5.2.4 Kloridpermeabilitet

Vi hadde 3 målepunkter per terning og satte en fjerde måling på 50 mm lik referansen for hver resept. Excelarket vi brukte krevde 6 verdier for å lage en kurve og vi interpolerte dermed de to siste verdiene på 10 og 40 mm. Kloridprofilene grafene er vist i *Vedlegg B*.

I resultatene forventet vi å se at for Standard 60% FA og Lavvarme ville *Vannbad* få lavest diffusjonskoeffisient, deretter *Vannbad+Benk*, så *Benk* og *Klimaskap* med den høyeste verdien. Fra resultatene på PF-metoden så vi at Industri var lite påvirket av herdebetingelsene, og vi forventet derfor å se lignende resultater her, med liten forskjell på diffusjonskoeffisienten mellom herdebetingelsene.

Tabell 21: Referanseverdier

Referanseverdier	Standard 60%FA	Lavvarme	Industri
	0,003	0,0055	0,0042

Standard 60% FA:

Tabell 22: Resultater Kloridinntrengning Standard 60% FA

<i>Mm</i>	<i>FA V+B</i>	<i>FA Benk</i>	<i>FA Klimaskap</i>	<i>FA Vannbad</i>
5	0,37 %	0,35 %	0,52 %	0,27 %
15	0,098 %	0,022 %	0,22 %	0,01 %
25	0,7 %	0,0175 %	0,13 %	0,004 %
<i>D (10⁻¹²m²/s)</i>	16,46	8,28	43,92	7,7

Kommentar:

Målt verdi på herdebetingelse *Vannbad+Benk* 25 mm sjiktet var 0,7% som umulig stemmer når forrige sjikt var langt lavere, vi har derfor sett bort fra den og brukt en interpolert verdi som er mer lik det man kan forvente der. Verdien på 15 mm er også noe høy, og medfører en veldig høy diffusjonskoeffisient. For *Klimaskap* gjør høye målinger på 15 og 25 mm sjiktet at kurven i Excel flater ut, og vi får en urimelig høy diffusjonskoeffisient som ikke kan stemme.

Vannbad har som forventet fått lavest diffusjonskoeffisient, *Klimaskap* har som forventet fått høyest, men den er som nevnt urimelig høy. Deretter har *Vannbad+Benk* fått en unormal høy verdi, der kan det se ut som har skjedd noe galt ved innhenting av støv, da verdien på 25mm sjiktet er umulig høy og dermed sett bort ifra, og verdien på 15 mm sjiktet sammenlignet med *Benk* og *Vannbad* er unormal høy. Dette gjør at diffusjonskoeffisienten på *Vannbad+Benk* også blir unormal høy og må ses bort ifra.

Lavvarme:

Tabell 23: Resultater Kloridinntrengning Lavvarme

<i>Mm</i>	<i>Lav V+B</i>	<i>Lav Benk</i>	<i>Lav Klimaskap</i>	<i>Lav Vannbad</i>
5	0,58 %	0,25 %	0,5 %	0,5 %
15	0,11 %	0,013 %	0,1 %	0,084 %
25	0,1 %	0,016 %	0,015 %	0,076 %
<i>D (10⁻¹²m²/s)</i>	12,55	7,33	12,29	9,75

Kommentar:

Vannbad+Benk får en uforventet høy diffusjonskoeffisient. *Benk* har på motsatt side fått målt et urimelig lavt kloridinnhold på 5 mm sjiktet og får derfor litt lavere diffusjonskoeffisient.

På Lavvarme er ikke resultatene helt som forventet. *Benk* har fått en urimelig lav måling av kloridinnhold på 5 mm og kan derfor ikke ses på som representativt. *Vannbad* får litt lavere diffusjonskoeffisient enn *Vannbad+Benk* og *Klimaskap*. Her forventet vi større forskjeller da herdebetingelser ofte påvirker lavvarme i stor grad.

Benk har fått en unormal måling av klorider på sjikt 0-10 mm og må ses bort fra. Ser man bort ifra det er det som forventet at vannbad har gjort det best, men *Vannbad+Benk* er veldig lik *Klimaskap*, og faktisk litt høyere, noe som var uforventet.

Industri:

Tabell 24: Resultater Kloridinntrengning Industri

<i>Mm</i>	<i>Ind V+B</i>	<i>Ind Benk</i>	<i>Ind Klimaskap</i>	<i>Ind Vannbad</i>
5	0,59	0,55	0,38	0,33
15	0,098	0,09	0,015	0,022
25	0,022	0,024	0,04	0,013
<i>D (10⁻¹²m²/s)</i>	10,85	10,53	9,91	9,83

Kommentar:

Klimaskap har fått en lavere måling på 5 og 15 mm enn forventet sammenlignet med de andre herdebetingelse. Det gjør at kjøll får en diffusjonskoeffisient som er lavere enn *Benk* og *Vannbad+Benk*, der vi egentlig forventet det motsatte.

Det er forventet at Industri skal være mindre påvirket av herdebetingelsene og det viser igjen på resultatene. Det er lite forskjell i diffusjonskoeffisientene, uforventet at *Klimaskap* har fått lavere enn *Benk* og *Vannbad+Benk*, ellers er resultatene som forventet.

6. Miljøregnskap

Som tidligere nevnt er det sementen som står for mesteparten av klimagassutslippet knyttet til bruk av betong i byggekonstruksjoner. Sementen er det delmaterialet i betongen som står for over 90 % av utslippet [15], og vi har i dette miljøregnskapet derfor valgt å fokusere på forskjellen i klimagassutslipp som skyldes sementbruken til de ulike betongtypene.





Miljøregnskapet tar for seg det totale klimagassutslippet til de ulike sementtypene som er blitt brukt i labbforsøket i denne oppgaven, Schwenk Lavvarme, Norcem Standard FA og Norcem Industri. Dette er gjort ved hjelp av deres representative EPD-er, som er vist i *Tabell 25-30*. En mer utfyllende beskrivelse av hva som inngår i en EPD er tidligere beskrevet i *kapittel 2.7.4*.

Schwenk Lavvarmesement:

Tabell 25: Produktspesifikasjon Schwenk Lavvarmesement [39]

Materiale	Kg	%
Tilsetningsstoff	20,40	1,81
Tilslag	40,77	3,62
Råmaterialer, Mineraler	343,04	30,48
Tilsetningsmaterialer	721,27	64,09
Total	1 125,47	

Tabell 26: Miljøpåvirkning Schwenk Lavvarmesement [39]





Miljøpåvirkning (Environmental impact)						
Parameter		Unit	A1	A2	A3	A4
	GWP-total	kg CO ₂ -eq	1,05E+00	8,33E+00	2,13E+02	2,97E+01
	GWP-fossil	kg CO ₂ -eq	1,03E+00	8,33E+00	2,12E+02	2,97E+01
	GWP-biogenic	kg CO ₂ -eq	1,23E-02	3,61E-03	8,31E-01	1,42E-02
	GWP-luluc	kg CO ₂ -eq	8,73E-04	2,65E-03	5,98E-02	1,43E-02

Norcem Standardsement FA:

Tabell 27: Produktspesifikasjon Norcem Standardsement FA [40]

Materiale	%
Klinker	71,2
Gips	4,8
Flyveaske	18,0
Kalksteinsfiller	6,0

Tabell 28: Miljøpåkjennning Norcem Standardsement FA [40]





Miljøpåvirkning (Environmental impact)						
Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4	
 GWP-total	kg CO ₂ -eq	2,28E+00	1,33E+01	5,52E+02	2,50E+00	
 GWP-fossil	kg CO ₂ -eq	2,26E+00	1,33E+01	5,52E+02	2,50E+00	
 GWP-biogenic	kg CO ₂ -eq	2,20E-02	3,76E-03	9,03E-02	5,10E-04	
 GWP-luluc	kg CO ₂ -eq	3,03E-03	8,31E-03	1,79E-02	9,65E-04	

Norcem Industrisement:

Tabell 29: Produktspesifikasjon Norcem Industrisement [41]

Materiale	%
Klinker	90,2
Gips	5,5
Kalksteinfiller	4,3

Tabell 30: Miljøpåkjennning Norcem Industrisement [41]

Miljøpåvirkning (Environmental impact)						
Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4	
 GWP-total	kg CO ₂ -eq	1,83E+00	5,44E+00	6,99E+02	2,50E+00	
 GWP-fossil	kg CO ₂ -eq	1,81E+00	5,44E+00	6,99E+02	2,50E+00	
 GWP-biogenic	kg CO ₂ -eq	1,83E-02	1,88E-03	1,12E-01	5,10E-04	
 GWP-luluc	kg CO ₂ -eq	7,28E-04	3,37E-03	2,23E-02	9,65E-04	

Alle EPD-ene har en deklarerert enhet på 1 tonn sement. Tabellene ovenfor viser at Schwenk Lavvarme vil gi et totalt klimagassutslipp på 252.08 kg CO₂ -eq/tonn sement, Norcem Standard FA vil gi et utslipp på 570.08 kg CO₂ -eq/tonn sement, og Norcem Industri vil føre til et utslipp på 708.77 kg CO₂ -eq/tonn sement. Lavvarmesementen gir altså et betydelig lavere miljøpåkjenning enn de to andre sementtypene. Industrisementens klart høyest GWP er også som forventet på grunn av dens høye innhold av sementklinker.

Ved å bruke verdiene ovenfor, proporsjoneringarkene til de ulike betongtypene brukt i prøveprogrammet, og *Tabell 1* fra *kapittel 2.7.1*, kan man komme frem til et estimat av hvilken lavkarbonklasse betongtypene vil tilhøre.

Verdiene i *Tabell 1* er oppgitt i kg CO₂ -ekv. pr m³ betong, og ifølge proporsjoneringsarket for betongen med **Lavvarme** sement, vil man trenge rundt 411.74 kg sement for å blande 1 000 liter (1 m³) av denne betongtypen. Det vil altså føre til at Lavvarmen vil ha et klimagassutslipp på rundt **103.8 kg CO₂ -ekv. pr m³ betong**, noe som ifølge *Tabell 1* vil klassifisere den som **Lavkarbon Ekstrem** betong.

For betongen med **Standard FA** er det tilsatt en del ekstra flygeaske, men ettersom dette er et sekundært produkt fra annen produksjon, er dens klimagassutslipp allokert til den opprinnelige prosessen. Derfor vil ikke den ekstra tilsetningen av flygeaske påvirke dette miljøregnskapet på noen annen måte enn at det bare vil redusere mengden sement som trengs i betongen. For å blande 1 000 liter betong med Standardsement 60 % FA trenger man da kun ca. 259.53 kg sement. Det vil føre til et klimagassutslipp på rundt **147.95 kg CO₂ -ekv. pr m³ betong**, som tilsvarer en betong i **Lavkarbon Pluss** klassen.

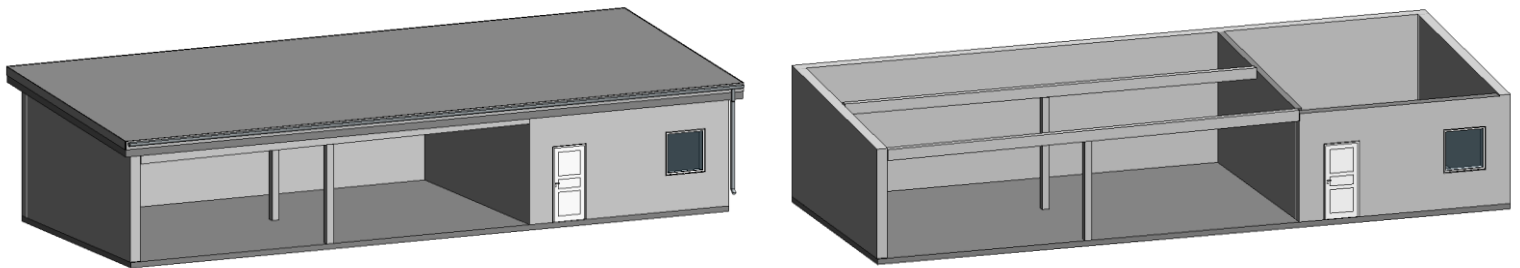
Betongen med **Industrisement** vil trenge rundt 415.26 kg sement for å blande 1 000 liter. Ut ifra GWP-verdiene fra dens EPD, vil det gi et utslipp på rundt **294.32 kg CO₂ -ekv. pr m³ betong**. Dette vil altså klassifisere denne betongtypen helt på grensen mellom **Bransjereferansen** og **Lavkarbon B**.

Noe som også er interessant å se på sementenes EPD-er, er at Schwenk Lavvarmesement har et betydelig høyere klimagassutslipp når det kommer til transport til markedet (A4). For denne indikatoren vil Lavvarmen ha en total GWP på 29,7 kg CO₂-ekv, mens både Standard FA og Industri kun vil ha en total GWP på 2.5 kg CO₂-ekv. Lavvarmen vil altså ha nesten 12 ganger

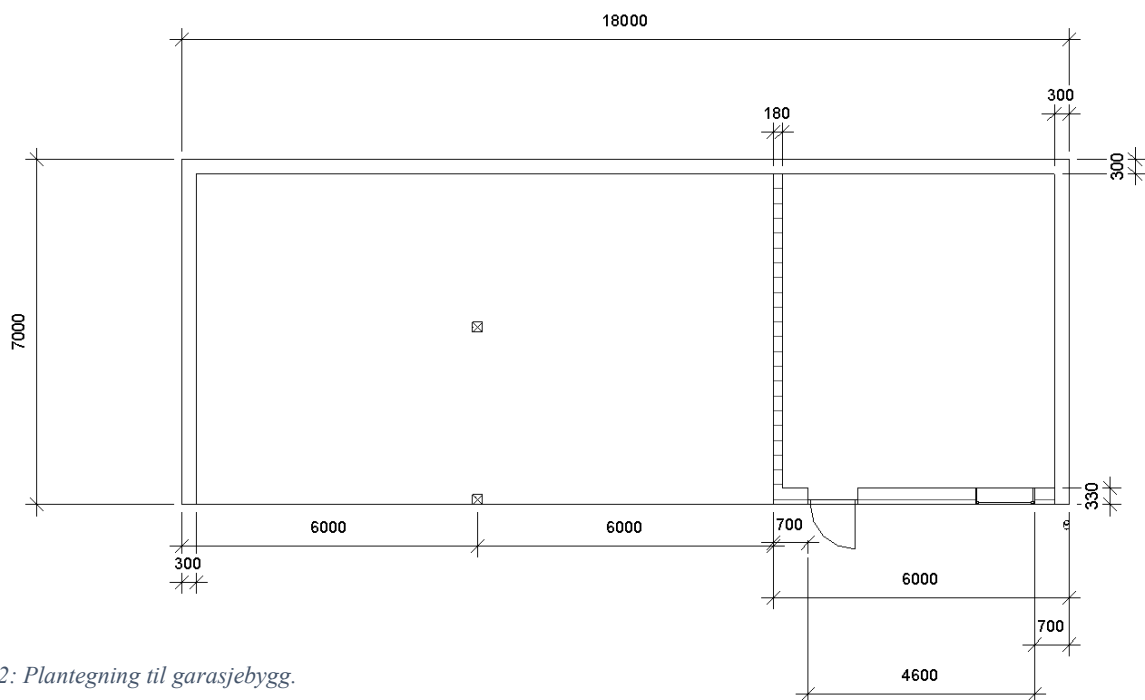
så mye utslipp når det kommer til transport til markedet. Dette skyldes at Standard FA og Industrisement blir produsert i Norge av Norcem, mens Lavvarmesementen blir produsert i Tyskland, og må så transporteres til Norge. Man kan tenke seg at dersom sementindustrien utvikler seg slik at det i fremtiden blir flere og flere produsenter som kan tilby slik type lavvarmesement, kan klimagassutslippet ytterligere reduseres.

6.1 «Case» av Utbygging av Garasjebygg

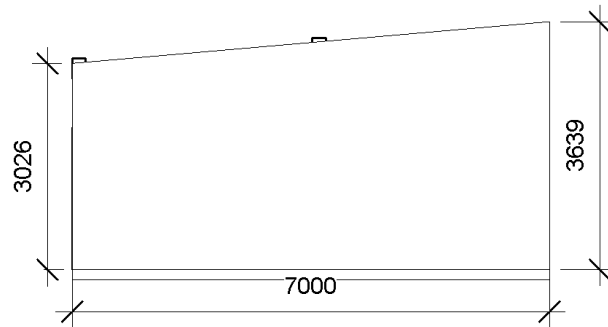
For å se hvordan de forskjellige sement- og betongtypene ville ha påvirket klimagassutslippet knyttet til et hypotetisk byggeprosjekt, har vi gjennomført en enkel modellering av et garasjebygg med bod, ved hjelp av BIM-programvaren Autodesk Revit. Utforming og mål for konstruksjonen er illustrert i *Figur 61-63*. Alle mål er oppgitt i millimeter.



Figur 61: 3D-modell av garasjebygg.



Figur 62: Plantegning til garasjebygg.



Figur 63: Fasadetegning for kortsiden til garasjebygg.

For å beregne hvor stor miljøpåkjenning en gjennomførelse av en slik konstruksjon omtrent ville ha hatt, trenger vi å finne ut total mengde betong som kreves. Dette gjøres ved hjelp av tegningene ovenfor og enkel geometriregning.

Gulv/Fundament

Gulvet eller fundamentet vil ha et totalt areal på: $18 \text{ m} \cdot 7 \text{ m} = 126 \text{ m}^2$. Med en tykkelse på 150 mm vil det altså trenge en betongmengde på **18.9 m³**

Vegger – Kortsider

Veggene på kortsidene vil ha en trapesform som etter fasedetegningen vil ha et areal på:

$\frac{(3.026\text{m}+3.639\text{m}) \cdot 7\text{m}}{2} = 23.3275 \text{ m}^2$. Garasjen vil ha to slike vegger, en med tykkelse på 300 mm, og en med tykkelse på 180 mm. Det vil gi et totalt betongvolum på: $2 \cdot (23.3275 \text{ m}^2 \cdot 0.3\text{m}) + 23.3275 \text{ m}^2 \cdot 0.18\text{m} = \mathbf{18.2 \text{ m}^3}$.

Vegg – Framside

På fremsiden av garasjebygget vil det kun trenge betong for veggen til boden. Det totale arealet her vil være: $6 \text{ m} \cdot 3.026 \text{ m} = 18.156 \text{ m}^2$. Siden denne veggen også har en dør på 2.07 m^2 og et vindu på 1.44 m^2 , vil derimot det faktiske arealet bli 14.646 m^2 . Ettersom at denne veggen har en tykkelse på 330mm, vil betongmengden som trengs være rundt **4.84 m³**.

Vegg – Bakside

Veggen på baksiden vil være litt høyere enn veggen på fremsiden og vil ha et areal på: $17.22\text{m} * 3.639\text{m} = 62.7 \text{ m}^2$. Denne veggen vil også ha en tykkelse på 300 mm, som vil gi et betongvolum på **18.81 m³**.

Søyler

Søylene inne i garasjen har et tverrsnittsareal på 200x200mm, og høyder på 2800 og 3100 mm. Det vil gi et totalt betongvolum på: $0.2\text{m}*0.2\text{m}*(2.8\text{m}+3.1\text{m}) = \mathbf{0.236 \text{ m}^3}$.

Bjelker

Betongbjelkene inne i garasjen vil ha et tverrsnittsareal på 200x300 mm og en lengde på 11700 mm. Det vil altså gi et betongvolum på: $2*(0.2\text{m}*0.2\text{m}*11.7\text{m}) = \mathbf{0.936 \text{ m}^3}$.

Alt dette vil dermed gi det totale betongvolumet for garasjebygget: $(18.9 + 18.2 + 4.84 + 18.81 + 0.236 + 0.936)\text{m}^3 \approx \mathbf{62 \text{ m}^3}$, noe som tilsvarer 62 000 liter betong.

Ifølge proporsjoneringarket til betongen med **Lavvarmesement**, vil man trenge rundt 25,53 tonn av denne sementen får å bygge dette garasjebygget. Etersom Lavvarme har et totalt klimagassutslipp på 252.08 kg CO₂ -ekv./tonn sement, vil miljøpåkjenningen av å bygge garasjebygget med denne resepten bli rundt **6 436 kg CO₂ -ekv.**

Ved bruk av **Standard 60 % FA** vil man trenge rundt 16,09 tonn sement. Med et klimagassutslipp på 570.08 kg CO₂ -ekv./tonn sement, vil det altså gi garasjebygget en miljøpåkjenning på ca. **9 173 kg CO₂ -ekv.**

Ved å bygge garasjebygget med resepten med **Industrisement**, trenger man rundt 25,75 tonn sement. Med en totalt klimagassutslipp på 708.77 kg CO₂ -ekv./tonn sement, vil dette gi et utslipp på rundt **18 251 kg CO₂ -ekv.**

Valg av sementtype vil ha stor betydning på miljøpåkjenningen som et byggeprosjekt påfører. Å bruke Lavvarmesement vil som forventet føre til lavest klimagassutslipp. Standard FA har egentlig et nokså høyt klimagassutslipp, men ettersom vi har tilsatt såpass store mengder ekstra flygeaske, trengs det mindre mengder av sement. Derfor vil det ikke være så altfor stor forskjell i klimagassutslipp ved bruk av disse to betongtypene.

Å bygge garasjebygget ved hjelp av Industriment vil derimot føre til klart høyest klimagassutslipp. Miljøpåkjenningen for denne betongtypen er nesten dobbelt så høy sammenlignet med Standard 60% FA og nesten tre ganger så høy sammenlignet med Lavvarmesementen.

I 2021 ble det estimert at det gjennomsnittlige årlige CO₂ utslippet per innbygger i Norge var på ca. 7,6 tonn. [42] Det vil si at ved å bygge dette enkle garasjebygget ved hjelp av Lavvarmesement framfor Industriment, vil man spare miljøet for det samlede klimagassutslippet en nordmann ville ha brukt på rundt 1 år og 6 måneder. Dette er kun et eksempel på klimagassutslippet for et relativt lite byggeprosjekt. Ved bruk av lavkarbonbetong i store byggeprosjekter, hvor det er snakk om et mye høyere forbruk av sement og betong, vil altså denne miljøbesparelsen kunne bli ekstremt mye høyere. Ifølge Norsk Betongforening har Norge et årlig forbruk av sement på ca. 2 millioner tonn. [43] Det sier seg da selv at diverse tiltak når det kommer til bruk av sement, kan føre til store miljøgevinster for fremtiden.

7. Konklusjon

Det er viktig å nevne at flere av resultater i denne oppgaven trolig er noe preget av en dårlig blande- og støpeprosess på grunn av manglende kompetanse, veiledning og ressurser. Resultatene er likevel interessante for å sammenligne forskjellene mellom de ulike sementtypene og deres påvirkning av de forskjellige herdebetingelsene.

Resultatene fra trykktestingen har vist at betongen med Industrisement har gitt den klart raskeste fasthetsutviklingen sammenlignet med Lavvarme og Standard 60% FA. Alle reseptene har også, generelt sett oppnådd den beste fasthetsutviklingen etter herdebetingelsen *Vannbad*, deretter *Vannbad+Benk*, *Benk*, og tregest for *Klimaskap*. Ved noen tilfeller har herdebetingelsen *Vannbad+Benk* gitt raskest utvikling frem til dag 28, men dette skyldes trolig høyere romtemperatur i betonglabben enn normalt, noe som kan ha økt hydratiseringsgraden for disse prøveterningene.

Trykktestingen har også vist at betongen med Industrisement i svært liten grad blir påvirket av ulike herdebetingelser, og vil raskt oppnå godt over karakteristisk trykkfasthet. Lavvarme vil påvirkes klart mest av herdebetingelsene, slik at det kun er betongen som har herdet i *Vannbad*, enten under hele herdeprosessen eller kun de første to dagene, som vil oppnå karakteristisk trykkfasthet. Betongen med Standard 60% FA vil også påvirkes en del av herdebetingelsene, men her vil alle terningene utenom dem fra *Klimaskap* oppnå karakteristisk trykkfasthet.

Resultatene fra PF-Metoden etter 28 dager herding viser generelt sett den samme tendensen som ved trykktestingen ved at alle tre reseptene har fått lavest porøsitet for herdebetingelsen *Vannbad*, etterfulgt av *Vannbad+Benk*, *Benk*, og til slutt *Klimaskap* med høyest porøsitet. Også her viser resultatene at porøsiteten til betongen med Industrisement ikke blir særlig påvirket av herdebetingelsene, mens Lavvarmen og Standard 60% FA har gitt større variasjoner mellom de ulike herdebetingelsene.

Motstandstallet for Industrisement har fått veldig like verdier for alle herdebetingelsene, og tilsier en betong med ganske dårlig permeabilitet. Det lave synkmålet til den ferske betongen ved blandedagen kan ha ført til en relativt dårlig støpelighet og dermed også gitt høyere porøsitet og lavere motstandstall enn normalt. Det kan tenkes at dersom vi hadde brukt mer

superplastiserende i denne resepten, kunne denne permeabiliteten også ha blitt noe mer akseptabel.

Motstandstallene til Lavvarme og Standard 60% FA har fått veldig forskjellige verdier ut ifra herdebetingelsene, og begge følger samme tendens og rekkefølge som tidligere forsøk, *Vannbad* med høyest og *Klimaskap* med lavest.

PF-metoden etter 56 dager har gitt noe ulike resultater enn ved dag 28. Betongen med Lavvarmesement fikk lavest porøsitet etter å ha herdet i *Klimaskap*, og Industrisement har fått høyere porøsitet fra *Benk* enn *Klimaskap*, noe som trolig skyldes temperaturen på labben, uttørkningssvinn, og/eller den lengre tiden det tar før hydratiseringsprosessen skikkelig kommer i gang. De fleste motstandstallene har også fått store avvik fra resultatene fra dag 28. Terningene med Lavvarme har gått betraktelig ned for terningene fra *Benk* og betraktelig opp for *Vannbad+Benk*. For Standard 60% FA er variasjonen mindre, bortsett fra *Vannbad* som har økt en god del. Betongen med Industrisement som har vist seg å ikke blir særlig påvirket av ulike herdeforhold, har fortsatt svært like motstandstall, men nå litt høyere.

I resultatene fra testen for kloridinntrengning er det mye usikkerhet. Vi har en del målinger som er urimelige og noen som ikke er som forventet, dette kan komme av trøbbelet vi hadde med utstyret og at vi ikke har vært nøyaktige nok. Det er derfor vanskelig å si noe sikkert utfra resultatene, men man kan allikevel noen tendenser. Med unntak av lavvarme benk som vi må se bort fra, gjør vannbad det best, og kjøøl dårligst. V+B har av en uviss grunn fått høyere verdier enn benk og kan best forklares med at det må ha skjedd feil ved utboring eller henting av støvprøver.

Til sammenligning ser vi at industri er lite påvirket av herdebetingelsene, verdiene vi får der er relativt like for alle herdebetingelsene. Sammenligner vi reseptene med hverandre ser vi at dersom miljøbetongen får gode herdebetingelser får den lavere diffusjonskoeffisient enn det industrien klarer. Det kan komme av at flygeasken og lavvarmesementen er mer finmalt enn det industrien er, og gir en tettere betong.

Generelt ser vi fra resultatene at alle 3 reseptene har en dårlig motstand mot klorider. Industriresepten får en jevnt høy diffusjonskoeffisient, men for miljøbetongene varierer den veldig. Der miljøbetongen får gode herdebetingelser, får den en del bedre motstand mot

klorider enn det industrien gjør, men der den får dårlige herdebetingelser får den en motstand som er mye lavere enn det industrien har.

Det er absolutt mulig å bruke miljøvennlige lavkarbonbetonger fremfor mer konvensjonell betong uten at det går noe særlig utover viktige bestandighetsegenskaper til betongen. For at dette skal være mulig er det derimot spesielt viktig å sørge for at lavkarbonbetongen blir utsatt for gode herdeforhold.

Miljøregnskapet til de forskjellige betongtypene brukt i prøveprogrammet har vist at det er mulig med store besparelser av klimagassutslipp ved å ta i bruk mer miljøvennlige sementtyper. Industrisement vil gi klart høyest utslipp, mens Standard 60% FA og Lavvarme vil kunne redusere dette utslippet med rundt 50% og 65%.

Kapittel 6.1 illustrerer også hvor mye det er mulig å redusere klimagassutslippet ved bruk av lavkarbonbetong i et relativt lite byggeprosjekt. Ved større byggeprosjekter hvor det går enormt mye større mengder sement, vil denne klimabesparelsen kunne bli veldig mye høyere. Dette viser at nokså enkle miljøbevisste grep innenfor sement- og betongbransjen, kan være til svært god hjelp mot en mer miljøvennlig fremtid.

8. Referanser

- [1] FN-Sambandet (2020). *Parisavtalen*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen> (Lest 12.06.2023)
- [2] Tekna (2017). *Bygge bærekraftig i betong?* Tilgjengelig fra: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/bygge-baerekraftig-i-betong/> (Lest 12.06.2023)
- [3] Fremtidens Byggenæring (2017). *Trondheim vil fase ut konvensjonell betong*. Tilgjengelig fra: <https://www.fremtidensbygg.no/trondheim-vil-fase-ut-konvensjonell-betong/> (Lest 12.06.2023)
- [4] Kontrollrådet. *Betonges ABC*. Tilgjengelig fra: <https://kontrollbetong.no/aktuelt/betongens-abc/> (Lest 26.03.2023)
- [5] Universitet i Stavanger. BYG605 Betongteknologi Forelesning: *Cement hydration*.
- [6] Gjerp, P. & Opsahl, M. (1998). *Grunnleggende betongteknologi*. Tilgjengelig fra: <https://www.nb.no/items/0b97331abebfa7d41803802042c2bf6d>
- [7] Civil Giant. *What is LOW HEAT CEMENT?- Know All The Low Heat Cement Uses Here!* Tilgjengelig fra: https://www.civilgiant.com/low-heat-cement/?utm_content=cmp-true (Lest 29.05.2023)
- [8] Norcem. *God Betong er Bestandig*. Tilgjengelig fra: https://www.norcem.no/sites/default/files/assets/document/godbetongerbestandig_web.pdf
- [9] Universitet i Stavanger. BYG605 Betongteknologi Forelesning: *Rheology*
- [10] Sintef. *Betong under herding: Egenskapsutvikling, volumstabilitet, mekaniske egenskaper*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/byggforsk/arkiv/rapporter/foredrag9.pdf>
- [11] Universitet i Stavanger. BYG605 Betongteknologi Forelesning: *Curing technology*

- [12] Universitet i Stavanger. BYG605 Betongteknologi Forelesning: *Summary BYG605*.
- [13] Gabrielsen, G. F. (2015). *Effekten av riss på betongens bestandighet*. [Masteroppgave, Universitetet i Stavanger]. Tilgjengelig fra: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/297323>
- [14] Betongfokus. *Bygg klimavennlig med betong!* Tilgjengelig fra: <https://www.betongfokus.no/fokusomrader/klima/> (Lest 31.05.2023)
- [15] Norsk Betongforening. (2020). *Publikasjon nr. 37, Lavkarbonbetong*
- [16] LCA.no. *Miljøpåvirkning EN 15804 +A2*. Tilgjengelig fra: <https://lca.no/miljopavirkninger/> (Lest 24.05.2023)
- [17] Standard Norge (2019). *NS-EN 12350-2:2019, Prøving av fersk betong. Del 2: Synkmål*.
- [18] Standard Norge (2019). *NS-EN 12350-6:2019, Prøving av fersk betong – Del 6: Densitet*
- [19] Standard Norge (2022). *NS-EN 12350-7, Prøving av fersk betong – Del 7: Luftinnhold – Trykkmetoder*
- [20] Standard Norge (2019). *NS-EN 12390-3, Prøving av herdet betong – Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet*
- [21] Statens vegvesen (1996). *14.637 Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF*.
- [22] Nordtest (1995). *NT Build 443*
- [23] Schwenk. (2019). *Teknisk datablad: Lavvarmesement*. Tilgjengelig fra: <https://www.schwenk.de/wp-content/uploads/2019/08/Schwenk-Teknisk-datablad-Lavvarmesement-Aug-2019.docx.pdf>
- [24] Norcem. (2017). *Produktblad, Standardsement FA*.

- [25] Norcem. (2016). *Produktblad, Industrisement*.
- [26] Schwenk. (2023). *Sement*. Tilgjengelig fra: <https://schwenk.no/cements/lavvarmesement-cem-iii-b-425-l-lh-sr-na/>
- [27] Universitet i Stavanger. BYG605 Betongteknologi, *Foreslåtte v/b-tall følgende til for SCHWENK/lavvarme*.
- [28] Norcem. *Produktinformasjon: Industrisement*
- [29] Norcem (2015). *Produktinformasjon: Standardsement FA*
- [30] Universitet i Stavanger. BYG605 Betongteknologi Forelesning: *Fresh concrete – proportioning*
- [31] Byggforsk (2015). *Kvalitetskontroll av fersk betong*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/286/kvalitetskontroll_av_fersk_betong#i42
- [32] Standard Norge (2022). *NS-EN 206:2013, Betong. Spesifikasjoner, egenskaper, framstilling og samsvar*
- [33] Servi Motion Control AS. (2004). *Betjeningsveiledning: FTS – Luftporemåler B 2020 8 liter for betong*.
- [34] Kjos, A. T. (2020). *Effekten av å tilsette CO₂ i fersk betong*. [Masteroppgave, Universitetet i Stavanger]. Tilgjengelig fra: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/2728614>
- [35] Universitet i Stavanger. BYG605 Betongteknologi Forelesning: *Mechanical properties*
- [36] Universitet i Stavanger. BYG605 Betongteknologi Forelesning: *Cement hydration, Porosity calculation according to Powers model*.

[37] Kvamme, D. & Tayyem, Y. B. (2021). *Investigation on The Mechanical Properties of CO2 Cured Concrete with Natural Aggregates*. [Bacheloroppgave, Universitetet i Stavanger]. Tilgjengelig fra: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/2774327>

[38] Sika Norge. *Sikadur -30: Tiksotropisk epoksy-lim/sparkel fortrinnsvis liming av forsterkning*. Tilgjengelig fra: <https://nor.sika.com/no/losninger-innen-bygg/bygge/mortel/56037/epoksylin/sikadur-30.html> (Lest 20.04.2023)

[39] EPD-Norge. (2023). *Environment product declaration: SCHWENK Lavvarmesement Cem III/B 42,5 L-LH/SR (na)*. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/epder/bygg/ement-kalk/schwenk-lavvarmesement-cem-iii-b-42-5-l-lh-sr-na>

[40] EPD-Norge. (2022). *Environment product declaration: Norcem Standardsement FA, Brevik - CEM II/B-M (V-L) 42,5 R*. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/epder/bygg/ement-kalk/norcem-standardsement-fa-brevik-cem-ii-b-m-v-l-42-5-r-1>

[41] EPD-Norge. (2022). *Environment product declaration: Norcem Industrisement, Brevik - CEM I 52,5 R*. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/epder/bygg/ement-kalk/norcem-industrisement-brevik-cem-i-52-5-r-1>

[42] Energi og Klima. (2022). *Utslippsfordelingen*. Tilgjengelig fra: <https://energiogklima.no/klimavakten/utslipp-per-innbygger/> (Lest 26.05.2023)

[43] Norsk Betongforening. *Visste du dette om betong og miljø*. Tilgjengelig fra: <https://betong.net/wp-content/uploads/17966-Visste-du-dette-om-betong-og-milj%C3%B8-WEB.pdf> (Lest 26.05.2023)

9. Vedlegg

Vedlegg A – PF-Metoden, Resultater og Beregninger

Vedlegg B – Kloridprofiler

Vedlegg A

PF-Metoden, Resultater og Beregninger

Schwenk Lavvarme, Dag 28:

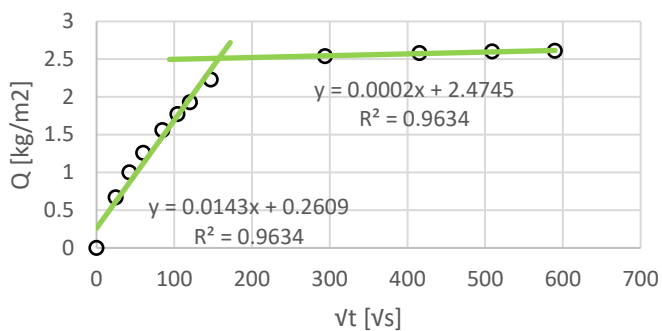
Lavvarme skive 1. Dag 28			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	431.6		427.6		424.8		422	
10min	600	24.5	438.3	670	433	540	437.7	1290	429.2	720
30min	1800	42.4	441.6	1000	435.2	760	441.7	1690	431.7	970
1 time	3600	60.0	444.2	1260	437.3	970	445.6	2080	434.3	1230
2 timer	7200	84.9	447.2	1560	439.6	1200	448.5	2370	437.1	1510
3 timer	10800	103.9	449.3	1770	441.3	1370	449.3	2450	439.1	1710
4 timer	14400	120.0	450.9	1930	442.7	1510	447.3	2250	440.6	1860
6 timer	21600	147.0	453.9	2230	444.8	1720	447.4	2260	442.9	2090
1 døgn	86400	293.9	457	2540	452.2	2460	448	2320	447.6	2560
2 døgn	172800	415.7	457.4	2580	453.4	2580	448.4	2360	447.8	2580
3 døgn	259200	509.1	457.6	2600	453.6	2600	448.5	2370	448.0	2600
4 døgn	348000	589.9	457.7	2610	453.6	2600	448.7	2390	447.4	2540
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			458.4	188.5	454.1	186	449.2	183.5	449	184.5
1 døgn Trykktank			460.3		455.9		451		450.7	

Lavvarme skive 2. Dag 28			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	432.1		445.2		422.2		432.8	
10min	600	24.5	438.6	650	450.3	510	435.0	1280	439.9	710
30min	1800	42.4	441.4	930	452.1	690	439.6	1740	442.3	950
1 time	3600	60.0	443.8	1170	453.9	870	443.9	2170	444.9	1210
2 timer	7200	84.9	446.5	1440	456.2	1100	447.4	2520	447.9	1510
3 timer	10800	103.9	448.1	1600	457.6	1240	448	2580	450.1	1730
4 timer	14400	120.0	449.5	1740	458.9	1370	448.2	2600	451.8	1900
6 timer	21600	147.0	451.7	1960	460.8	1560	448.3	2610	454	2120
1 døgn	86400	293.9	456.2	2410	467.5	2230	449.1	2690	457	2420
2 døgn	172800	415.7	456.5	2440	469	2380	449.4	2720	457.3	2450
3 døgn	259200	509.1	456.7	2460	469.1	2390	449.6	2740	457.5	2470
4 døgn	348000	589.9	456.8	2470	469.2	2400	449.8	2760	457	2420
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			457.4	186.5	469.6	190	450.4	185.0	458.2	186
1 døgn Trykktank			459.2		471.3		452.4		459.8	

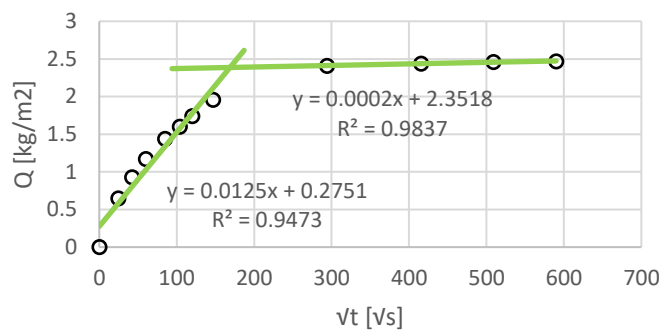
Lavvarme skive 1. Dag 28	g1 [g]	g2 [g]	g3 [g]	g4 [g]
Benk	431.6	458.4	188.5	460.3
Vannbad	427.6	454.1	186	455.9
Klima	424.8	449.2	183.5	451
Vannbad+Benk	422	449	184.5	450.7
Lavvarme skive 2. Dag 28	g1 [g]	g2 [g]	g3 [g]	g4 [g]
Benk	432.1	457.4	186.5	459.2
Vannbad	445.2	469.6	190	471.3
Klima	422.2	450.4	185.0	452.4
Vannbad+Benk	432.8	458.2	186	459.8

Lavvarme Skive 1. Dag 28	Tykkelse [mm]	Areal [m2]	Volum [m3]	Tørr densitet [kg/m3]	Faststoffdensitet [kg/m3]	Sugemettet densitet [kg/m3]	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi	Kalkulert masseforhold
Benk	19	0.01	0.0001885	2289.66	2700.88	2431.83	0.142	0.010	0.152	0.066	0.54
Vannbad	18.9	0.01	0.0001860	2298.92	2711.48	2441.40	0.143	0.010	0.152	0.064	0.54
Klimaskap	18.9	0.01	0.0001835	2314.99	2700.57	2447.96	0.133	0.010	0.143	0.069	0.49
Vannbad+Benk	18.9	0.01	0.0001845	2287.26	2708.60	2433.60	0.146	0.009	0.156	0.059	0.57
Lavvarme Skive 2. Dag 28	Tykkelse [mm]	Areal [m2]	Volum [m3]	Tørr densitet [kg/m3]	Faststoffdensitet [kg/m3]	Sugemettet densitet [kg/m3]	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi	Kalkulert masseforhold
Benk	18.9	0.01	0.0001865	2316.89	2710.79	2452.55	0.136	0.010	0.145	0.066	0.51
Vannbad	19.1	0.01	0.0001900	2343.16	2716.29	2471.58	0.128	0.009	0.137	0.065	0.47
Klimaskap	18.8	0.01	0.0001850	2282.16	2727.39	2434.59	0.152	0.011	0.163	0.066	0.60
Vannbad+Benk	19	0.01	0.0001860	2326.88	2722.01	2463.44	0.137	0.009	0.145	0.059	0.51

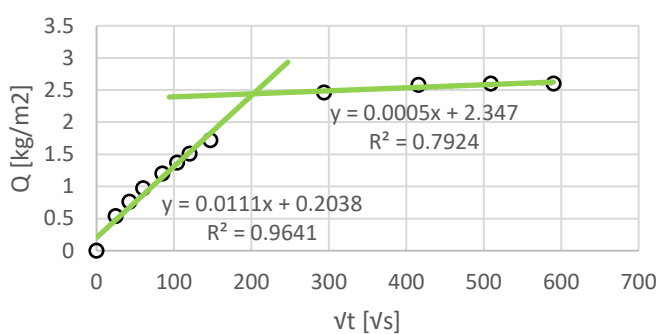
1 Lavvarme Benk, Dag 28



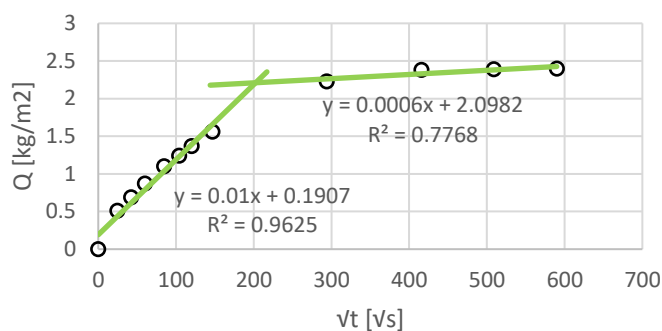
2 Lavvarme Benk, Dag 28



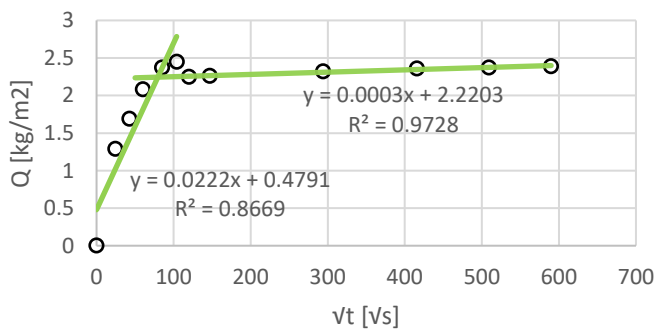
1 Lavvarme Vannbad, Dag 28



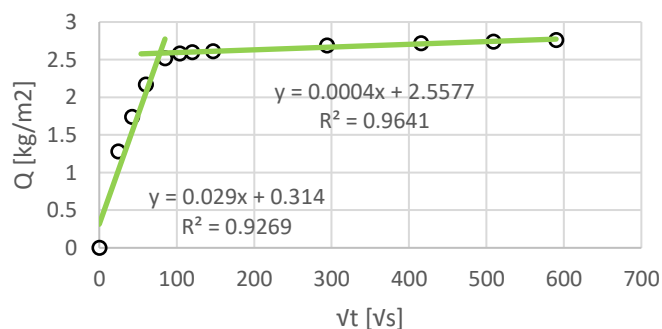
2 Lavvarme Vannbad, Dag 28



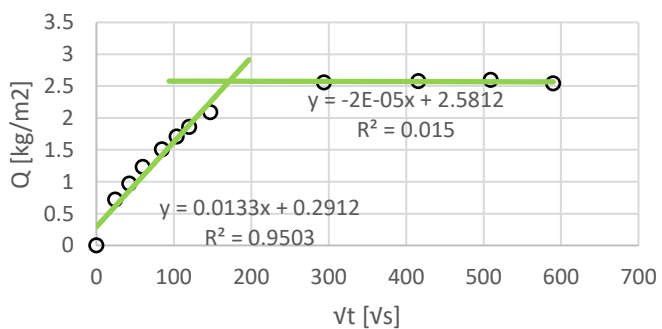
1 Lavvarme Klimaskap, Dag 28



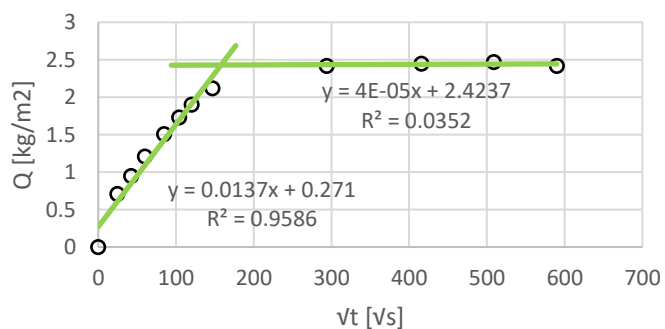
2 Lavvarme Klimaskap, Dag 28



1 Lavvarme Vannbad+Benk, Dag 28



2 Lavvarme Vannbad+Benk, Dag 28



Lavvarme Skive 1. Dag 28	Q _{kap} [kg/m ²]	Rot(t _{kap}) [√s]	Stigehøyde [mm]	Kapillaritetstallet [kg/m ² √s]	Motstandstall [s/m ²] 10 ⁶
Benk	2.51	156.99	19	0.0160	68.3
Vannbad	2.45	202.19	18.9	0.0121	114.4
Klimaskap	2.24	79.51	18.9	0.0282	17.7
Vannbad+Benk	2.58	171.92	18.9	0.0150	82.7
Lavvarme Skive 2. Dag 28					
Benk	2.39	168.84	18.9	0.0142	79.8
Vannbad	2.22	202.93	19.1	0.0109	112.9
Klimaskap	2.59	78.45	18.8	0.0330	17.4
Vannbad+Benk	2.43	157.59	19	0.0154	68.8

Norcem Standard 60% FA, Dag 28:

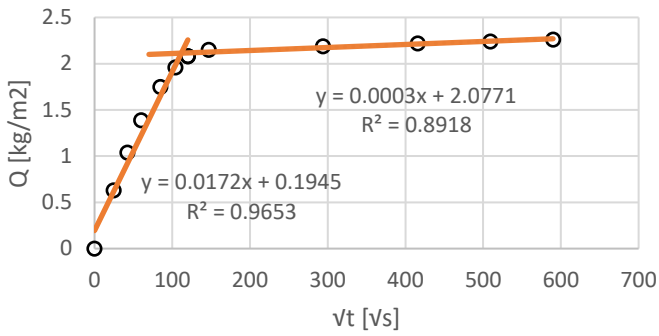
Standard 60% FA skive 1. Dag 28			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	432.4		440.6		430.7		434.4	
10min	600	24.5	438.7	630	445.9	530	439.8	910	439.5	510
30min	1800	42.4	442.8	1040	448.6	800	443.6	1290	442.4	800
1 time	3600	60.0	446.3	1390	451	1040	447.6	1690	445.3	1090
2 timer	7200	84.9	449.9	1750	453.5	1290	450.5	1980	449.1	1470
3 timer	10800	103.9	452	1960	455.1	1450	450.9	2020	451.7	1730
4 timer	14400	120.0	453.2	2080	456.4	1580	451.1	2040	453.4	1900
6 timer	21600	147.0	453.9	2150	458.1	1750	451.3	2060	455.5	2110
1 døgn	86400	293.9	454.3	2190	461.4	2080	451.7	2100	456.5	2210
2 døgn	172800	415.7	454.6	2220	461.6	2100	452.0	2130	456.8	2240
3 døgn	259200	509.1	454.8	2240	461.8	2120	452.2	2150	457.0	2260
4 døgn	348000	589.9	455	2260	461.8	2120	452.3	2160	457.7	2330
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			455.4	189	462.3	190.5	453.1	186.0	457.8	190.5
1 døgn Trykktank			458.3		465.1		455.2		460.2	

Standard 60% FA skive 2. Dag 28			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	409.8		425.4		430.6		426	
10min	600	24.5	416.4	660	430.8	540	439.8	920	431.4	540
30min	1800	42.4	420.4	1060	433.4	800	443.8	1320	434.4	840
1 time	3600	60.0	423.6	1380	435.8	1040	448.2	1760	437.2	1120
2 timer	7200	84.9	427.4	1760	438.3	1290	451.8	2120	441	1500
3 timer	10800	103.9	428.8	1900	439.8	1440	452.4	2180	443.5	1750
4 timer	14400	120.0	429.3	1950	441	1560	452.6	2200	445	1900
6 timer	21600	147.0	429.7	1990	442.6	1720	452.8	2220	446.2	2020
1 døgn	86400	293.9	430	2020	446.1	2070	453.2	2260	446.8	2080
2 døgn	172800	415.7	430.4	2060	446.4	2100	453.5	2290	447.1	2110
3 døgn	259200	509.1	430.5	2070	446.4	2100	453.7	2310	447.2	2120
4 døgn	348000	589.9	430.7	2090	446.6	2120	453.9	2330	448.3	2230
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			431.1	175	447.0	184.5	454.5	187.0	448	185
1 døgn Trykktank			433.8		449.5		457		450.7	

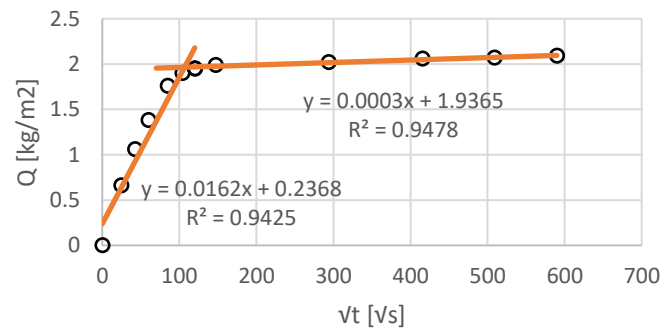
Standard 60% FA skive 1. Dag 28	g1 [g]	g2 [g]	g3 [g]	g4 [g]
Benk	432.4	455.4	189	458.3
Vannbad	440.6	462.3	190.5	465.1
Klima	430.7	453.1	186.0	455.2
Vannbad+Benk	434.4	457.8	190.5	460.2
Standard 60% FA skive 2. Dag 28				
Benk	409.8	431.1	175	433.8
Vannbad	425.4	447.0	184.5	449.5
Klima	430.6	454.5	187.0	457
Vannbad+Benk	426	448	185	450.7

Standard 60% FA Skive 1. Dag 28	Tykkelse [mm]	Areal [m2]	Volum [m3]	Tørr densitet [kg/m3]	Faststoffdensitet [kg/m3]	Sugemetttet densitet [kg/m3]	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi	Kalkulert masseforhold
Benk	19	0,01	0,0001890	2287,83	2651,13	2409,52	0,122	0,015	0,137	0,112	0,44
Vannbad	19,2	0,01	0,0001905	2312,86	2654,22	2426,77	0,114	0,015	0,129	0,114	0,41
Klimaskap	18,9	0,01	0,0001860	2315,59	2666,87	2436,02	0,120	0,011	0,132	0,086	0,44
Vannbad+Benk	19	0,01	0,0001905	2280,31	2637,52	2403,15	0,123	0,013	0,135	0,093	0,45
Standard 60% FA Skive 2. Dag 28											
Benk	18,2	0,01	0,0001750	2341,71	2713,91	2463,43	0,122	0,015	0,137	0,112	0,4428
Vannbad	18,5	0,01	0,0001845	2305,69	2652,12	2422,76	0,117	0,014	0,131	0,104	0,4235
Klimaskap	19,0	0,01	0,0001870	2302,67	2681,20	2430,48	0,128	0,013	0,141	0,095	0,4698
Vannbad+Benk	18,6	0,01	0,0001850	2302,70	2657,52	2421,62	0,119	0,015	0,134	0,109	0,4310

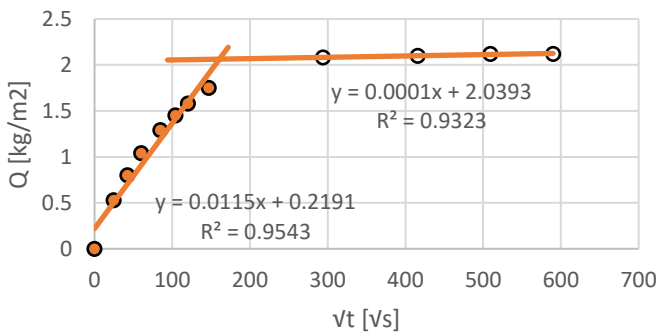
1 Standard 60% FA Benk, Dag 28



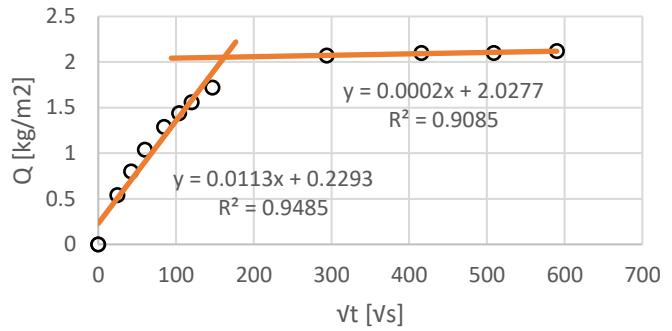
2 Standard 60% FA Benk, Dag 28



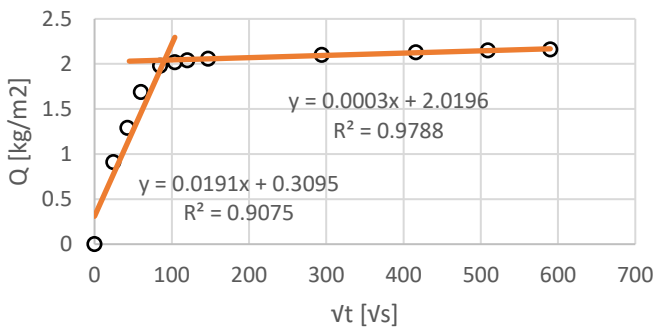
1 Standard 60% FA Vannbad, Dag 28



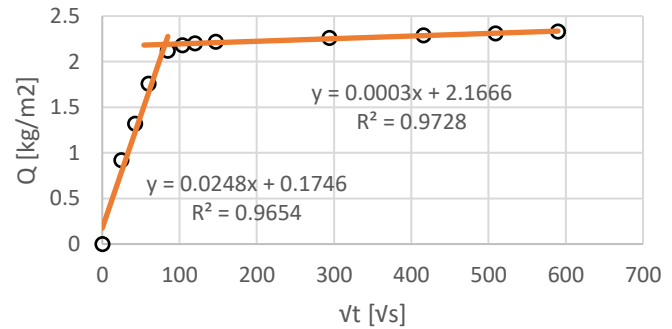
2 Standard 60% FA Vannbad, Dag 28



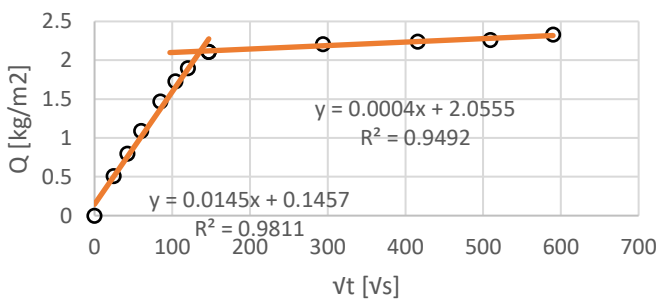
1 Standard 60% FA Klimaskap, Dag 28



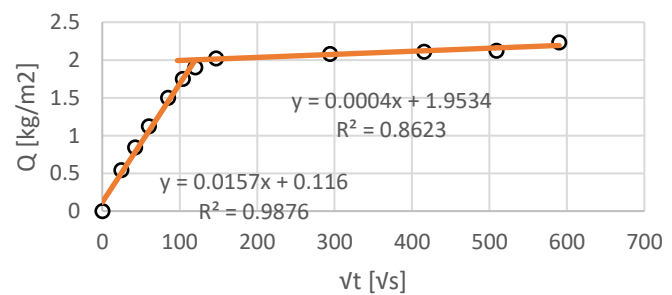
2 Standard 60% FA Klimaskap, Dag 28



1 Standard 60% FA Vannbad+Benk, Dag 28



2 Standard 60% FA Vannbad+Benk, Dag 28



Standard 60% FA Skive 1. Dag 28	Qkap [kg/m ²]	Rot(tkap) [√s]	Stigehøyde [mm]	Kapillaritetstallet [kg/m ² √s]	Motstandstall [s/m ²] 10 ⁶
Benk	2,11	111,4	19	0,0189	34,4
Vannbad	2,06	159,67	19,2	0,0129	69,2
Klimaskap	2,05	90,96	18,9	0,0225	23,2
Vannbad+Benk	2,11	135,45	19	0,0156	50,8
Standard 60% FA Skive 2. Dag 28					
Benk	1,97	106,9	18,2	0,0184	34,5
Vannbad	2,06	162,02	18,5	0,0127	76,7
Klimaskap	2,19	81,31	19	0,0269	18,3
Vannbad+Benk	2	120,09	18,6	0,0167	41,7

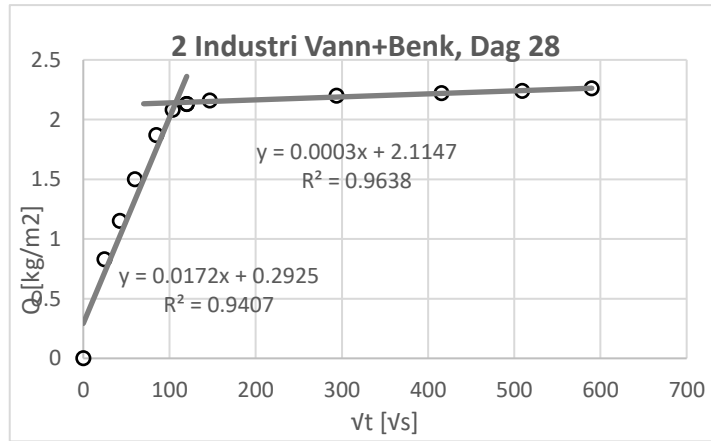
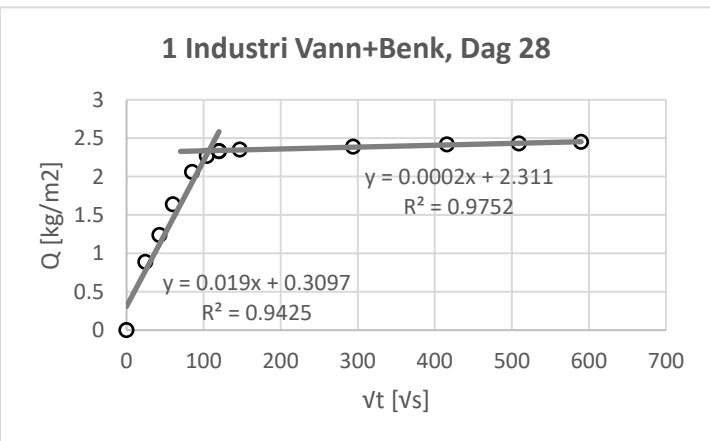
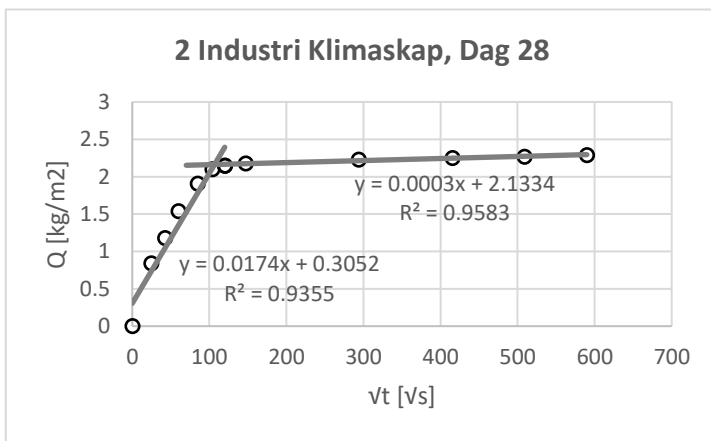
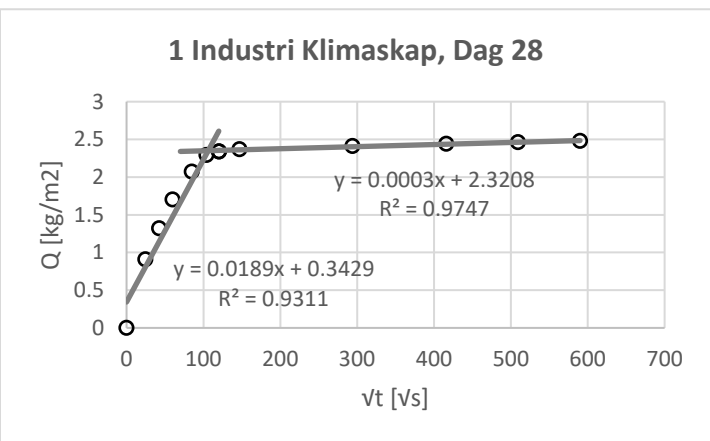
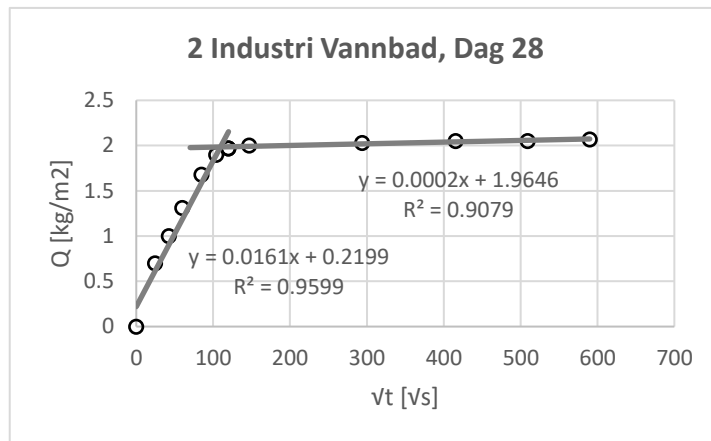
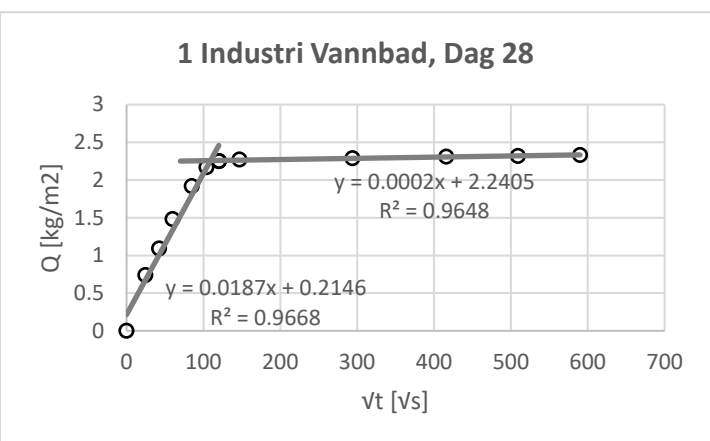
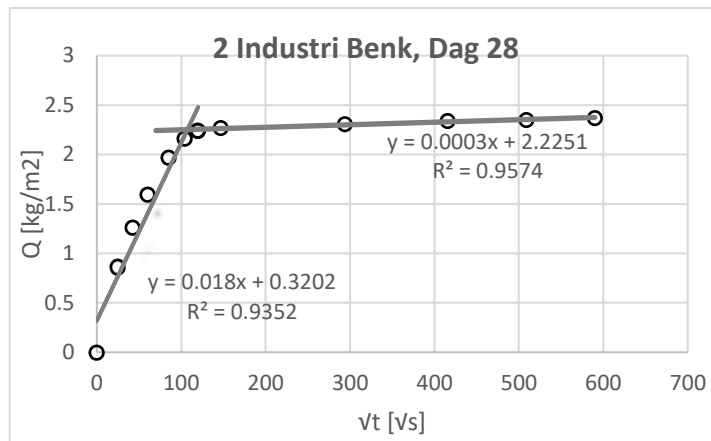
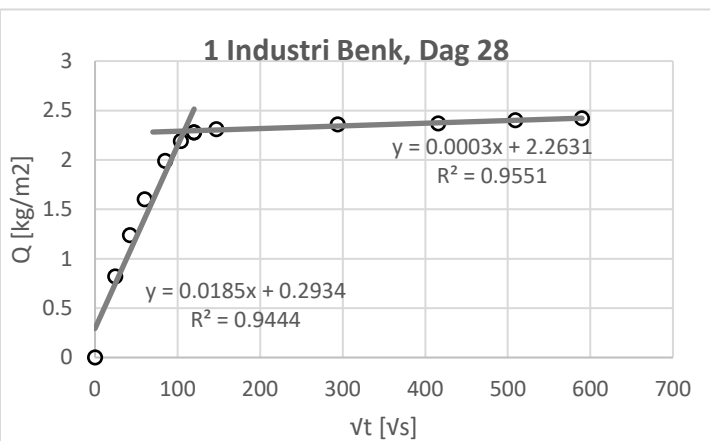
Norcem Industri, Dag 28:

Industri skive 1. Dag 28			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	440.9		432.4		420.5		425.4	
10min	600	24.5	449.1	820	439.8	740	429.6	910	434.3	890
30min	1800	42.4	453.3	1240	443.3	1090	433.7	1320	437.8	1240
1 time	3600	60.0	456.9	1600	447.2	1480	437.5	1700	441.8	1640
2 timer	7200	84.9	460.8	1990	451.6	1920	441.2	2070	446	2060
3 timer	10800	103.9	462.8	2190	454.1	2170	443.4	2290	448.1	2270
4 timer	14400	120.0	463.7	2280	454.9	2250	443.9	2340	448.7	2330
6 timer	21600	147.0	464	2310	455.1	2270	444.2	2370	448.9	2350
1 døgn	86400	293.9	464.5	2360	455.3	2290	444.6	2410	449.3	2390
2 døgn	172800	415.7	464.6	2370	455.5	2310	444.9	2440	449.6	2420
3 døgn	259200	509.1	464.9	2400	455.6	2320	445.1	2460	449.7	2430
4 døgn	348000	589.9	465.1	2420	455.7	2330	445.3	2480	449.9	2450
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			465.3	191	455.9	186.5	445.8	182.5	450.4	185.5
1 døgn Trykktank			467.5		458		447.8		452.5	

Industri skive 2. Dag 28			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	428.1		429.8		425.4		429.6	
10min	600	24.5	436.7	860	436.8	700	433.8	840	437.9	830
30min	1800	42.4	440.7	1260	439.8	1000	437.2	1180	441.1	1150
1 time	3600	60.0	444	1590	442.9	1310	440.8	1540	444.6	1500
2 timer	7200	84.9	447.8	1970	446.6	1680	444.5	1910	448.3	1870
3 timer	10800	103.9	449.7	2160	448.8	1900	446.4	2100	450.4	2080
4 timer	14400	120.0	450.5	2240	449.5	1970	446.9	2150	450.9	2130
6 timer	21600	147.0	450.8	2270	449.8	2000	447.2	2180	451.2	2160
1 døgn	86400	293.9	451.2	2310	450.1	2030	447.7	2230	451.6	2200
2 døgn	172800	415.7	451.5	2340	450.3	2050	447.9	2250	451.8	2220
3 døgn	259200	509.1	451.6	2350	450.3	2050	448.1	2270	452.0	2240
4 døgn	348000	589.9	451.8	2370	450.5	2070	448.3	2290	452.2	2260
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			452	186	450.7	182.5	448.9	181.5	452.7	185.5
1 døgn Trykktank			454.4		452.5		450.8		454.3	

Industri skive 1. Dag 28	g1 [g]	g2 [g]	g3 [g]	g4 [g]
Benk	440.9	465.3	191	467.5
Vannbad	432.4	455.9	186.5	458
Klima	420.5	445.8	182.5	447.8
Vannbad+Benk	425.4	450.4	185.5	452.5
Industri skive 2. Dag 28				
Benk	428.1	452	186	454.4
Vannbad	429.8	450.7	182.5	452.5
Klima	425.4	448.9	181.5	450.8
Vannbad+Benk	429.6	452.7	185.5	454.3

Industri Skive 1. Dag 28	Tykkelse [mm]	Areal [m2]	Volum [m3]	Tørr densitet [kg/m3]	Faststoffdensitet [kg/m3]	Sugemettet densitet [kg/m3]	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi	Kalkulert masseforhold
Benk	19	0,01	0,0001910	2308,38	2681,87	2436,13	0,128	0,012	0,139	0,083	0,47
Vannbad	18,9	0,01	0,0001865	2318,50	2687,38	2444,50	0,126	0,011	0,137	0,082	0,46
Klimaskap	18,6	0,01	0,0001825	2304,11	2709,41	2442,74	0,139	0,011	0,150	0,073	0,52
Vannbad+Benk	19	0,01	0,0001855	2293,26	2685,61	2428,03	0,135	0,011	0,146	0,077	0,50
Industri Skive 2. Dag 28											
Benk	18,8	0,01	0,0001860	2301,61	2680,65	2430,11	0,128	0,013	0,141	0,091	0,47
Vannbad	18,6	0,01	0,0001825	2355,07	2689,61	2469,59	0,115	0,010	0,124	0,079	0,41
Klimaskap	18,2	0,01	0,0001815	2343,80	2725,18	2473,28	0,129	0,010	0,140	0,075	0,48
Vannbad+Benk	18,6	0,01	0,0001855	2315,90	2671,64	2440,43	0,125	0,009	0,133	0,065	0,46



Industri Skive 1. Dag 28	Qkap [kg/m ²]	Rot(tkap) [√s]	Stigehøyde [mm]	Kapillaritetstallet [kg/m ² √s]	Motstandstall [s/m ²] 10 ⁶
Benk	2,3	108,23	19	0,0213	32,4
Vannbad	2,26	109,51	18,9	0,0206	33,6
Klimaskap	2,35	106,34	18,6	0,0221	32,7
Vannbad+Benk	2,33	106,45	19	0,0219	31,4
Industri Skive 2. Dag 28					
Benk	2,26	107,62	18,8	0,0210	32,8
Vannbad	1,99	109,73	18,6	0,0181	34,8
Klimaskap	2,17	106,91	18,2	0,0203	34,5
Vannbad+Benk	2,15	107,82	18,6	0,0199	33,6

Schwenk Lavvarme, Dag 56:

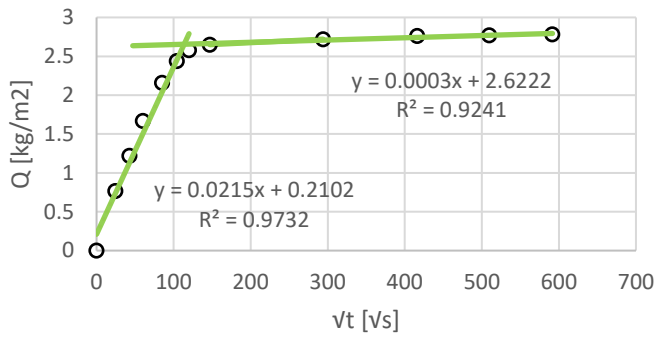
Lavvarme skive 1. Dag 56			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	446,3		439,8		420,2		433,9	
10min	600	24.5	454	770	444	420	427,9	770	437,6	370
30min	1800	42.4	458,5	1220	445,9	610	431,8	1160	438,7	480
1 time	3600	60.0	463	1670	447,8	800	436,3	1610	440,2	630
2 timer	7200	84.9	467,9	2160	450,2	1040	441,4	2120	442,1	820
3 timer	10800	103.9	470,7	2440	452	1220	442,8	2260	444	1010
4 timer	14400	120.0	472,1	2580	453,3	1350	443	2280	445,5	1160
6 timer	21600	147.0	472,8	2650	455,4	1560	443,1	2290	447,5	1360
1 døgn	86400	293.9	473,5	2720	463,4	2360	443,7	2350	455,6	2170
2 døgn	172800	415.7	473,9	2760	465,9	2610	443,9	2370	458,1	2420
3 døgn	259200	509.1	474	2770	466,5	2670	444	2380	458,6	2470
4 døgn	348000	589.9	474,1	2780	466,8	2700	444,2	2400	459	2510
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			474,5	193	467,5	192	444,7	185,0	459,9	187,5
1 døgn Trykktank			475,8		468,5		447,7		461,4	

Lavvarme skive 2. Dag 56			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	419,9		420,4		426,4		439,8	
10min	600	24.5	429,6	970	424,7	430	433,6	720	443,2	440
30min	1800	42.4	434,6	1470	426,6	620	437	1060	444,3	550
1 time	3600	60.0	439,2	1930	428,5	810	440,8	1440	446	720
2 timer	7200	84.9	444	2410	430,8	1040	445,2	1880	448,3	950
3 timer	10800	103.9	446,6	2670	432,4	1200	446,8	2040	450,3	1150
4 timer	14400	120.0	448	2810	433,6	1320	447,1	2070	451,9	1310
6 timer	21600	147.0	448,4	2850	435,4	1500	447,2	2080	454,1	1530
1 døgn	86400	293.9	449,2	2930	442,8	2240	447,8	2140	462,4	2360
2 døgn	172800	415.7	449,6	2970	445,4	2500	447,9	2150	464,5	2570
3 døgn	259200	509.1	449,7	2980	446,1	2570	448	2160	464,8	2600
4 døgn	348000	589.9	449,9	3000	446,4	2600	448,3	2190	465	2620
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			450,2	185	447,0	183	448,8	184,0	465,7	190
1 døgn Trykktank			451,6		447,9		451,7		467,1	

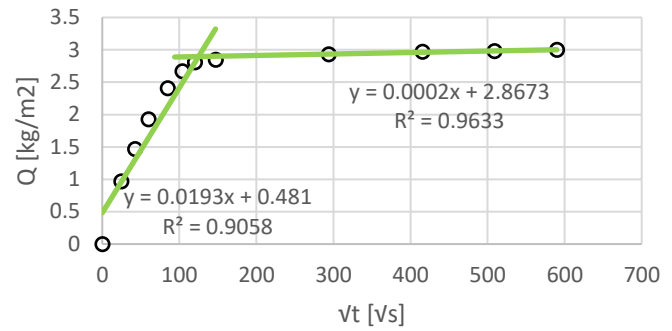
Lavvarme skive 1. Dag 56	g1 [g]	g2 [g]	g3 [g]	g4 [g]
Benk	446,3	474,5	193	475,8
Vannbad	439,8	467,5	192	468,5
Klima	420,2	444,7	185,0	447,7
Vannbad+Benk	446,3	474,5	193	475,8
Lavvarme skive 2. Dag 56				
Benk	419,9	450,2	185	451,6
Vannbad	420,4	447,0	183	447,9
Klima	426,4	448,8	184,0	451,7
Vannbad+Benk	439,8	465,7	190	467,1

Lavvarme Skive 1. Dag 56	Tykkelse [mm]	Areal [m2]	Volum [m3]	Tørr densitet [kg/m3]	Faststoffdensitet [kg/m3]	Sugemettet densitet [kg/m3]	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi	Kalkulert masseforhold
Benk	19	0.01	0,0001930	2312,44	2729,66	2458,55	0,146	0,007	0,153	0,044	0,56
Vannbad	18.9	0.01	0,0001920	2290,63	2693,20	2434,90	0,144	0,005	0,149	0,035	0,55
Klimaskap	18.9	0.01	0,0001850	2271,35	2667,94	2403,78	0,132	0,016	0,149	0,109	0,49
Vannbad+Benk	18.9	0.01	0,0001875	2314,13	2711,88	2452,80	0,139	0,008	0,147	0,055	0,52
Lavvarme Skive 2. Dag 56											
Benk	18.9	0.01	0,0001850	2269,73	2739,07	2433,51	0,164	0,008	0,171	0,044	0,68
Vannbad	19.1	0.01	0,0001830	2297,27	2703,54	2442,62	0,145	0,005	0,150	0,033	0,56
Klimaskap	18.8	0.01	0,0001840	2317,39	2686,83	2439,13	0,122	0,016	0,138	0,115	0,44
Vannbad+Benk	19	0.01	0,0001900	2314,74	2703,13	2451,05	0,136	0,007	0,144	0,051	0,51

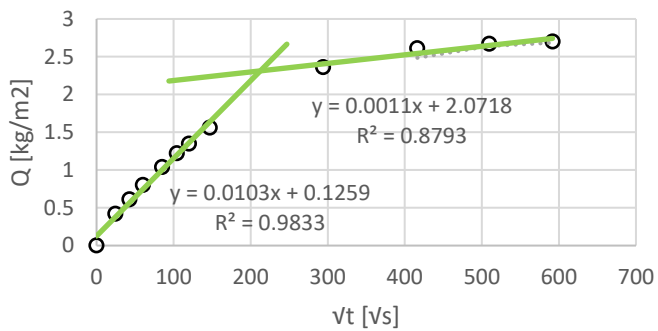
1 Lavvarme Benk, Dag 56



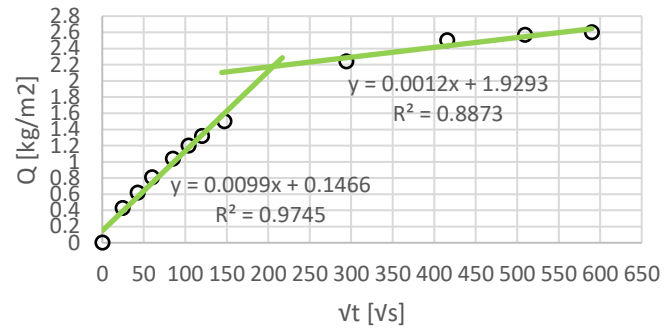
2 Lavvarme Benk, Dag 56



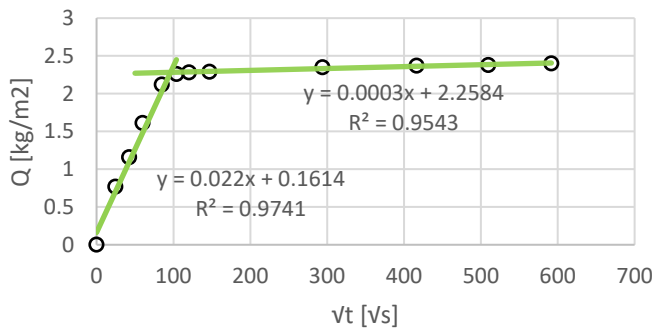
1 Lavvarme Vannbad, Dag 56



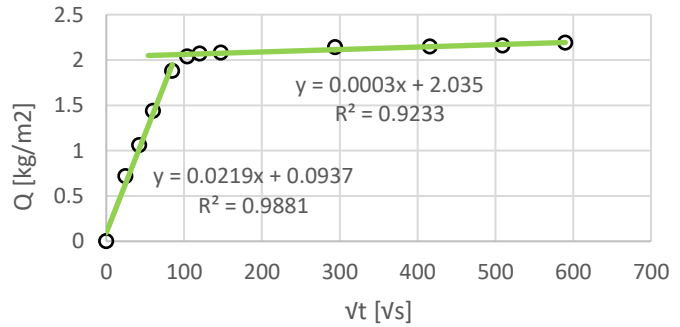
2 Lavvarme Vannbad, Dag 56



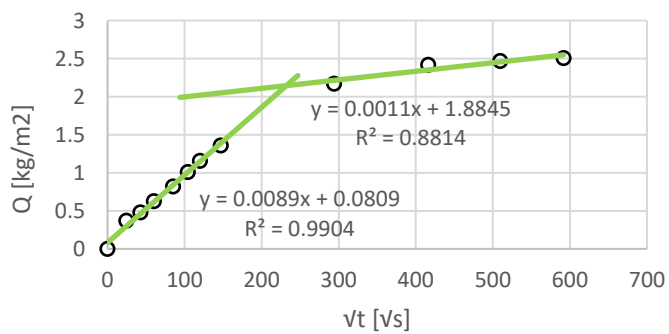
1 Lavvarme Klimaskap, Dag 56



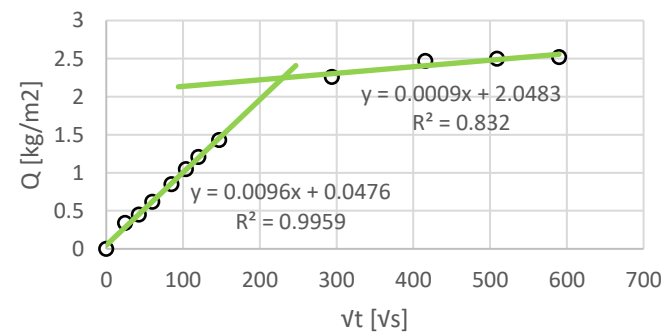
2 Lavvarme Klimaskap, Dag 56



1 Lavvarme Vannbad+Benk, Dag 56



2 Lavvarme Vann+Benk, Dag 56



Lavvarme Skive 1. Dag 56	Qkap [kg/m ²]	Rot(tkap) [√s]	Stigehøyde [mm]	Kapillaritetstallet [kg/m ² √s]	Motstandstall [s/m ²] 10 ⁶
Benk	2,66	113,77	19,4	0,0234	34,4
Vannbad	2,28	209,24	19,3	0,0109	117,5
Klimaskap	2,29	96,64	19	0,0237	25,9
Vannbad+Benk	2,14	231,23	19	0,0093	148,1
Lavvarme Skive 2. Dag 56					
Benk	2,89	124,94	18,9	0,0231	43,7
Vannbad	2,18	204,91	18,5	0,0106	122,7
Klimaskap	2,06	89,88	18,7	0,0229	23,1
Vannbad+Benk	2,26	229,97	19	0,0098	146,5

Norcem Standard 60% FA, Dag 56:

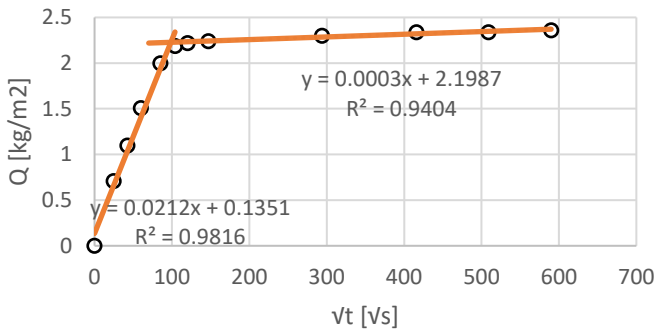
Standard 60% FA skive 1. Dag 56			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	425,6		448		432,5		426,2	
10min	600	24.5	432,7	710	451,9	390	443,0	1050	431,5	530
30min	1800	42.4	436,6	1100	454	600	447,7	1520	433,8	760
1 time	3600	60.0	440,7	1510	456	800	453,7	2120	436,6	1040
2 timer	7200	84.9	445,6	2000	458,5	1050	459,8	2730	440,6	1440
3 timer	10800	103.9	447,5	2190	460	1200	461,3	2880	443,5	1730
4 timer	14400	120.0	447,8	2220	461,4	1340	461,4	2890	445,5	1930
6 timer	21600	147.0	448	2240	463,3	1530	461,6	2910	447,2	2100
1 døgn	86400	293.9	448,6	2300	469,9	2190	462,5	3000	448,2	2200
2 døgn	172800	415.7	449	2340	471,5	2350	462,8	3030	448,4	2220
3 døgn	259200	509.1	449	2340	471,6	2360	462,9	3040	448,5	2230
4 døgn	348000	589.9	449,2	2360	471,7	2370	463	3050	448,7	2250
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			449,6	186	472,1	196	463,4	190,5	449,3	186,5
1 døgn Trykktank			452,6		476		464,8		453,3	

Standard 60% FA skive 2. Dag 56			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	448,8		428,4		421,5		426,9	
10min	600	24.5	454,8	600	432,2	380	432,9	1140	431,4	450
30min	1800	42.4	458,4	960	434,1	570	438,6	1710	433,3	640
1 time	3600	60.0	462,7	1390	435,9	750	444,3	2280	435,5	860
2 timer	7200	84.9	467	1820	438,3	990	448,8	2730	437,7	1080
3 timer	10800	103.9	470	2120	439,8	1140	450	2850	440,8	1390
4 timer	14400	120.0	471,6	2280	441,2	1280	450,2	2870	443,1	1620
6 timer	21600	147.0	472,1	2330	443	1460	450,2	2870	445,7	1880
1 døgn	86400	293.9	472,7	2390	449,5	2110	451,3	2980	448,3	2140
2 døgn	172800	415.7	473,1	2430	450,7	2230	451,4	2990	448,5	2160
3 døgn	259200	509.1	473,2	2440	450,7	2230	451,5	3000	448,5	2160
4 døgn	348000	589.9	473,3	2450	450,9	2250	451,6	3010	448,8	2190
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			473,8	195,5	451,3	187,5	452,1	186,0	449,4	186,5
1 døgn Trykktank			477		454,8		453,5		453,2	

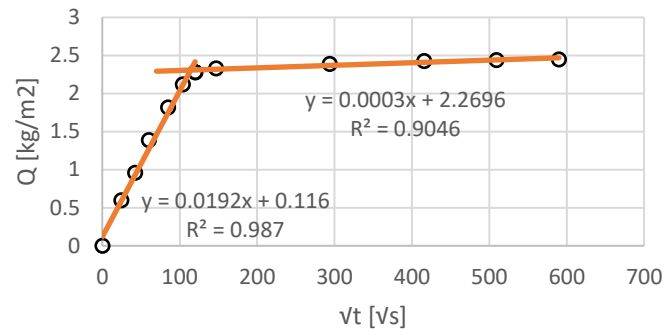
Standard 60% FA skive 1. Dag 56	g1 [g]	g2 [g]	g3 [g]	g4 [g]
Benk	425,6	449,6	186	452,6
Vannbad	448	472,1	196	476
Klima	432,5	463,4	190,5	464,8
Vannbad+Benk	426,2	449,3	186,5	453,3
Standard 60% FA skive 2. Dag 56	g1 [g]	g2 [g]	g3 [g]	g4 [g]
Benk	448,8	473,8	195,5	477
Vannbad	428,4	451,3	187,5	454,8
Klima	421,5	452,1	186,0	453,5
Vannbad+Benk	426,9	449,4	186,5	453,2

Standard 60% FA Skive 1. Dag 56	Tykkelse [mm]	Areal [m2]	Volum [m3]	Tørr densitet [kg/m3]	Faststoffdensitet [kg/m3]	Sugemettet densitet [kg/m3]	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi	Kalkulert masseforhold
Benk	19	0,01	0,0001860	2288,17	2676,73	2417,20	0,129	0,016	0,145	0,111	0,48
Vannbad	19,70	0,01	0,0001960	2285,71	2666,67	2408,67	0,123	0,020	0,143	0,139	0,45
Klimaskap	19,3	0,01	0,0001905	2270,34	2733,88	2432,55	0,162	0,007	0,170	0,043	0,67
Vannbad+Benk	18,90	0,01	0,0001865	2285,25	2673,78	2409,12	0,124	0,021	0,145	0,148	0,45
Standard 60% FA Skive 2. Dag 56	Tykkelse [mm]	Areal [m2]	Volum [m3]	Tørr densitet [kg/m3]	Faststoffdensitet [kg/m3]	Sugemettet densitet [kg/m3]	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi	Kalkulert masseforhold
Benk	19,5	0,01	0,0001955	2295,65	2682,61	2423,53	0,128	0,016	0,144	0,113	0,47
Vannbad	18,9	0,01	0,0001875	2284,80	2659,22	2406,93	0,122	0,019	0,141	0,133	0,44
Klimaskap	19,0	0,01	0,0001860	2266,13	2737,01	2430,65	0,165	0,008	0,172	0,044	0,68
Vannbad+Benk	19	0,01	0,0001865	2289,01	2664,79	2409,65	0,121	0,020	0,141	0,144	0,44

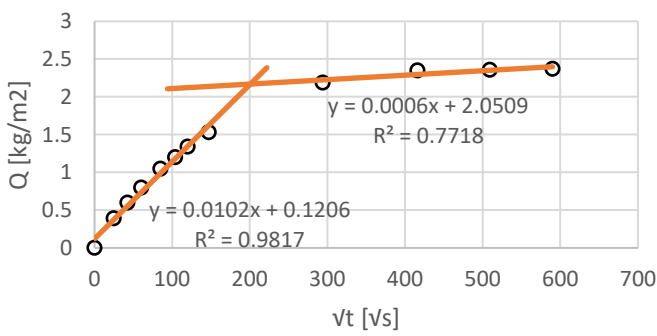
1 Standard 60 % FA Benk, Dag 56



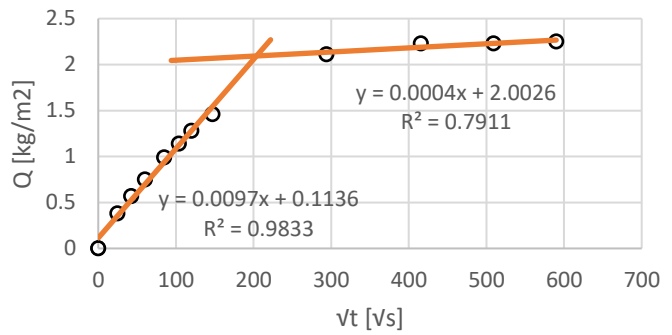
2 Standard 60% FA Benk, Dag 56



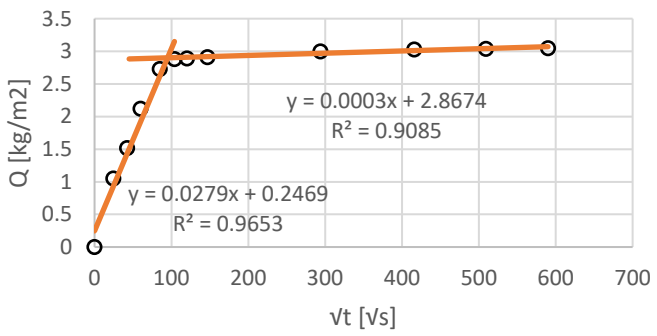
1 Standard 60 % FA Vannbad, Dag 56



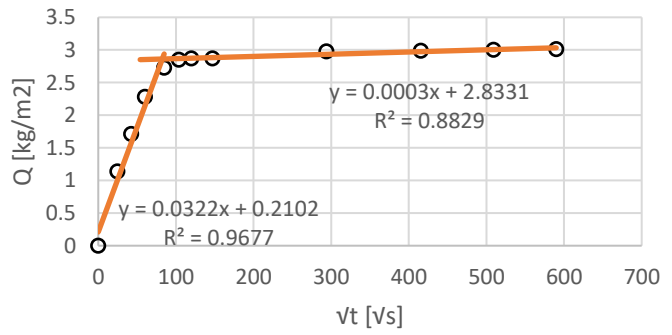
2 Standard 60% FA Vannbad, Dag 56



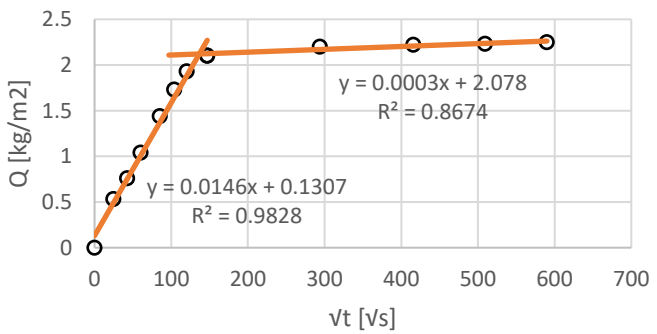
1 Standard 60 % FA Klimaskap, Dag 56



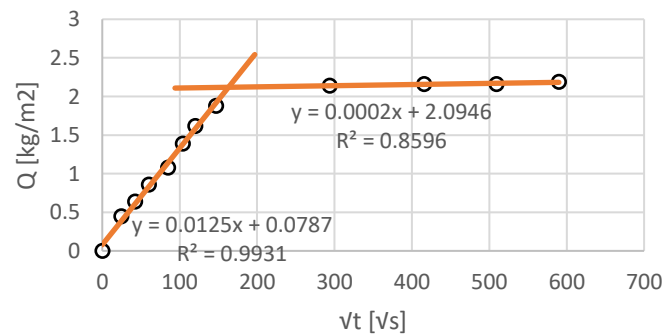
2 Standard 60% FA Klimaskap, Dag 56



1 Standard 60 % FA Vann+Benk, Dag 56



2 Standard 60% FA Vannbad+Benk, Dag 56



Standard 60% FA Skive 1. Dag 56	Qkap [kg/m ²]	Rot(tkap) [√s]	Stigehøyde [mm]	Kapillaritetstallet [kg/m ² √s]	Motstandstall [s/m ²] 10 ⁶
Benk	2,23	98,74	19	0,0226	27,0
Vannbad	2,17	201,07	19,7	0,0108	104,2
Klimaskap	2,9	94,95	19,3	0,0305	24,2
Vannbad+Benk	2,12	136,17	18,9	0,0156	51,9
Standard 60% FA Skive 2. Dag 56					
Benk	2,3	113,95	19,5	0,0202	34,1
Vannbad	2,08	203,12	18,9	0,0102	115,5
Klimaskap	2,86	82,22	19	0,0348	18,7
Vannbad+Benk	2,13	163,89	19	0,0130	74,4

Norcem Industri, Dag 56:

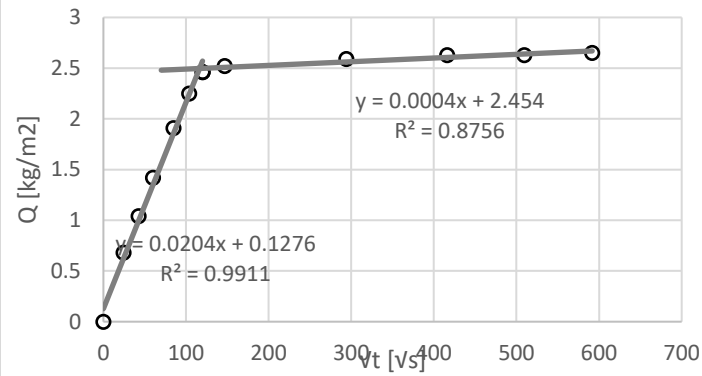
Industri skive 1. Dag 56			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	445,2		434,6		435,2		439,1	
10min	600	24.5	452	680	440,2	560	441,5	630	446,1	700
30min	1800	42.4	455,6	1040	443,2	860	444,7	950	449,1	1000
1 time	3600	60.0	459,4	1420	446,4	1180	448,3	1310	452,6	1350
2 timer	7200	84.9	464,3	1910	450,5	1590	453	1780	457,5	1840
3 timer	10800	103.9	467,7	2250	453,3	1870	456,6	2140	461	2190
4 timer	14400	120.0	469,8	2460	455,2	2060	458,5	2330	462,9	2380
6 timer	21600	147.0	470,4	2520	456,2	2160	459,1	2390	463,6	2450
1 døgn	86400	293.9	471,1	2590	456,7	2210	459,7	2450	464,1	2500
2 døgn	172800	415.7	471,5	2630	456,9	2230	459,9	2470	464,2	2510
3 døgn	259200	509.1	471,5	2630	456,9	2230	460	2480	464,3	2520
4 døgn	348000	589.9	471,7	2650	457	2240	460,2	2500	464,5	2540
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			472,1	194	457,3	185,5	460,7	188,0	464,9	192
1 døgn Trykktank			474,4		459,4		463		467,5	

Industri skive 2. Dag 56			Benk		Vannbad		Klimaskap		Vannbad+Benk	
Tid	Sek	Rot(Sek)	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]	Vekt [g]	Abs [g/m2]
0min	0	0	443,8		441,5		424,3		434,9	
10min	600	24.5	450,1	630	447,1	560	430,3	600	440,9	600
30min	1800	42.4	453,6	980	450,2	870	433,3	900	443,7	880
1 time	3600	60.0	457,3	1350	453,7	1220	436,6	1230	447	1210
2 timer	7200	84.9	461,9	1810	458	1650	440,4	1610	451,2	1630
3 timer	10800	103.9	465,2	2140	461,5	2000	443,7	1940	454,3	1940
4 timer	14400	120.0	467,4	2360	463,7	2220	445,7	2140	456,1	2120
6 timer	21600	147.0	468,3	2450	464,6	2310	446,7	2240	456,6	2170
1 døgn	86400	293.9	469	2520	465,2	2370	447,5	2320	457,1	2220
2 døgn	172800	415.7	469,5	2570	465,3	2380	447,6	2330	457,4	2250
3 døgn	259200	509.1	469,5	2570	465,3	2380	447,7	2340	457,3	2240
4 døgn	348000	589.9	469,7	2590	465,4	2390	447,9	2360	457,5	2260
Neddykket i vann			Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]	Vekt i luft [g]	Vekt i vann [g]
3 Døgn			470	192,5	465,7	190	448,4	183,0	457,9	186,5
1 døgn Trykktank			472,3		468		450,6		460,2	

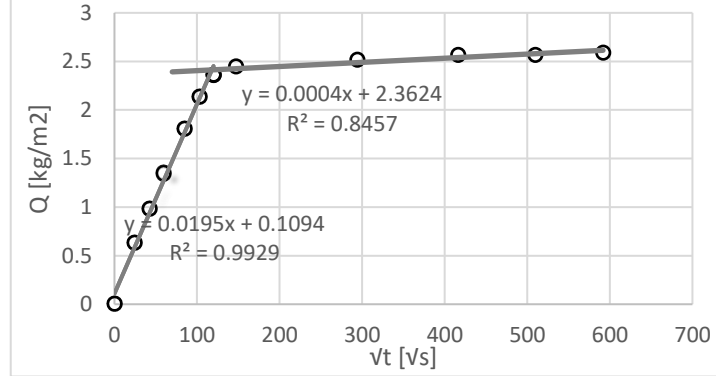
Industri skive 1. Dag 56	g1 [g]	g2 [g]	g3 [g]	g4 [g]
Benk	445,2	472,1	194	474,4
Vannbad	434,6	457,3	185,5	459,4
Klima	435,2	460,7	188,0	463
Vannbad+Benk	439,1	464,9	192	467,5
Industri skive 2. Dag 56				
Benk	443,8	470	192,5	472,3
Vannbad	441,5	465,7	190	468
Klima	424,3	448,4	183,0	450,6
Vannbad+Benk	434,9	457,9	186,5	460,2

Industri Skive 1. Dag 56	Tykkelse [mm]	Areal [m2]	Volum [m3]	Tørr densitet [kg/m3]	Faststoffdensitet [kg/m3]	Sugemettet densitet [kg/m3]	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi	Kalkulert masseforhold
Benk	19,1	0,01	0,0001940	2294,85	2701,46	2433,51	0,139	0,012	0,151	0,079	0,52
Vannbad	18,9	0,01	0,0001855	2342,86	2704,42	2465,23	0,122	0,011	0,134	0,085	0,45
Klimaskap	19,0	0,01	0,0001880	2314,89	2716,60	2450,53	0,136	0,012	0,148	0,083	0,51
Vannbad+Benk	19,4	0,01	0,0001920	2286,98	2683,99	2421,35	0,134	0,014	0,148	0,092	0,50
Industri Skive 2. Dag 56											
Benk	19,1	0,01	0,0001925	2305,45	2706,10	2441,56	0,136	0,012	0,148	0,081	0,51
Vannbad	19,1	0,01	0,0001900	2323,68	2700,31	2451,05	0,127	0,012	0,139	0,087	0,47
Klimaskap	18,5	0,01	0,0001830	2318,58	2707,72	2450,27	0,132	0,012	0,144	0,084	0,49
Vannbad+Benk	18,9	0,01	0,0001865	2331,90	2697,89	2455,23	0,123	0,012	0,136	0,091	0,45

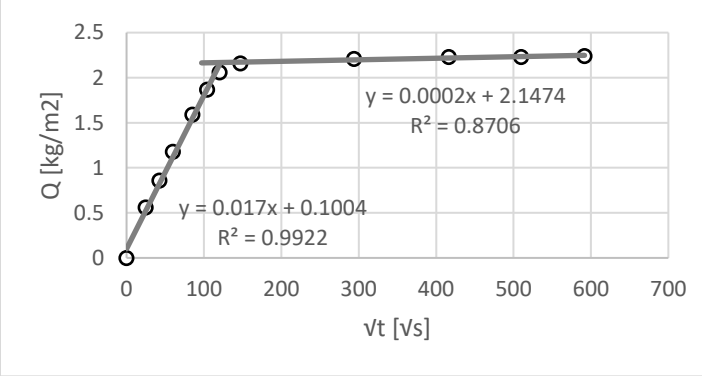
1 Industri Benk, Dag 56



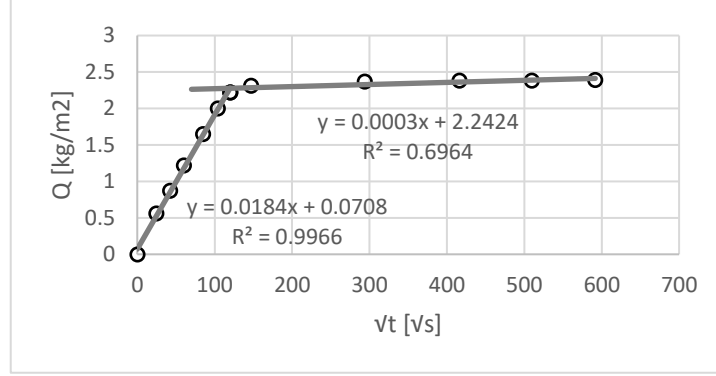
2 Industri Benk, Dag 56



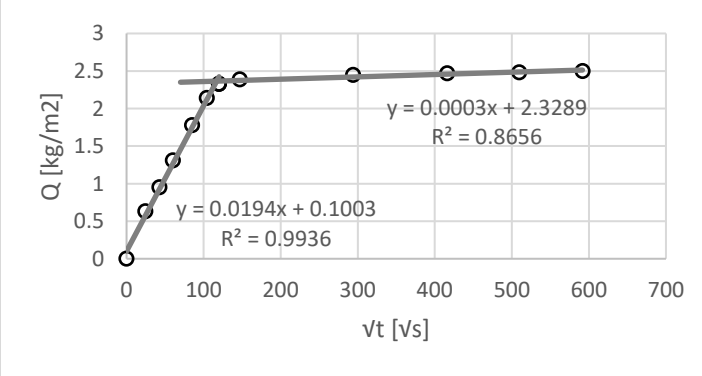
1 Industri Vannbad, Dag 56



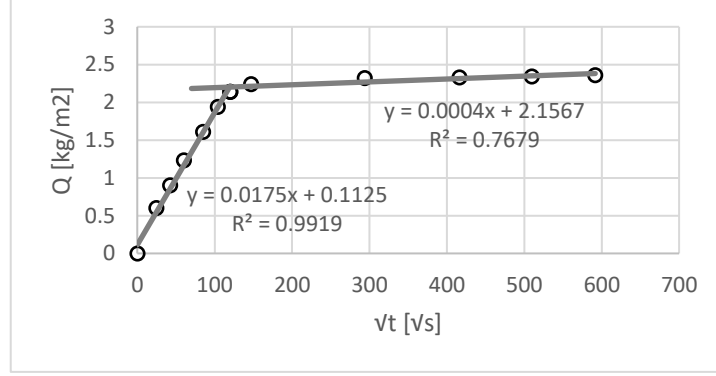
2 Industri Vannbad, Dag 56



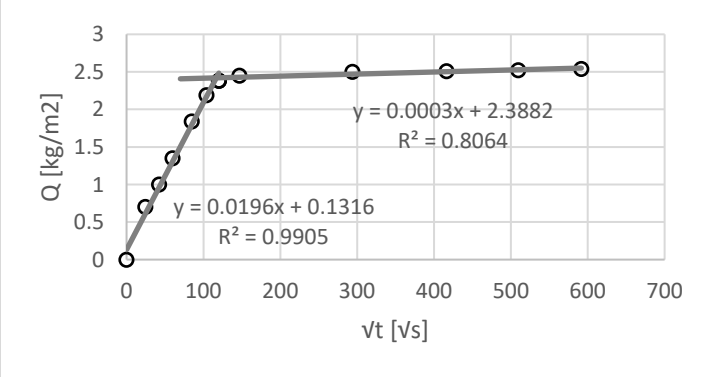
1 Industri Klimaskap, Dag 56



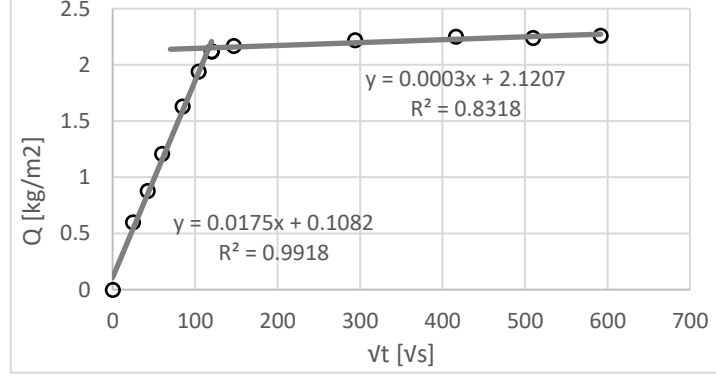
2 Industri Klimaskap, Dag 56



1 Industri Vann+Benk, Dag 56



2 Industri Vannbad+Benk, Dag 56



Industri Skive 1. Dag 56	Qkap [kg/m ²]	Rot(tkap) [√s]	Stigehøyde [mm]	Kapillaritetstallet [kg/m ² √s]	Motstandstall [s/m ²] 10 ⁶
Benk	2,5	116,32	19,1	0,0215	37,1
Vannbad	2,17	121,85	18,9	0,0178	41,6
Klimaskap	2,36	116,68	19	0,0202	37,7
Vannbad+Benk	2,42	116,92	19,4	0,0207	36,3
Industri Skive 2. Dag 56					
Benk	2,41	117,96	19,1	0,0204	38,1
Vannbad	2,28	116,92	19,1	0,0195	37,5
Klimaskap	2,2	119,54	18,5	0,0184	41,8
Vannbad+Benk	2,16	117,01	18,9	0,0185	38,3

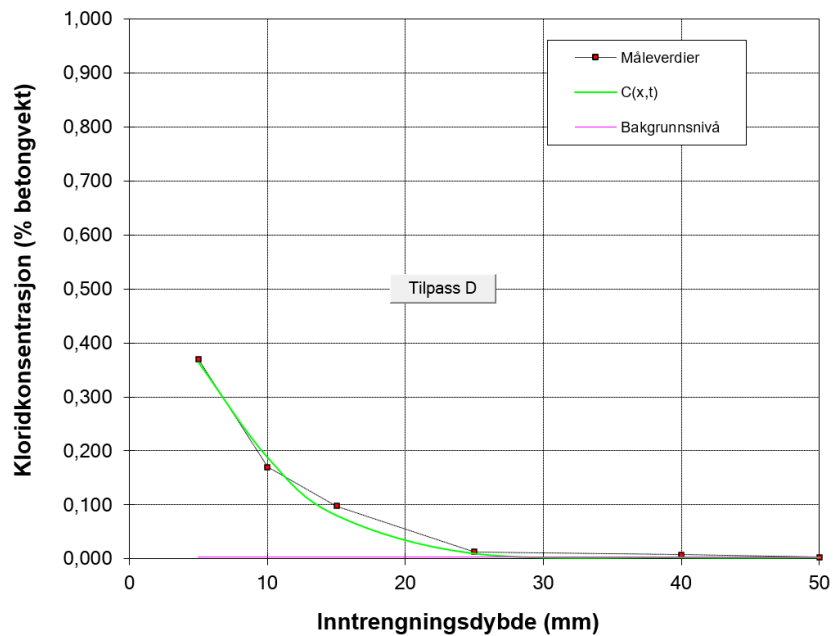
Vedlegg B
Kloridprofiler

Standard 60% FA Vannbad+Benk:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Miljøbetong Profil FA V+B 02.06.2023

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,003	% betong
Cs	0,589	% betong
D	16,46	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9968	
Inntrengning	140,0	g/m ²
k (0.1 %)	44,9	mm

x	målt	status
5	0,370	ok
10	0,170	ok
15	0,098	ok
25	0,013	ok
40	0,008	ok
50	0,003	ok

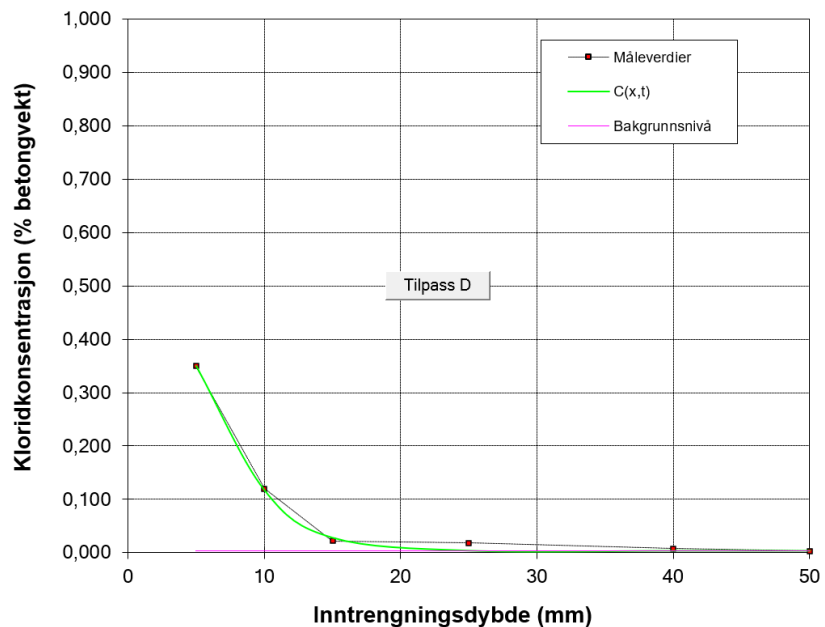


Standard 60% FA Benk:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Miljøbetong Profil FA Benk 02.06.2023

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,003	% betong
Cs	0,727	% betong
D	8,28	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9988	
Inntrengning	110,9	g/m ²
k (0.1 %)	34,3	mm

x	målt	status
5	0,350	ok
10	0,120	ok
15	0,022	ok
25	0,018	ok
40	0,008	ok
50	0,003	ok

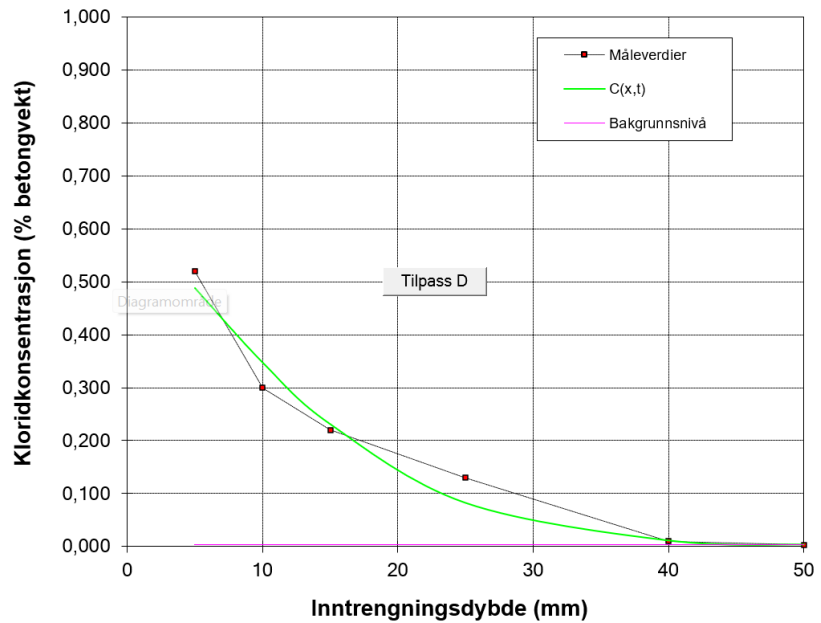


Standard 60% FA Klimaskap:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Miljøbetong Profil FA Kjøel 02.06.2023

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,003	% betong
Cs	0,642	% betong
D	43,92	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9854	
Inntrengning	260,3	g/m^2
k (0.1 %)	75,4	mm

x	målt	status
5	0,520	ok
10	0,300	ok
15	0,220	ok
25	0,130	ok
40	0,010	ok
50	0,003	ok

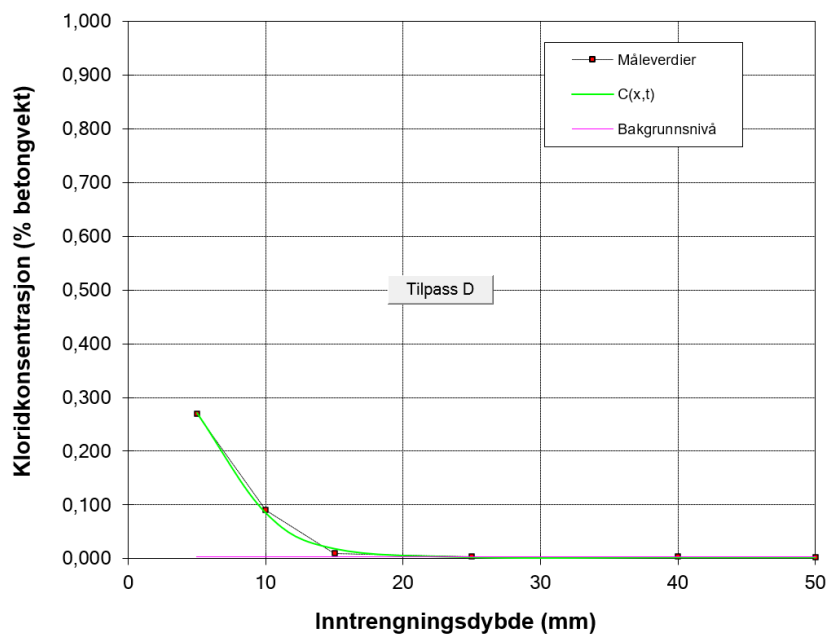


Standard FA Vannbad:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Miljøbetong Profil FA Vannbad 02.06.2023

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,003	% betong
Cs	0,581	% betong
D	7,70	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9991	
Inntrengning	79,3	g/m^2
k (0.1 %)	30,4	mm

x	målt	status
5	0,270	ok
10	0,090	ok
15	0,010	ok
25	0,004	ok
40	0,004	ok
50	0,003	ok

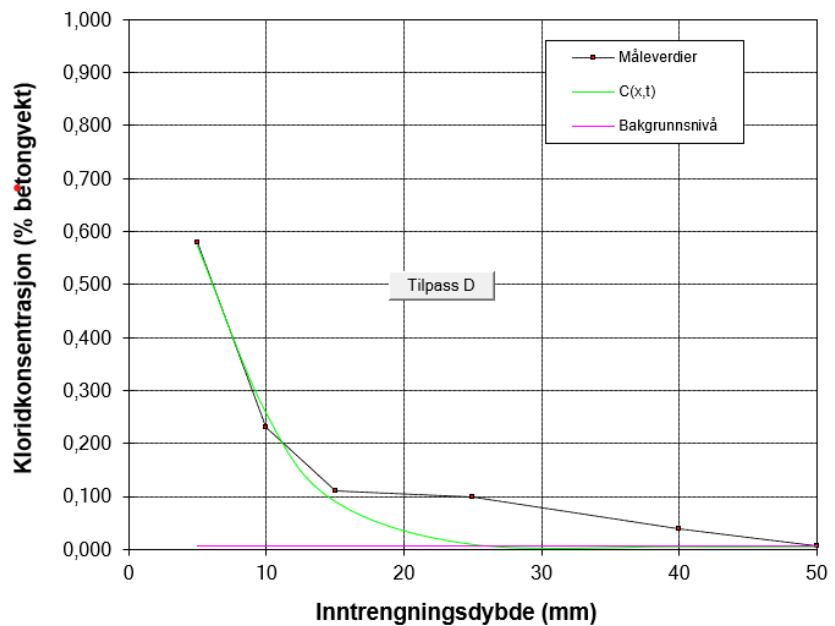


Lavvarme Vannbad+Benk:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Miljøbetong Profil Lav V+B 02.06.2023

Ekspontertid	840	timer
Bakgrunn	0,006	% betong
Cs	1,006	% betong
D	12,55	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9855	
Inntrengning	232,2	g/m ²
k (0.1 %)	47,0	mm

x	målt	status
5	0,580	ok
10	0,230	ok
15	0,110	ok
25	0,100	ok
40	0,040	ok
50	0,006	ok

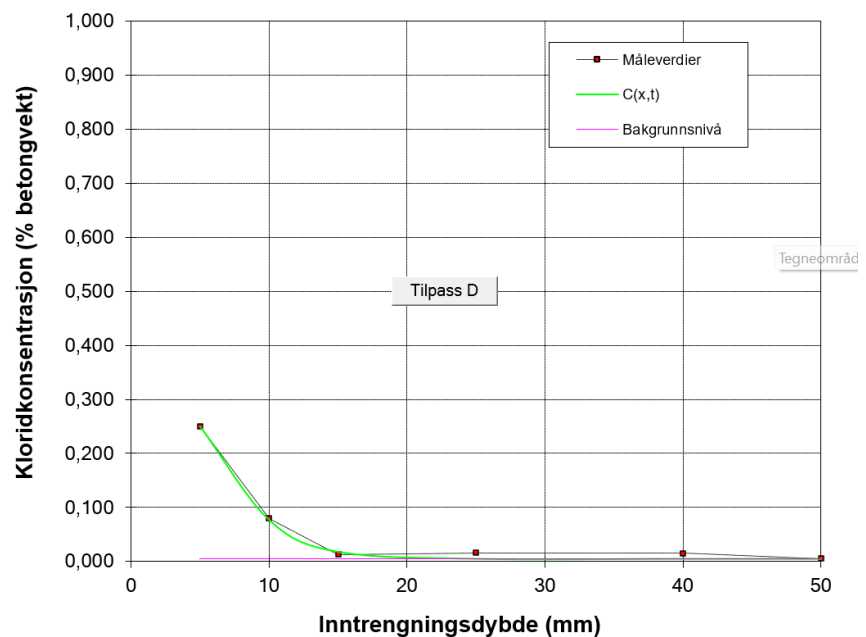


Lavvarme Benk:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Miljøbetong Profil Lav Benk 02.06.2023

Ekspontertid	840	timer
Bakgrunn	0,006	% betong
Cs	0,547	% betong
D	7,33	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9981	
Inntrengning	76,8	g/m ²
k (0.1 %)	29,2	mm

x	målt	status
5	0,250	ok
10	0,080	ok
15	0,013	ok
25	0,016	ok
40	0,015	ok
50	0,006	ok

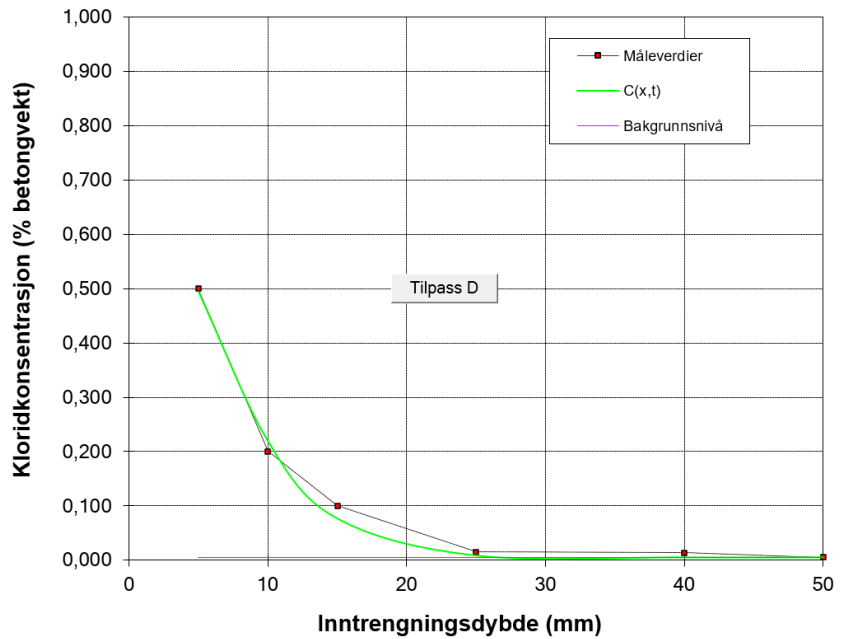


Lavvarme Klimaskap:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Milljøbetong Profil Lav Kjøl 02.06.2023

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,006	% betong
Cs	0,876	% betong
D	12,29	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9975	
Inntrengning	175,2	g/m^2
k (0.1 %)	44,6	mm

x	målt	status
5	0,500	ok
10	0,200	ok
15	0,100	ok
25	0,015	ok
40	0,014	ok
50	0,006	ok

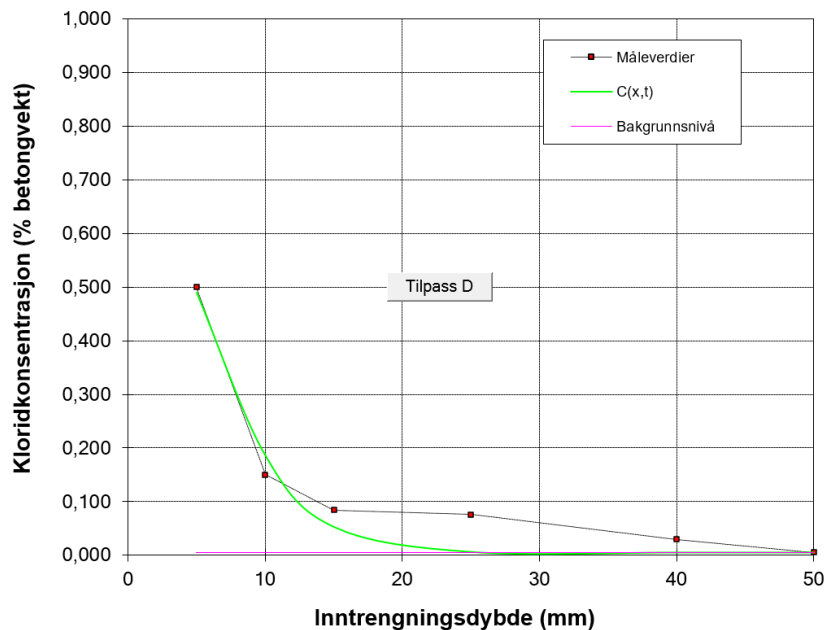


Lavvarme Vannbad:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Milljøbetong Profil Lav Vannbad 02.06.2023

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,006	% betong
Cs	0,945	% betong
D	9,75	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9835	
Inntrengning	185,5	g/m^2
k (0.1 %)	40,7	mm

x	målt	status
5	0,500	ok
10	0,150	ok
15	0,084	ok
25	0,076	ok
40	0,030	ok
50	0,006	ok

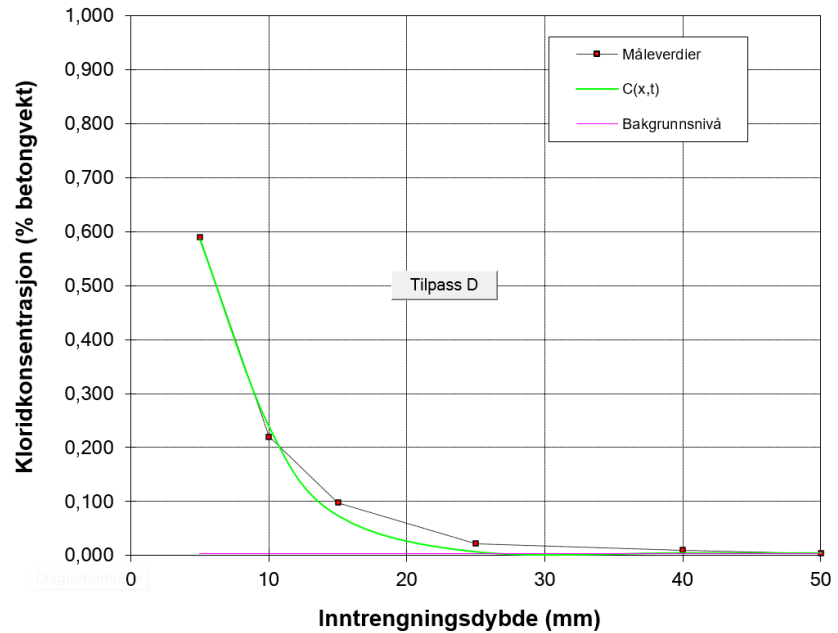


Industri Vannbad+Benk:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Miljøbetong Profil: Ind V+B 02.06.2023

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,004	% betong
Cs	1,086	% betong
D	10,85	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9980	
Inntrengning	202,0	g/m^2
k (0.1 %)	44,5	mm

x	målt	status
5	0,590	ok
10	0,220	ok
15	0,098	ok
25	0,022	ok
40	0,010	ok
50	0,004	ok

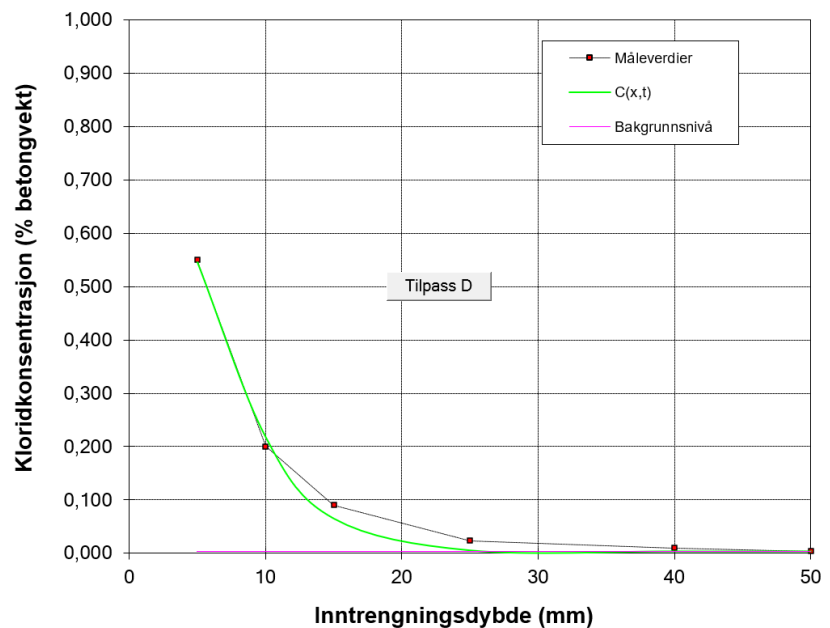


Industri Benk:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Miljøbetong Profil: Ind Benk 02.06.2023

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,004	% betong
Cs	1,023	% betong
D	10,53	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9977	
Inntrengning	188,1	g/m^2
k (0.1 %)	43,1	mm

x	målt	status
5	0,550	ok
10	0,200	ok
15	0,090	ok
25	0,024	ok
40	0,010	ok
50	0,004	ok

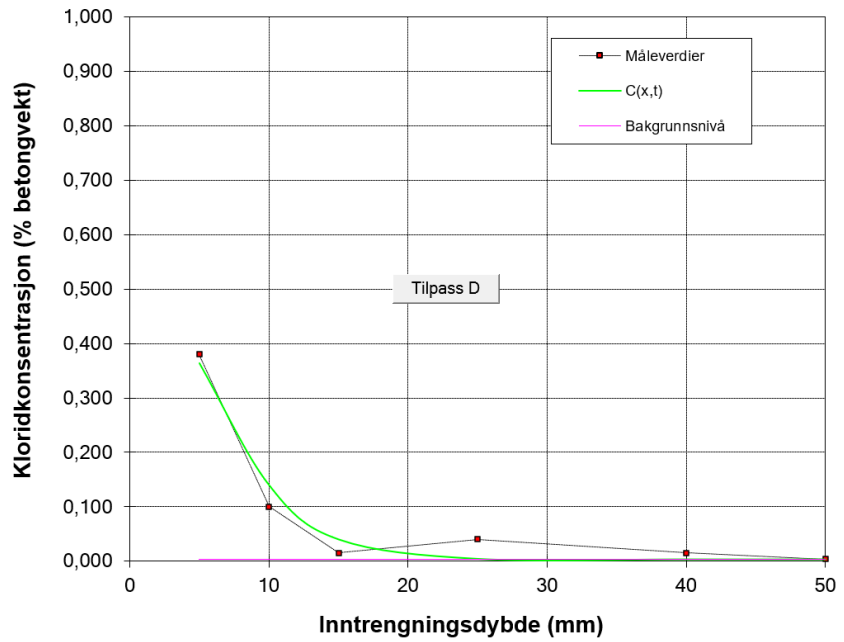


Industri Klimaskap:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Milljøbetong Profil Ind Kjøøl 02.06.2023

Eksponeert tid	840	timer
Bakgrunn	0,004	% betong
Cs	0,697	% betong
D	9,91	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9813	
Inntrengning	120,2	g/m^2
k (0.1 %)	37,1	mm

x	målt	status
5	0,380	ok
10	0,100	ok
15	0,015	ok
25	0,040	ok
40	0,015	ok
50	0,004	ok



Industri Vannbad:

Beregning av Cs og D Prosjekt: Milljøbetong Profil Ind Vannbad 02.06.2023

Eksponeert tid	840	timer
Bakgrunn	0,004	% betong
Cs	0,616	% betong
D	9,83	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R ²	0,9949	
Inntrengning	100,1	g/m^2
k (0.1 %)	35,3	mm

x	målt	status
5	0,330	ok
10	0,100	ok
15	0,022	ok
25	0,013	ok
40	0,007	ok
50	0,004	ok

